



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

Programa de Pós-graduação em
Engenharia Mecânica

**AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DE UM VEÍCULO EQUIPADO COM
ALTERNADOR COM DESACOPLAMENTO ELETROMECAÂNICO E
SISTEMA STOP-START**

Luis Gustavo de Carvalho Monteiro

Belo Horizonte - MG

2020

Luis Gustavo de Carvalho Monteiro

**AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DE UM VEÍCULO EQUIPADO COM
ALTERNADOR COM DESACOPLAMENTO ELETROMECHANICO E
SISTEMA STOP-START**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de Concentração: Energia e Sustentabilidade
Orientador: Prof. Fabrício José Pacheco Pujatti

**Belo Horizonte - MG
2020**

M775a	<p>Monteiro, Luis Gustavo de Carvalho. Avaliação experimental de um veículo equipado com alternador com desacoplamento eletromecânico e sistema Stop-Start [recurso eletrônico] / Luis Gustavo de Carvalho Monteiro. - 2020. 1 recurso online (163 f. : il., color.) : pdf.</p> <p>Orientador: Fabrício José Pacheco Pujatti.</p> <p>Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.</p> <p>Anexos e apêndices: f. 155-163.</p> <p>Bibliografia: f. 146-154. Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.</p> <p>1. Engenharia mecânica - Teses. 2. Eficiência energética - Teses. 3. Sustentabilidade - Teses. I. Pujatti, Fabrício José Pacheco. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDU: 621 (043)</p>
-------	---



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

FOLHA DE APROVAÇÃO

AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DE UM VEÍCULO EQUIPADO COM ALTERNADOR COM DESACOPLAMENTO ELETROMECAÂNICO E SISTEMA STOP-START

LUIS GUSTAVO DE CARVALHO MONTEIRO

Dissertação submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, constituída pelos Professores: Dr. Fabrício José Pacheco Pujatti (orientador/Departamento de Engenharia Mecânica/UFMG), Dr. Sérgio de Moraes Hanriot (Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais/PUC-MG) e Dr. José Guilherme Coelho Baêta (Departamento de Engenharia Mecânica/UFMG), como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de "Mestre em Engenharia Mecânica", na área de concentração de "Energia e Sustentabilidade".

Dissertação aprovada no dia 18 de setembro de 2020.

Por:



Documento assinado eletronicamente por **Fabrício Jose Pacheco Pujatti, Coordenador(a)**, em 07/10/2020, às 09:06, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Jose Guilherme Coelho Baeta, Professor do Magistério Superior**, em 21/10/2020, às 09:59, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Sergio de Moraes Hanriot, Usuário Externo**, em 10/11/2020, às 18:38, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0277581** e o código CRC **A2471099**.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pelo conforto espiritual e por me iluminar continuamente, concedendo as plenas condições para a realização deste trabalho científico.

Agradeço imensamente a minha mãe Ana Ruth pela preocupação diária com o meu bem-estar, pelo apoio incondicional e conforto nos momentos difíceis ao longo da realização deste trabalho. Ao meu pai Luis Carlos pelo constante incentivo com suas palavras, seu exemplo profissional e pessoal, por sempre fomentar a busca pelo conhecimento em mim, além de permitir com que uma de suas idealizações e inventos científicos fosse tema deste trabalho científico. A minha irmã Mariana pela amizade, motivação e momentos de descontração.

Agradeço ao Professor Dr. Fabrício Pujatti pela disponibilidade, cordialidade, conselhos, aprendizado e interesse em orientador este trabalho.

A Fiat Chrysler Automóveis por fornecer as condições, estrutura, equipamentos e recursos para a realização dos testes experimentais necessários para o êxito deste trabalho, juntamente a todos os meus colegas da FCA, em especial ao John Marlon, Lícia Gonçalves e João Rodrigues pelo auxílio com os testes e dados experimentais.

Agradeço ao Lau Veríssimo pelo apoio inicial e contínuo na realização desse trabalho, sempre acreditando nos benefícios da busca pelo conhecimento com experiências acadêmicas e científicas para a Indústria, além de ter ofertado as condições para conciliação das atividades profissionais pela FCA com a realização desta Dissertação.

A Layla pela paciência, incentivo constante, por sempre ter me transmitido tranquilidade e nunca ter duvidado da minha capacidade, mesmo nos momentos mais adversos durante esta jornada. A todos os meus colegas e amigos pelos momentos de diversão, em especial ao Matheus e Bruno, que me acompanham desde o início do curso de graduação em Engenharia Mecânica na UFMG.

A todos os meus familiares que torcem e vibram comigo a cada conquista em minha vida desde os tempos de escola. A todos os professores que tive contato até o momento por certamente terem contribuído com a minha formação e conhecimento.

A Universidade Federal de Minas Gerais por fomentar o conhecimento, a pesquisa científica e proporcionar condições para a formação humana e profissional dos seus discentes, em especial ao Programa de Pós-Graduação de Engenharia Mecânica da UFMG.

***"Nunca ande pelo caminho traçado,
pois ele conduz somente até onde os
outros já foram."***

(Alexander Graham Bell)

RESUMO

Ao longo das últimas décadas, a indústria automobilística tem assumido um importante papel no propósito global para contenção da emissão de dióxido de carbono para mitigar os efeitos negativos do efeito estufa. Diante disso, múltiplos acordos e tratados internacionais promoveram legislações que determinaram limites para a emissão de CO₂ e também para o consumo energético dos veículos automotores. Diversas tecnologias estão sendo desenvolvidas e têm sido implementadas para incrementar a eficiência energética dos veículos, reduzindo o consumo de combustível e, conseqüentemente, a emissão de CO₂ de forma direta. Esta pesquisa objetivou a análise experimental da aplicação isolada e conjunta de três tecnologias automotivas: um sistema de alternador inteligente (com desacoplamento parcial eletricamente); sistema *Stop-Start* que promove o desligamento automático do motor a combustão interna em paradas do veículo; e um alternador com desacoplamento eletromecânico (ADE) do eixo do motor a combustão interna, composto por uma polia integrada a uma embreagem eletromagnética. Esse último sistema se trata de uma inovação tecnológica em termos de controle da geração e aproveitamento da energia elétrica, em que o desacoplamento é realizado em função do estado de carga da bateria e condições de operação do motor a combustão interna. Assim, essa estratégia possibilita o completo descarregamento do eixo do motor em relação à inércia e campo eletromagnético do alternador. Em testes realizados com um veículo de passageiros foi possível obter reduções no consumo energético combinado (ponderação entre os ciclos urbano FTP-75 e estrada) na faixa de 2,17%, aplicando somente a tecnologia do “alternador inteligente”, e até 4,68% pela combinação do sistema *Stop-Start* aliado ao ADE. As reduções nas emissões de CO₂ também foram significativas, de forma que para o ciclo urbano obteve-se até 6,51% de redução e até 1,50% para o ciclo estrada.

Palavras-chave: Alternador com Desacoplamento Eletromecânico; Estratégia *Stop-Start*; Eficiência Energética

ABSTRACT

During recent decades, the automotive industry has developed important initiatives in order to reduce global carbon dioxide emissions and to mitigate the man-made greenhouse effect. Multiple international agreements have promoted limits for CO₂ emissions legislation and energy consumption of passenger cars. Energy saving technologies are being developed and have been implemented to increase the automotive efficiency, reducing fuel consumption and CO₂ emissions. This research aimed at the experimental analysis of the isolated and combined application for three automotive technologies: an "intelligent alternator" system with electrical partial decoupling; Stop-Start system that promotes internal combustion engine automatic shutdowns at vehicle stops; and an electromechanical decoupling alternator (EDA) from the internal combustion engine crankshaft (based on an integrated pulley with an electromagnetic clutch). The latter technology system represents an innovation in terms of controlling the generation and electric energy usage, in which the decoupling events are performed according to the battery state of charge and internal combustion engine operating conditions. Thus, this strategy allows the complete engine crankshaft unloading in relation to the alternator's inertia and electromagnetic field. In tests carried out with a passenger vehicle it was possible to achieve reductions in the combined energy consumption (from urban FTP-75 and highway cycles combination) in the range of 2.17%, applying only the "intelligent alternator" technology, and up to 4.68% by the combination of Stop-Start system and ADE test configuration. The reductions in CO₂ emissions were also significant, so that for the urban cycle there was a reduction of up to 6.51% and up to 1.50% for the highway cycle.

Keywords: Electromechanical Decoupling Alternator; Stop-Start strategy; Energy efficiency

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Evolução dos limites de emissões por veículos automotores para os países do G20, em gramas por km de CO ₂ -----	18
Figura 2 – Limites de emissões para veículos leves e comerciais – PROCONVE (L-1 a L-6)-----	25
Figura 3 - Modelo de Etiqueta Nacional de Conservação de Energia (ENCE)-----	29
Figura 4 – Quatro tempos de funcionamento do motor ciclo Otto -----	31
Figura 5 – Principais sensores e atuadores de um sistema de controle do motor ---	35
Figura 6 – Esquema de funcionamento do método <i>speed-density</i> -----	37
Figura 7 - Representação esquemática do sistema elétrico automotivo e seus principais componentes -----	39
Figura 8 – Principais componentes de uma bateria automotiva-----	42
Figura 9 – Representação das grandezas elétricas relacionadas à bateria automotiva -----	43
Figura 10 – Capacidade disponível (%) em função da corrente de descarga (A/Ah) e temperatura (°C)-----	44
Figura 11 – Semirreações do processo de descarga da bateria -----	45
Figura 12- Semirreações do processo de carga da bateria -----	45
Figura 13 – Ilustração de um componente IBS e sua estrutura -----	46
Figura 14 – Tipos de alternadores-----	48
Figura 15 – Variáveis do fluxo magnético -----	49
Figura 16 – Componentes do alternador -----	50
Figura 17 – Gráfico com distribuição de potências e perdas no alternador -----	54
Figura 18 – Curvas de eficiência e correntes de saída do alternador em função de sua rotação-----	55
Figura 19 – Componentes do sistema Stop-Start -----	56
Figura 20 - Evolução do consumo de combustíveis para ciclo Otto no Brasil de 2017 a 2020, em milhões de m ³ -----	60
Figura 21 — Concentração de CO ₂ formado de acordo com o fator lambda (λ)-----	62
Figura 22 – Balanço energético automotivo -----	63
Figura 23 – Embreagem eletromagnética -----	66
Figura 24 – Dispositivo OAD: “ <i>Overrunning Alternator Decoupler</i> ” -----	69
Figura 25 – Dispositivo E ³ : Configuração com engrenagens -----	71

Figura 26 - Dispositivo E ³ : Configuração com Polias e Correias -----	72
Figura 27 – Protótipos do ADE equipado com a polia integrada à embreagem eletromagnética -----	87
Figura 28 – Conjunto alternador e embreagem eletromagnética conectado à polia do eixo do motor a combustão interna por correia -----	87
Figura 29 – Representação da estratégia de desacoplamentos e acoplamentos em função do regime de funcionamento do motor a combustão interna e velocidade do veículo -----	90
Figura 30 – Gabinete com módulos para controle e coleta de dados -----	91
Figura 31 – Exemplos de parâmetros coletados nos testes e visualizados no programa computacional -----	92
Figura 32 – Interface com parâmetros de controle do sistema -----	93
Figura 33 – Sistema de controle do ADE e coleta de dados -----	94
Figura 34 - Representação esquemática do Laboratório de Emissões e Consumo de Combustível -----	95
Figura 35 – Representação do ciclo urbano -----	99
Figura 36 – Representação do ciclo estrada -----	99
Figura 37 – Exemplo de Diagrama de Blocos (<i>Box Plot</i>) e seus parâmetros principais segundo a distribuição Normal de probabilidade -----	104
Figura 38 - Ciclo urbano representativo para configuração “Somente S-S” -----	106
Figura 39 - Ciclo estrada representativo para configuração “Somente S-S” -----	106
Figura 40 - Detalhe das fases do ciclo urbano para configuração “Somente S-S” --	107
Figura 41 – Ciclo urbano representativo para configuração de “Somente alternador inteligente” -----	111
Figura 42 – Ciclo estrada representativo para configuração de “Somente alternador inteligente” -----	111
Figura 43 – Detalhamento dos acoplamentos e desacoplamentos elétricos para configurações com “alternador inteligente” -----	112
Figura 44 - Ciclo urbano representativo para configuração de “ADE + S-S” -----	114
Figura 45 - Ciclo estrada representativo para configuração de “ADE + S-S” -----	114
Figura 46 - Detalhe das fases do ciclo urbano para configuração “ADE + S-S” ----	115
Figura 47 – Detalhamento dos acoplamentos e desacoplamentos eletromecânicos para configurações com ADE -----	118
Figura 48 - Tensão do alternador em configuração “inteligente” -----	124

Figura 49 - Tensão do alternador em configuração ADE -----	124
Figura 50 – Variação dos estados de carga da bateria para as configurações estudadas -----	127
Figura 51 – Consumo energético resultante das fases do ciclo urbano (MJ/km) por configurações de testes -----	132
Figura 52 – Reduções percentuais do consumo energético para fases do ciclo urbano por configurações de testes -----	133
Figura 53 – Consumo energético para ciclo estrada (MJ/km) por configurações de testes -----	134
Figura 54 - Consumo energético combinado (MJ/km) por configurações de testes	135
Figura 55 - Reduções percentuais resultantes do consumo energético para ciclos em separado e combinado por configurações de testes -----	136
Figura 56 - Reduções percentuais de emissão de CO ₂ por fases do ciclo urbano por configurações de testes -----	140
Figura 57 - Reduções percentuais resultantes de emissão de CO ₂ para ciclo urbano e estrada por configurações de testes -----	141

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tecnologias implementadas em veículos automotores leves no Brasil por fase do Proconve -----	26
Tabela 2 – Limites de emissões veiculares Fases L-7 e L-8 do PROCONVE -----	27
Tabela 3 – Limites de Emissões Corporativos em g/km - Fase L-8 PROCONVE----	27
Tabela 4 – Metas energéticas do INOVAR-AUTO -----	28
Tabela 5 – Relação A/F estequiométrica para diferentes tipos de combustível -----	36
Tabela 6 – Exemplos de consumidores elétricos automotivos e respectivas demandas de potências (W) e correntes (A) -----	40
Tabela 7 - Propriedades da gasolina E22-----	61
Tabela 8 – Tecnologias que promovem a redução da emissão de dióxido de carbono (CO ₂)-----	65
Tabela 9 – Resultados de aplicações de tecnologias energéticas em ciclos urbanos-----	74
Tabela 10 - Resultados de emissões e consumo por variação de combustível e configurações (FTP-75)-----	81
Tabela 11 – Especificações do motor a combustão interna utilizado nos testes -----	85
Tabela 12 – Especificações do alternador e embreagem eletromagnética -----	88
Tabela 13 – Características técnicas do dinamômetro de chassi do Laboratório de Emissões-----	95
Tabela 14 – Características das configurações de tecnologias adotadas para os testes experimentais -----	97
Tabela 15 – Parâmetros energéticos da Gasolina E22-----	102
Tabela 16 – Tempos de acoplamentos/desacoplamentos do alternador ciclando e tempos de desligamentos do motor pelo sistema Stop-Start no ciclo urbano -----	119
Tabela 17 - Tempos de acoplamentos/desacoplamentos do alternador ciclando e tempos de desligamentos do motor pelo sistema Stop-Start no ciclo estrada -----	120
Tabela 18 - Variação do estado de carga da bateria no ciclo urbano e estrada ----	126
Tabela 19 – Resultados de consumo energético combinado [MJ/km] por configuração de teste e respectivos parâmetros de análise de incertezas -----	159

LISTA DE SÍMBOLOS

ADE	Alternador com Desacoplamento Eletromecânico;
E22	Combustível gasolina comum misturada em volume com 22% de etanol anidro;
E100	Combustível Etanol Hidratado;
R_v	Resistência dos consumidores elétricos automotivos [Ω];
R_i	Resistência interna da bateria [Ω];
I_e	Corrente de descarga da bateria [A];
U_k	Tensão nos bornes da bateria [V];
U_i	Queda de tensão pela resistência interna da bateria [V];
U_0	Tensão do circuito aberto da bateria [V];
Φ	Fluxo magnético [Tm^2];
\vec{B}	Vetor que representa o campo magnético [T];
A	Área da superfície do condutor [m^2];
α	Ângulo formado pela normal da superfície do condutor e as linhas de força do campo magnético [$^\circ$];
ξ_i	Força eletromotriz induzida [V];
$\Delta\Phi$	Diferença de fluxo magnético [Tm^2];
Δt	Diferença de tempo [s];
N_e	Número de espiras;
ω	Velocidade angular de rotação [rad/s];
P_1	Potência absorvida pelo alternador [kW];
P_2	Potência liberada pelo alternador [kW];
V_{mec}	Perdas mecânicas devido ao atrito do ar e mancal do alternador [kW];
$V_{CuEstat}$	Perdas de cobre no estator [kW];
$V_{Fe+adic}$	Perdas de ferro e adicionais [kW];
V_{Diodos}	Perdas dos diodos retificadores [kW];
$V_{CuCampo}$	Perdas de excitação de campo eletromagnético [kW];
I_L	Corrente de saída do alternador em marcha lenta do motor [A];
I_G	Corrente de saída do alternador [A];
I_v	Corrente demandada pelos consumidores elétricos automotivos [A];
$I_{Gnominal}$	Corrente elétrica nominal do alternador [A];
A/F	Relação Ar/Combustível da mistura;

λ	Fator lambda. Representa a relação entre a relação ar/combustível real e a relação ar/combustível estequiométrica;
ΔE_{acum}	Energia acumulada em um volume de controle [J];
E_{ger}	Energia gerada em um volume de controle [J];
E_{ent}	Energia que entra em um volume de controle [J];
E_{sai}	Energia que sai de um volume de controle [J];
$E_{a/f}$	Energia proveniente do combustível para determinado A/F;
$Q_{exhaust}$	Energia dissipada pelos gases de exaustão [J];
H_{ci}	Entalpia dos gases de exaustão por combustão incompleta [J];
Q_{arref}	Energia liberada pelo sistema de arrefecimento [J];
$Q_{conv+rad}$	Calor liberado por convecção e radiação [J];
Q_{fric}	Energia mecânica dissipada por atrito de fricção [J];
W_{util}	Energia mecânica útil [J];
A	Acoplamento;
D	Desacoplamento;
n	Frequência do motor [rpm];
V	Velocidade do veículo [km/h];
Y_{MP}	Emissão ponderada de cada componente do gás emitido [THC, CH ₄ , NMHC, CO, CO ₂] [g/km];
Y_1	Emissão em massa de cada componente do gás emitido na 1ª fase [g];
Y_2	Emissão em massa de cada componente do gás emitido na 2ª fase [g];
Y_3	Emissão em massa de cada componente do gás emitido na 3ª fase [g];
D_1	Distância percorrida pelo veículo na 1ª fase [km];
D_2	Distância percorrida pelo veículo na 2ª fase [km];
D_3	Distância percorrida pelo veículo na 3ª fase [km];
C	Consumo de combustível [l/100 km];
m_{THC}	Massa de THC emitida [g/km];
m_{CO}	Massa de CO emitida [g/km];
m_{CO_2}	Massa de CO ₂ emitida [g/km];
$\%V_{gas}$	Porcentagem de gasolina no combustível utilizado em volume a 20°C;
$\%V_{ETOH}$	Porcentagem de etanol no combustível utilizado em volume a 20°C;
$\%V_{H_2O}$	Porcentagem de água no combustível utilizado em volume a 20°C;
C_1	Consumo de combustível na 1ª fase [l/100 km];

C_2	Consumo de combustível na 2ª fase [l/100 km];
C_3 ,	Consumo de combustível na 3ª fase [l/100 km];
A	Autonomia [km/l];
C	Consumo de combustível [l/km];
A_{comb}	Autonomia combinada de combustível [km/l];
A_{urb}	Autonomia urbana de combustível [km/l];
A_{est}	Autonomia rodoviária de combustível [km/l];
S-S	Sistema <i>Stop-Start</i> ;
N	Número total de amostras;
x_i	Cada número discreto do conjunto de dados;
σ^2	Variância;
σ	Desvio padrão;
U_y	Incerteza expandida;
u_x	Repetitividade padrão;
K	Fator de t-Student;
C_{x_i}	Consumo energético combinado para ensaio “i” de configuração “x” de testes [MJ/km];
$\overline{C_x}$	Média aritmética para o consumo energético combinado da configuração “x” de teste.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	Justificativa	17
1.2	Objetivos	19
1.3	Estrutura do trabalho	21
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
2.1	Legislação climática mundial e no Brasil	22
2.1.1	Programa de Controle da Poluição do Ar para Veículos Automotores - PROCONVE	24
2.1.2	Programa de Incentivo à Inovação Tecnológica e Adensamento da Cadeia Produtiva de Veículos Automotores - INOVAR-AUTO	27
2.1.3	ROTA 2030	29
2.2	Motores a combustão interna	30
2.3	Sistema de controle do motor	33
2.4	Controle e formação da mistura Ar/Combustível	35
2.4.1	Tempo de Injeção	36
2.5	Sistema elétrico automotivo	37
2.6	Consumidores elétricos automotivos	39
2.6.1	Consumidores elétricos contínuos	41
2.6.2	Consumidores elétricos de longa duração	41
2.6.3	Consumidores elétricos de curta duração	41
2.7	Baterias automotivas	42
2.7.1	Processo de descarga da bateria	44
2.7.2	Processo de carga da bateria	45
2.7.3	Sensor Inteligente da Bateria – IBS	46
2.8	Alternadores	47
2.8.1	Princípio físico de funcionamento do alternador	48
2.8.2	Componentes principais do alternador	50
2.8.3	Parâmetros influentes na operação do alternador	52
2.8.4	Eficiência do alternador	53
2.9	Tecnologia Stop-Start	55
2.10	Combustíveis brasileiros	59

2.10.1	Gasolina.....	60
2.10.2	Reação de combustão.....	61
2.11	Balço energético do veículo.....	62
2.12	Sistema de embreagem eletromagnética.....	66
2.13	Estado da Arte.....	67
3	METODOLOGIA.....	84
3.1	Aparato experimental.....	84
3.1.1	Características do veículo de teste utilizado.....	84
3.1.2	Alternador com desacoplamento eletromecânico (ADE) por embreagem eletromagnética.....	85
3.1.3	IBS e bateria veicular.....	90
3.1.4	Sistema de controle do ADE protótipo e coleta de dados.....	90
3.1.5	Aparato para os testes de emissões e consumo de combustível.....	94
3.2	Procedimentos experimentais.....	97
3.2.1	Configurações dos testes experimentais.....	97
3.2.2	Ciclos de emissões urbano e estrada.....	98
3.2.3	Determinação das emissões no ciclo urbano e estrada.....	99
3.2.4	Cálculo do consumo de combustível pelo método de balanço de carbono.....	100
3.2.5	Cálculo do consumo energético.....	102
3.3	Método adotado para tratamento dos dados (ferramenta “box plot”).....	103
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	105
4.1	Estratégia de funcionamento do sistema Stop-Start.....	105
4.2	Estratégia de funcionamento do alternador inteligente (acoplamentos e desacoplamentos elétricos).....	110
4.3	Estratégia de funcionamento do ADE protótipo com embreagem eletromagnética operando de forma “cíclica” (acoplamentos e desacoplamentos eletromecânicos).....	113
4.4	Análise comparativa da tensão do alternador em configuração inteligente e com embreagem eletromagnética (ADE).....	123
4.5	Análise comparativa do estado de carga da bateria.....	125
4.6	Análise comparativa do consumo de combustível (consumo energético).....	131
4.7	Análise comparativa dos níveis de emissões de CO₂.....	139
5	CONCLUSÕES.....	143

5.1 Sugestões para trabalhos futuros	145
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	146
APÊNDICE A – ANÁLISE DE INCERTEZAS DAS MEDIÇÕES.....	155
ANEXO A – PROCESSO DE PATENTE INPI N° BR102015001454-6.....	160

1 INTRODUÇÃO

1.1 Justificativa

O cenário global é marcado pelo envolvimento da sociedade contemporânea em questões climáticas, principalmente pelas respectivas consequências do processo de aquecimento global. O descontrole deste processo é caracterizado pelo efeito estufa artificial, impulsionado por altos índices de gases estufa como o dióxido de carbono (CO₂) nas camadas da atmosfera. Diante disso, tem-se o aumento em excesso da temperatura média global nas últimas décadas, contribuindo para a aceleração de mudanças climáticas no planeta Terra e também ativamente em fenômenos naturais catastróficos.

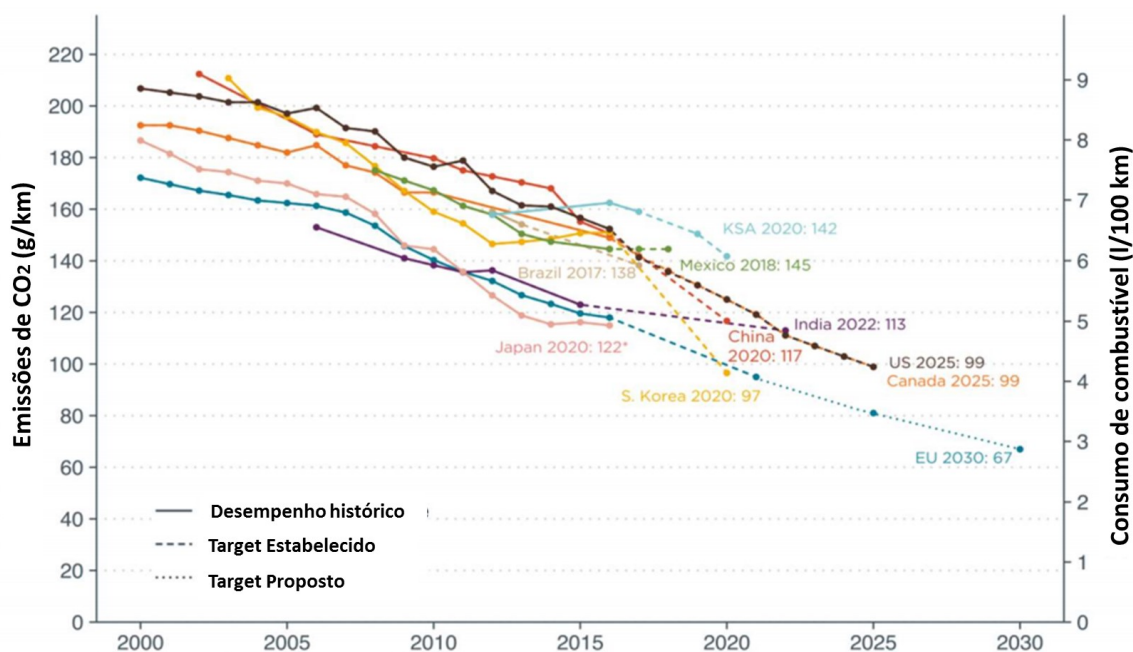
Ao longo de sua existência a Terra vem passando por alterações climáticas oriundas de ciclos de refrigeração e aquecimento global por causas naturais como massivas erupções vulcânicas e mudanças de sua órbita. Entretanto, a ação antropogênica tem sido principal causa para o desequilíbrio deste cenário, impulsionando o processo de aquecimento do planeta Terra, a partir do aumento do nível de emissão de gases estufa (gás carbônico, óxido de nitrogênio, metano e hidrocarbonetos em geral), iniciada nos primórdios da Revolução Industrial no século XVIII. De forma a mitigar os efeitos do aquecimento global, foi determinado pelo Acordo de Paris (2015) que os países devem limitar o aquecimento global em 1,5 °C a 2,0 °C. A diferença de “somente” 0,5°C mostra-se significativa, visto que pode representar um cenário exponencialmente mais impactante ao planeta. Por exemplo, com um aquecimento de 1,5° C é possível que se tenha um verão completamente sem gelo na superfície do mar uma vez a cada cem anos, enquanto que com aumento de 2,0 °C, essa frequência aumenta para uma vez por década, ocasionando diretamente impactos maiores em todos os ecossistemas que compõem a biosfera terrestre. (IPCC, 2018).

Segundo Yang *et al.* (2018), o setor de transporte é o principal fator para a emissão de gases estufa dentre as ações antropogênicas causadoras do desequilíbrio ambiental e consequente aquecimento global, correspondendo a 23% do total em energia relacionada à emissão de CO₂. Dentro dessa parcela, o transporte rodoviário corresponde à 74% do total das emissões de gás carbônico contabilizadas para o setor de transporte. Além disso, dentro de uma média global desse último número,

cerca de 54% das emissões de CO₂ são originárias de veículos leves automotores (principalmente do tipo de transporte de passageiro) e 46% por caminhões pesados. Dessa forma, justifica-se a vital necessidade de abordagem e incremento da eficiência energética desta parcela principal causadora de emissões antropogênicas de gases estufa com o intuito de mitigação do efeito estufa artificial para reversão do cenário climático mundial atual.

De acordo com o ICCT (2017), desenvolveu-se uma metodologia para conversão dos resultados das medições em gramas por quilômetro de CO₂ obtidos nos ciclos padrões adotados para os países membros do G20 para gramas por quilômetro de CO₂ equivalente no ciclo padrão europeu NEDC. O principal intuito é o de comparação entre as maiores potências econômicas do mundo (19 países mais a União Europeia) dos seus resultados históricos de emissões de gás carbônico por veículos de transporte de passageiros e comerciais leves, além dos respectivos limites legislativos de emissões definidos e adotados para cada membro do grupo. Tal evolução ao longo do tempo é ilustrada no gráfico da Figura 1.

Figura 1 - Evolução dos limites de emissões por veículos automotores para os países do G20, em gramas por km de CO₂



Fonte: Adaptado de ICCT, 2017

Diante desse panorama mundial apresentado, expressivos esforços têm sido feitos para novos desenvolvimentos científicos e tecnológicos, almejando a mitigação

das causas do efeito estufa artificial. Para isso, as promoções de melhorias na eficiência energética de componentes em seus diversos campos de atuação fazem-se necessárias. A indústria automobilística e da mobilidade têm sido destaque nessa linha, perseguindo a sustentabilidade, competitividade, atendimento de metas e legislações junto a ganhos energéticos e, conseqüentemente, a lucratividade.

Com isso, este trabalho científico se justifica visto que a partir de um inédito alternador com melhorias em sua estratégia e dispositivo de acoplamento e desacoplamento eletromecânico do eixo do motor a combustão interna (SALES, 2015; SALES, 2019), se espera o atingimento de melhorias na eficiência energética automotiva pela utilização desse componente. Essa expectativa se deve pelo fato de que o alternador é um dos principais componentes do sistema elétrico dos automóveis, produzindo energia elétrica a partir da absorção de energia mecânica do eixo do motor, influenciando, portanto, no consumo de combustível do veículo. Diante disso, o seu dispositivo de controle estratégico de acoplamento e desacoplamento do eixo do motor contribui para a redução do consumo de combustível e mitigação de emissões de CO₂.

1.2 Objetivos

Este trabalho tem como principal objetivo a análise experimental de um veículo *flex* com motor a combustão interna com tecnologia Stop-Start e um alternador equipado com um sistema para desacoplamento mecânico e elétrico completo do eixo do motor (identificado neste trabalho pela sigla ADE – Alternador com Desacoplamento Eletromecânico). Tem-se como resultados esperados a determinação da influência da utilização dessas tecnologias no incremento da eficiência energética do motor do veículo em estudo a partir de testes realizados em um laboratório de emissões e consumo de combustível. Em suma, objetiva-se apresentar os reflexos no consumo de combustível e na emissão de gás dióxido de carbono deste veículo a partir da melhoria da estratégia do sistema de geração de energia elétrica do alternador aplicado (junto a sua operação de acoplamento/desacoplamento por embreagem eletromagnética acoplada à sua polia), alternador inteligente (com acoplamento/desacoplamento somente elétricos), além de aplicação do sistema Stop-Start, que promove o desligamento do motor em condições

de marcha lenta e repartida automática quando se tem a intenção de retomar o movimento do veículo.

Este trabalho têm os seguintes objetivos específicos:

- a) Determinar e programar a estratégia de funcionamento e controle do alternador com desacoplamento eletromecânico (ADE), segundo parâmetros como velocidade do veículo, rotação do motor a combustão interna, porcentagem de acionamento do pedal acelerador e estado de carga da bateria.
- b) Determinar, utilizando as normas ABNT NBR 6601 (2012) e ABNT NBR 7024 (2017), as diferenças percentuais do consumo de combustível e dos níveis de emissões de CO₂ para análise comparativa entre configurações em separado ou aliando os seguintes sistemas e tecnologias: alternador convencional, alternador inteligente, alternador protótipo dotado com sistema de desacoplamento elétrico e mecânico, além de sistema Stop-Start para desligamento automático do motor a combustão interna.
- c) Comparar a operação do alternador em foco deste trabalho nas diferentes configurações de teste em estudo, além de parâmetros de funcionamento do veículo e do seu motor a combustão interna.
- d) Comparar os resultados de consumo de combustível obtidos entre a aplicação das tecnologias, de forma a determinar se a junção de dois sistemas diferentes ocasiona diretamente em uma redução de consumo energético resultante diretamente da soma exata das reduções obtidas por cada um desses de forma isolada.
- e) Classificar as tecnologias estudadas a partir de suas configurações experimentadas com maior ou menor efetividade/contribuição para o incremento da eficiência energética do veículo testado, a partir dos resultados de consumo energético e emissões de CO₂.
- f) Comparar e analisar os resultados obtidos de emissão de CO₂ e consumo energético das tecnologias aplicadas neste trabalho com resultados de publicações anteriores referentes ao tópico de eficiência energética automotiva.
- g) Determinar e analisar possíveis influências das estratégias de operação das tecnologias estudadas no balanço elétrico do veículo de teste, a partir de parâmetros como estado de carga da bateria, tensão e corrente do seu sistema elétrico.

1.3 Estrutura do trabalho

Durante a realização deste trabalho, os diversos assuntos abordados foram subdivididos de acordo com a seguinte forma:

Capítulo 2 - Revisão Bibliográfica: De acordo com estudos e pesquisas prévias de autores, apresentam-se neste capítulo, em forma detalhada, conceitos e tópicos necessários para a compreensão e o entendimento desta dissertação, além da apresentação do estado da arte sobre o tema abordado.

Capítulo 3 – Metodologia: Os métodos, instrumentos e recursos utilizados para a realização dos testes experimentais do trabalho são apresentados;

Capítulo 4 - Resultados e Discussões: Neste capítulo são apresentadas as análises dos resultados obtidos e as descrições de ocorrências e justificativas dos fatos observados neste trabalho.

Capítulo 5 – Conclusão: Um fechamento deste trabalho é apresentado, junto aos fatos observados durante a sua realização, aprendizados e respectivas sugestões do autor para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os centros de pesquisa e engenharias das montadoras dos veículos se orientam atualmente na relação da eficiência energética automotiva e respectivos sistemas veiculares com a preservação do meio ambiente e utilização das fontes de energia disponíveis. Diante disso, os sistemas automotivos são exaustivamente avaliados com o intuito de aumentar a eficiência energética, reduzir as emissões de gases nocivos e de dióxido de carbono e, conseqüentemente, o consumo de combustível. Com isso, serão apresentados e comentados neste capítulo no tópico de “estado da arte” os principais trabalhos científicos relacionados ao alternador e sistema Stop –Start. Além disso, também serão apresentados os principais conceitos e referenciais teóricos do motor a combustão interna e seu sistema de controle, sistema elétrico automotivo, balanço de energia, com adição de abordagem sobre combustíveis brasileiros, combustão, emissão de dióxido de carbono e consumo energético do veículo. Os tópicos deste capítulo foram preparados para servir de base para a realização deste trabalho e são fundamentais para o seu entendimento.

2.1 Legislação climática mundial e no Brasil

A indústria automotiva e sua respectiva cadeia produtiva estão constantemente pesquisando e desenvolvendo novas formas para aumento da eficiência energética dos seus modelos de veículos automotores. Isso é impulsionado por fatores como a competitividade na indústria e principalmente pelo estabelecimento de legislações ambientais limitantes de emissões de gases poluentes e estufa. Assim, com a relação direta entre o consumo de combustível dos veículos e as emissões dos gases estufa (principalmente o CO₂), historicamente há variadas legislações já estabelecidas mundialmente e conseqüentemente refletidas localmente.

Um dos principais marcos na história mundial relacionada às mudanças climáticas globais foi estabelecido pelo Protocolo de Kyoto. Elaborado em 1997, somente entrou em vigor em 16 de fevereiro de 2005, após ratificação de 55% dos países-membros da Convenção e que também fossem responsáveis por 55% no total de emissões em 1990. Esse tratado é caracterizado como um complemento à Conferência-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança de Clima, a qual definiu metas de redução de emissões de gases estufa e poluentes aos países desenvolvidos

e os que estavam em processo de transição para o capitalismo naquela época, considerado como o principal sistema econômico promotor do aquecimento global. (MMA, 2016)

No Brasil o documento do Protocolo foi ratificado a partir do decreto Legislativo nº 144 (2002) e aprovado em 23 de agosto de 2002. (BRASIL, 2019)

Almer e Winkler (2017) expuseram que a principal meta imposta pelo Protocolo de Kyoto foi a de redução em 5,2% no período de 2008 a 2012 nas emissões de seis gases causadores do efeito estufa, com base no ano de 1990. Os gases em escopo são os seguintes: o gás carbônico (CO₂), metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O) e gases com flúor (HFC, PFC e SF₆).

Em 1992 durante a Cúpula da Terra do Rio de Janeiro foi estabelecida a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC, sigla em inglês), entrando em vigor posteriormente em 21 de março de 1994, após a ratificação de 196 Estados na época, os quais constituem as “Partes” da Convenção. Essa, portanto, é caracterizada como uma “convenção universal de princípios” a qual a ação antropogênica é reconhecidamente a maior contribuição para as mudanças climáticas e que conseqüentemente os países com alta industrialização têm como grande papel em combatê-las (ONU, 2015; KUYPER, 2019).

Essa Convenção tem um importante papel na estabilização das concentrações de gases estufa, de forma que ações do homem que ameacem os ecossistemas em relação ao clima sejam evitadas. Entretanto, as emissões também devem ser compatíveis com o desenvolvimento econômico e as necessidades que sejam próprias dos países, principalmente emergentes, obtendo-se um equilíbrio de acordo com o cenário local. Segundo o Ministério do Meio Ambiente - MMA (2017) o Brasil foi o pioneiro na adesão e assinatura da Convenção, que passou a ser válida 90 dias depois de sua aprovação e ratificação pelo Congresso Nacional em 29 de maio de 1994.

Tem-se, ainda, o órgão de Conferência das Partes (COP), decisório da Convenção e aliado à UNFCCC. Anualmente, os Estados Partes se reúnem em sessões globais para tomada de decisões sobre o cumprimento de metas combatentes às mudanças climáticas, as quais devem ser unânimes ou consensuais entre todos os 195 Estados (ONU, 2015). Considerada como um marco histórico, em 2015 a 21ª Conferência das Partes (COP 21) ficou destacada pelo consenso entre os Estados para a adoção de um novo acordo global, intitulado como “Acordo de Paris”,

entrando em vigor a partir de 2020. Segundo o Acordo de Paris (2015), determinou-se principalmente como objetivo que se deve manter o aquecimento global restrito a temperaturas abaixo de 2,0 °C até o ano de 2100, com realização de esforços para limitar o aumento de temperatura a 1,5 °C. Além disso, está previsto por este acordo que os países desenvolvidos devem investir 100 bilhões de dólares ao ano para fins de combate às mudanças climáticas e adaptações necessárias dos países em desenvolvimento.

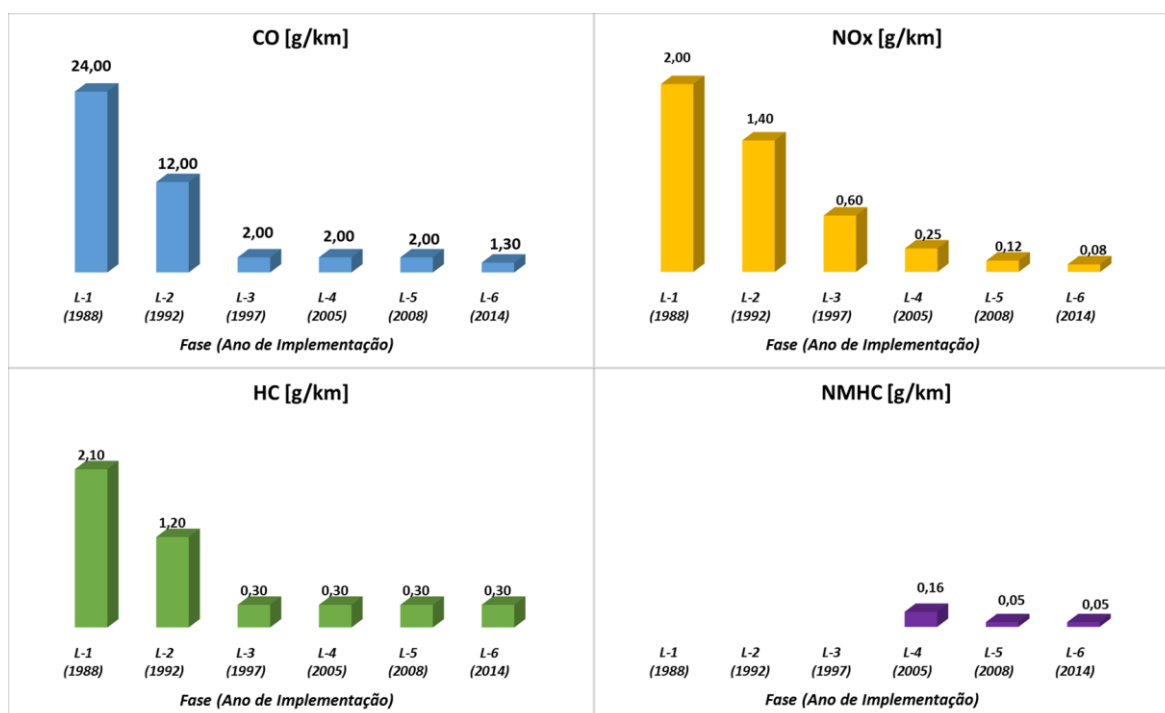
Segundo a “*Intended Nationally Determined Contribution*” - INDC para consecução do objetivo da Convenção Quadro da ONU sobre mudanças climáticas o Brasil comprometeu-se a reduzir em 37% as emissões de gases estufas até 2025 e em 43% até 2030, em comparativo às emissões constatadas no ano de 2005. Para atingimento deste objetivo, um aumento de 18% na parcela de bioenergia sustentável e participação de 45% de energias renováveis em sua matriz energética até o ano de 2030 seriam promovidos, além do reflorestamento de 12 milhões de hectares florestais (INDC, 2015).

2.1.1 Programa de Controle da Poluição do Ar para Veículos Automotores - PROCONVE

No Brasil, um dos principais marcos legislatórios ambientais se iniciou em 1986 a partir do estabelecimento do “Programa de Controle da Poluição do Ar para Veículos Automotores” - PROCONVE pela resolução CONAMA nº 18. Esta resolução estabeleceu diretrizes, prazos e limites legais de emissões para cada categoria de veículo, determinando um cronograma de redução gradual das emissões de gases poluentes. Para veículos leves, o programa estabeleceu etapas para o controle de diferentes gases, tanto da exaustão como das emissões evaporativas (JÚNIOR e SOUZA, 2018).

A Figura 2 apresenta os limites de emissões estabelecidos pelo PROCONVE da fase L-1 a fase L-6.

Figura 2 – Limites de emissões para veículos leves e comerciais – PROCONVE (L-1 a L-6)



Fonte: Adaptado de MMA, 2019 e Figueiredo, 2019

A Tabela 1 apresenta as principais inovações tecnológicas introduzidas ao longo das fases consolidadas do PROCONVE para atendimento desses níveis de emissões para veículos automotores leves. Conforme descrito, diversos sistemas foram introduzidos ou melhorados, principalmente no motor a combustão interna e seus periféricos e subsistemas (como por exemplo, o sistema de injeção de combustível), para que as metas de emissões evaporativas fossem cumpridas de acordo com as fases do programa.

Tabela 1 – Tecnologias implementadas em veículos automotores leves no Brasil por fase do Proconve

<i>Fases</i>	<i>Ano de Implementação</i>	<i>Resolução CONAMA</i>	<i>Objetivo principal</i>	<i>Principais Tecnologias Implementadas</i>
L-1	1988	18 (1985)	Controle de emissões evaporativas e do cárter	Controle de emissões evaporativas e melhorias no tempo de ignição
L-2	1992	18 (1986)	Controle de emissões de exaustão	Carburador eletrônico, Injeção eletrônica de combustível e catalisador
L-3	1997	15 (1995)	Redução de CO	Injeção de combustível multiponto, catalisador de três vias e sensor de oxigênio (sonda lambda)
L-4	2005	315 (2002)	Redução HC e NOx	Injeção de combustível multiponto, catalisador de três vias, melhorias de injetores e câmaras de combustível e aumento da pressão de combustível
OBD Br - 1	2007	354 (2004)	Sistemas de diagnose a bordo	Monitoramento de sistemas de controle de emissões e avisos/luzes indicadores de mal funcionamento
L-5	2009	315 (2002)	Redução HC e NOx	Análogas à fase L-4
OBD Br - 2	2010	354 (2004)	Sistemas de diagnose a bordo	Segundo sensor de oxigênio (Sonda lambda pós-catalisador)
L-6	2014	415 (2009)	Redução de CO e NOx	Comando variável, "downsizing", injeção direta de combustível, sobrealimentação (motores turbos)

Fonte: Adaptado de Júnior e Souza, 2018

A partir da Resolução nº 492 do Conama, publicada em 20 de Dezembro de 2018, foram estabelecidas as novas fases de emissões L-7 e L-8 do PROCONVE. A fase L-7 será implementada em 1º de Janeiro de 2022 para todos os veículos e modelos novos, em que para os limites de emissões de escapamento passam a ser consideradas as emissões NMOG (gases orgânicos do tipo não-metano) ao invés de NMHC (gases hidrocarbonetos não metano). Além disso, o nível de material particulado para motores Otto com injeção direta passará a ser monitorado. A fase L-8 irá iniciar em 1º de Janeiro de 2025 e os veículos serão classificados de acordo com os níveis de emissões. Os limites de emissões veiculares das fases L-7 e L-8 do PROCONVE estão dispostos na Tabela 2.

Tabela 2 – Limites de emissões veiculares Fases L-7 e L-8 do PROCONVE

Fase	Categoria (Veículos Leves)		Limite Emissões [g/km]			
			NMOG + NOx	CO	MP	
L-7	<i>Passageiro</i>		0,080	1,000	0,006	
	<i>Comerciais</i>		0,140			
L-8	Categoria (Veículos Leves)		Nível			
	<i>Comerciais com massa de ensaio acima de 1700 kg</i>		140	0,140	1,000	0,006
			110	0,110		
	<i>Passageiros e Comerciais leves com massa de ensaio até 1700 kg</i>		80	0,080	1,000	0,006
			70	0,070	0,600	0,004
			60	0,060		
			50	0,050	0,500	0,004
			40	0,040		
			30	0,030	0,500	0,003
			20	0,020	0,400	0,002
0			Nula	Nula	Nula	

Fonte: Adaptado de CONAMA, 2018

A fase L-8 também tem como principal mudança a introdução do limite de emissões corporativas, determinado pela média ponderada por volumes de vendas de cada modelo. Tal limite corporativo possui meta decrescente a cada dois anos, conforme Tabela 3.

Tabela 3 – Limites de Emissões Corporativos em g/km - Fase L-8 PROCONVE

Veículos Leves Comerciais	Veículos Leves Passageiros	Data de Implantação
0,140	0,050	01/01/2025
0,110	0,050	01/01/2027
0,050	0,030	01/01/2029
0,030	0,030	01/01/2031

Fonte: Adaptado de CONAMA, 2018

2.1.2 Programa de Incentivo à Inovação Tecnológica e Adensamento da Cadeia Produtiva de Veículos Automotores - INOVAR-AUTO

Um dos principais programas para atendimento das metas estabelecidas no Brasil foi o “Programa de Incentivo à Inovação Tecnológica e Adensamento da Cadeia

Produtiva de Veículos Automotores” - INOVAR-AUTO, determinado pelo decreto nº 7819 de 3 de outubro de 2012, com duração até 2017. Foram estabelecidas medidas governamentais com o intuito de promover desenvolvimento tecnológico, proteção ao meio ambiente, competitividade, inovação, eficiência e qualidade dos veículos e peças automotivas. A Tabela 4 demonstra as metas energéticas do programa INOVAR-AUTO.

Tabela 4 – Metas energéticas do INOVAR-AUTO

METAS	Autonomia (km/l)		Consumo Energético (MJ/Km)	Incremento de Eficiência Energética (%)
	Gasolina Comum (E22)	Etanol (E100)		
Linha de Base para Cálculo (2011)	14,00	9,71	2,07	-
Meta para habilitação no Programa (2017)	15,93	11,04	1,82	12,08
Meta para redução de 1 ponto percentual no IPI - 2016 ou 2017	16,57	11,48	1,75	15,46
Meta para redução de 2 pontos percentuais no IPI - 2016 ou 2017	17,26	11,96	1,68	18,84

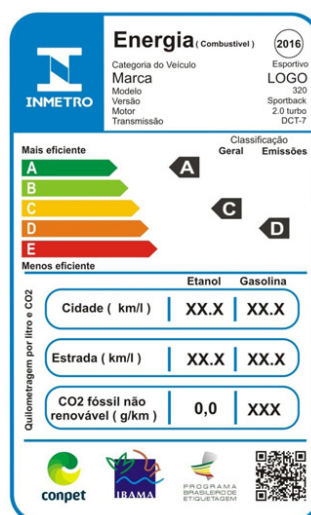
Fonte: Adaptado de MDIC, 2014

Para participação no INOVAR-AUTO, as montadoras tiveram que participar do Programa Brasileiro de Etiquetagem Veicular (PBEV), criado em 2008 em âmbito voluntário, estabelecido pelo Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO). O principal objetivo desse programa foi a etiquetagem de veículos com Etiqueta Nacional de Conservação de Energia (ENCE) que contém informações sobre o seu desempenho no que se refere à eficiência energética, incentivando a competitividade e auxiliando o consumidor final na escolha do produto que o melhor atender, além de promover maior conscientização quanto ao tema.

Conforme ilustrado pela Figura 3, a ENCE classifica o veículo quanto as suas emissões e consumo energético. De acordo com a combinação dessas duas classificações, uma terceira é fornecida, o classificando de forma geral. A classificação

do veículo é alfabética de A (mais eficientes) a E (menos eficientes), de acordo com sua categoria. Além disso, a etiqueta expõe dados numéricos de autonomia do veículo em ciclo urbano e rodoviário (quilometragem por litro de combustível) e emissão de gás carbônico não renovável (gramas por quilômetro rodado).

Figura 3 - Modelo de Etiqueta Nacional de Conservação de Energia (ENCE)



Fonte: INMETRO, 2015

Segundo levantamento do INMETRO (2016), 90% dos veículos que são participantes do PBEV passaram a possuir a etiqueta veicular no ano de 2016, ultrapassando a meta estabelecida previamente pelo decreto do INOVAR-AUTO de 64%.

2.1.3 ROTA 2030

A partir da Lei Federal 13.755/2018 o Governo Federal, em conjunto com o MDIC (Ministério da Indústria e Comércio), criou o programa ROTA 2030, dando continuidade ao programa INOVAR-AUTO. Com isso, houve a continuidade e estabelecimento de novos requisitos para comercialização de veículos automotores no país, além de incentivos fiscais para as indústrias automobilísticas. Com isso, há incentivo à inovação no setor, aumento da competitividade e incentivos para produção de veículos automotores globais no país.

Assim, conforme Decreto nº 9.557 de 8 de novembro de 2018, tem-se como principal requisito o atendimento obrigatório das novas metas mínimas para

incremento da eficiência energética de veículos com a possibilidade de redução do Imposto sobre Produto Industrializado (IPI) para aqueles modelos de veículos que atingirem valores de eficiência menores que as metas mínimas energéticas estabelecidas para a sua categoria.

As metas energéticas do INOVAR-AUTO seguem válidas até o ano de 2022. Em seguida, a partir do ano de 2023, novas reduções mínimas energéticas serão exigidas de acordo com a categoria de veículos: 11% para automóveis e comerciais leves; 4,9% para veículos “*off-road*” com tração nas 4 rodas (4x4) e SUVs (“*Sport Utility Vehicles*”) grandes com área superior a 8 m²; 8,6% para comerciais leves não derivados de automóveis para transporte de carga ou até 12 passageiros (KURTNEY, 2019).

Em adição, o ROTA 2030 estabelece um novo critério para incentivo dos veículos que sejam considerados como “Flex Eficiente”, determinado pelo valor mínimo de relação de 69,3% entre as eficiências de Etanol (E100) e Gasolina comum (E22). Concede-se, portanto, um percentual de redução adicional ao consumo energético do modelo do veículo (CE) a partir do cumprimento de uma relação dada por uma equação pré-determinada (Equação 1) pelo Decreto nº 9.557 de 8 de novembro de 2018.

$$Fator\ de\ Redução\ CE\ (\%) = \left[\frac{\frac{MJ}{km}\ de\ E22}{\frac{MJ}{km}\ de\ E100} - 1 \right] * 41,6 \quad (1)$$

Além disso, em relação a metas de segurança veicular, o programa antecipará a disponibilização de itens de segurança e tecnologias para assistência de condução automotivas estabelecidas na Resolução CONTRAN nº 717 de 30 de novembro de 2017. Dentre essas destacam-se, por exemplo, a obrigatoriedade do controle eletrônico de estabilidade (ESC), luz de rodagem diurna (DRL), aviso de frenagem de emergência (ESS), proteção de impacto lateral e aviso de não-afivelamento do cinto de segurança do motorista.

2.2 Motores a combustão interna

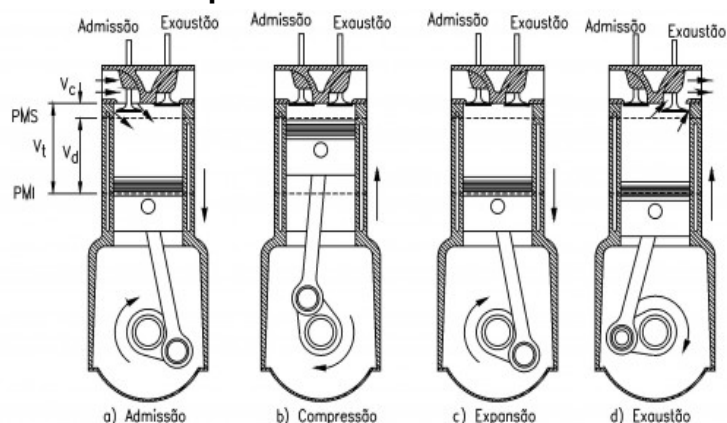
Segundo Heywood (1988), caracteristicamente os motores a combustão interna realizam o processo de liberação de energia pela oxidação ou queima do

combustível (combustão) no interior de um espaço interno pré-determinado (definido geralmente como câmara de combustão).

Em 1862 o primeiro motor de combustão interna de quatro tempos foi concebido pelo físico francês Alphonse Beau de Rochas. Posteriormente, em 1872, Nicolaus Otto (1832-1891) realizou a construção experimental de um motor com quatro cursos de operação do pistão com o principal intuito de superar as deficiências térmicas e baixo rendimento dos motores que foram construídos até aquele momento. (BRITANNICA ACADEMIC, 1998)

Os quatro tempos de operação são os respectivos, nesta ordem, e estão descritos com maiores detalhes na Figura 4. Pelo fato de que cada cilindro necessita de quatro tempos, completa-se um ciclo de potência após duas revoluções do eixo do motor.

Figura 4 – Quatro tempos de funcionamento do motor ciclo Otto



Fonte: Adaptado de Heywood, 1988

• **Admissão (a):** O curso de admissão é iniciado a partir do pistão no PMS (Ponto Morto Superior) e terminado com o pistão alcançando o PMI (Ponto Morto Inferior). A partir deste movimento, a mistura de ar e combustível é aspirada para dentro do cilindro, uma vez que a passagem ocasionada pela abertura da válvula de admissão. Com o intuito de aumentar a massa que é induzida para o interior do cilindro, a válvula de admissão tem sua abertura adiantada para antes do início deste curso, fechando-se em seguida.

• **Compressão (b):** O curso de compressão é obtido a partir do deslocamento do pistão do PMI para o PMS, com as válvulas de admissão e exaustão fechadas.

Com isso, a mistura presente no interior do pistão é comprimida até uma pequena fração de seu volume, gerando o aumento da pressão dentro do cilindro.

- **Expansão (c):** A expansão é iniciada quando o pistão se encontra no PMS, terminando com este no PMI. Esse estágio é desencadeado pela ação dos gases à alta temperatura e pressão que “empurram” o pistão, desencadeando seu movimento descendente e gerando movimento rotacional do eixo virabrequim.

- **Exaustão (d):** Devido à diferença de pressão dentro do cilindro em relação à pressão atmosférica os gases oriundos da combustão saem deste no momento de abertura da válvula de exaustão. Em adição a diferença de pressão, os gases também são “empurrados” e “escapam” do cilindro à medida que o pistão é deslocado em direção ao PMS (movimento ascendente). Posteriormente, a válvula de exaustão se fecha e um novo ciclo com os quatro estágios é iniciado.

Apesar de não ter sido aplicado em prática originalmente, Nicolaus Otto propôs um sistema na injeção que incorporasse estratificação de carga no motor. Ainda assim, em 1876, foi construído o protótipo de seu motor. Com isso, surgiu o motor a ciclo Otto. Devido ao seu alto rendimento, menor peso e volume em relação aos motores antecessores, quase 50.000 motores deste tipo foram vendidos na Europa e Estados Unidos até 1890. (HEYWOOD, 1988)

Heywood (1988) explica que Rudolf Diesel (1858-1913) descreveu em 1892, em sua patente, um novo funcionamento de motor a combustão interna caracterizado por iniciar a combustão apenas por compressão injetando combustível líquido com ar aquecidos. Entretanto, Diesel conseguiu desenvolver o seu protótipo de motor descrito em sua patente somente pós cinco anos. Foi observado que a eficiência deste motor era duas vezes maior comparando com outros motores a combustão interna precedentes. Além disso, constatou-se que esse motor operando segundo o ciclo Diesel abastecido com combustível de mesmo nome poderia trabalhar com taxas de compressão muito maiores (sem a ocorrência de detonação).

Os motores a ignição por centelha caracteristicamente têm o ar e o combustível misturados antes da admissão no cilindro por carburador ou sistema de injeção eletrônico. A combustão é realizada posteriormente a partir de centelha produzida por vela de ignição, sendo que a temperatura do ar é resultado da mistura do ar admitido

externo com o ar aquecido em contato com o coletor de exaustão. Conforme visto na Figura 4, o movimento rotativo da manivela é ocasionado pelo movimento linear ascendente e descendente do pistão conectado à biela.

Diante disso, os motores a Diesel com quatro tempos tem funcionamento similar aos motores Otto, mas diferem-se sumariamente pela admissão no primeiro estágio ser somente de ar. Logo, o ar no segundo estágio é comprimido, atingindo uma alta taxa de compressão (razão entre o volume máximo admitido e o volume mínimo no início da admissão) de 14:1 a 22:1, maior que as atingidas nos motores de ciclo Otto (devido à ausência de combustível). Injeta-se combustível vaporizado para o interior do cilindro no início do terceiro estágio nas condições de máxima compressão e temperatura do ar, resultando na ocorrência da combustão espontânea e expansão dos gases resultantes. Neste estágio, o ar deve ser aquecido a uma temperatura superior à temperatura na qual o combustível injetado pode inflamar. O combustível pulverizado no ar que tem uma temperatura mais alta que a temperatura de “autoignição” do combustível reage espontaneamente com o oxigênio no ar e queima. As temperaturas do ar são tipicamente superiores a 526 °C. Finalmente, no quarto e último estágio, expõem-se os produtos gasosos do cilindro. Em seguida, um novo ciclo se inicia com os quatro estágios descritos anteriormente. (BRITANNICA ACADEMIC, 2020)

Segundo Mialhe (1980), os principais componentes de um motor a combustão interna com ignição por centelha têm como função fornecer condições que sejam favoráveis para a realização eficiente e contínua do processo de transformação da energia química dos combustíveis em mecânica. Tilmann (2013) classifica e descreve os componentes de um motor à combustão interna em dois grupos. Os componentes fixos são o bloco, o cabeçote e o cárter, enquanto os componentes móveis são as válvulas e seu eixo de comando, pistão, anéis de segmento, biela e bronzinas, além do eixo do motor e volante.

2.3 Sistema de controle do motor

O controle do motor é baseado em uma central eletrônica, com o objetivo de gerenciar o seu funcionamento. Segundo Pujatti (2007), mesmo com as diversas configurações de sistemas de controle criadas ao longo dos anos, todos estes possuem a função em comum de responder à demanda de torque requisitada pelo

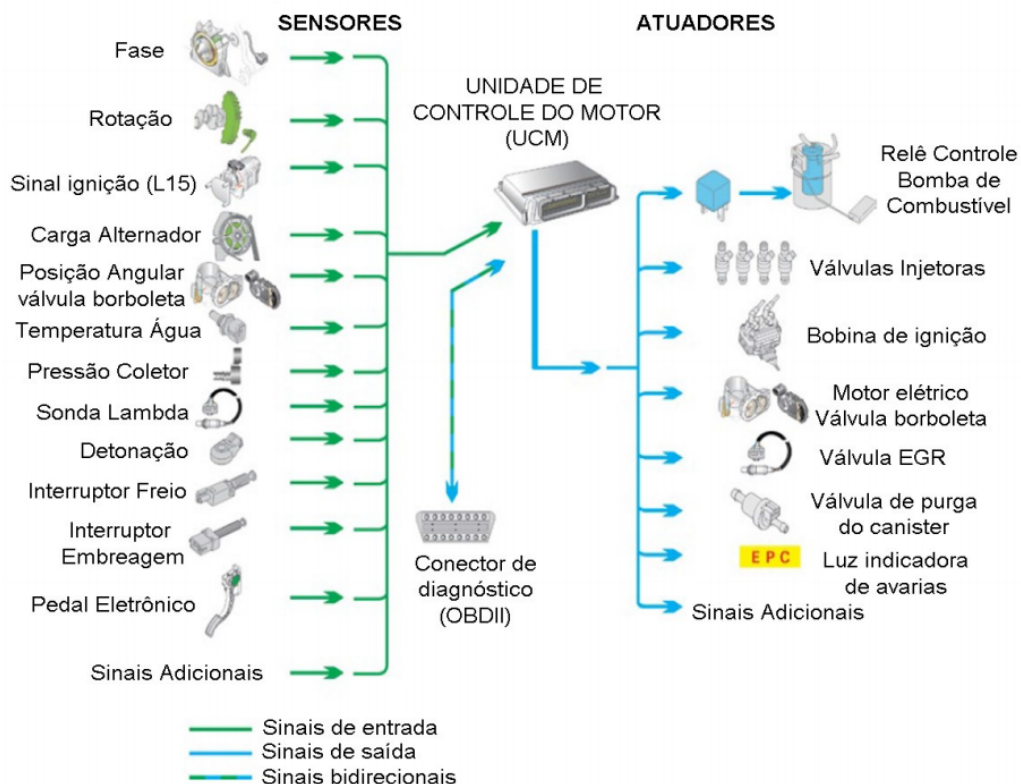
condutor para movimentação do veículo a partir da transformação da energia proveniente do combustível em energia cinética rotacional no eixo de manivelas (virabrequim).

A partir de subsistemas integrados, o gerenciamento do motor é realizado, de forma que os principais parâmetros controlados pelo sistema sejam os relacionados à injeção de combustível. A partir do controle destes parâmetros, a quantidade de combustível injetada a cada situação particular de operação do motor é otimizada, garantindo desempenho ideal, economia e emissões de poluentes dentro dos limites pré-determinados. Os diversos subsistemas controlados com os sinais de interesse do motor proporcionam maior suavidade na operação do motor, maior dirigibilidade, além do aumento de sua vida útil. (MILHOR, 2002)

O gerenciamento por esse sistema é realizado a partir de sensores em localidades de interesse que transmitem sinais elétricos para a unidade de controle eletrônico do motor (ECU). Em seguida, esta central eletrônica realiza o processamento desses sinais de acordo com calibrações pré-determinadas, enviando-os para atuadores que desempenham funções relacionadas ao motor, como os injetores de combustível, por exemplo. (ABREU, 2014)

A Figura 5 ilustra um sistema de controle do motor com exemplos de sensores e atuadores.

Figura 5 – Principais sensores e atuadores de um sistema de controle do motor



Fonte: Dias, 2015

2.4 Controle e formação da mistura Ar/Combustível

Pujatti (2007) explana que a quantidade de combustível introduzida no motor é relacionada diretamente com a quantidade de massa de ar admitida por esse. Dessa forma, o processo de admissão é caracterizado pela mistura ar/combustível que é bombeada para o interior dos cilindros. Quando a quantidade de Oxigênio (O_2) da massa de ar admitida é consumida completamente na combustão com a massa de combustível injetada, a mistura ar/combustível é considerada estequiométrica (ideal). Como resultado da combustão completa, obtêm-se como produtos o Dióxido de Carbono (CO_2), água (H_2O) e gases inertes.

Heywood (1988) explica que os gases inertes são provenientes dos outros elementos presentes no ar admitido, uma vez que esse é formado por 78,09% de Nitrogênio, 20,95% de Oxigênio, 0,93% de Argônio, além de traços de Hélio, Metano e demais.

A relação estequiométrica entre a massa de ar e de combustível é denominada como *Air/Fuel* - A/F (em tradução para a língua portuguesa, relação Ar/Combustível).

Essa relação é função do combustível utilizado e sua composição química, variando conforme pode ser visto na Tabela 5 (HEYWOOD, 1988).

Tabela 5 – Relação A/F estequiométrica para diferentes tipos de combustível

COMBUSTÍVEL	A/F_(s) [kg/kg]
Gasolina Pura (E0)	14,7:1
Etanol (E100)	9,0:1
Gasolina Comum (E22)	13,2:1
Diesel	15,2:1
Metanol	6,4:1
Metano (CH ₄)	17,2:1
Propano (C ₃ H ₈)	15,6:1
Butano (C ₄ H ₁₀)	15,4:1
Hidrogênio	34,0:1

Fonte: Pujatti, 2007 (apud Pereira, 2001)

O parâmetro mais utilizado, no entanto, é a relação entre o A/F real e o A/F estequiométrico, uma vez que há variação da mistura instantânea utilizada no motor (excesso de ar ou combustível) em relação à mistura estequiométrica. Esta relação é denominada como fator *lambda* (λ). Para λ igual ao valor unitário ($\lambda=1$), a mistura é estequiométrica. Para λ maior que o valor unitário ($\lambda>1$), a mistura possui excesso de ar, sendo caracterizada como “pobre”. Para λ menor que o valor unitário ($\lambda<1$), a mistura possui excesso de combustível, sendo denominada, portanto, como “rica”. (HEYWOOD, 1988)

O sistema de injeção, controlado pela UCE do motor, regula a quantidade de combustível injetada a partir do tempo de acionamento dos injetores (tempo de injeção), dependente de parâmetros como a massa de ar admitida, fator lambda, temperatura do ar, pressão nos cilindros, entre outros. (MILHOR, 2002)

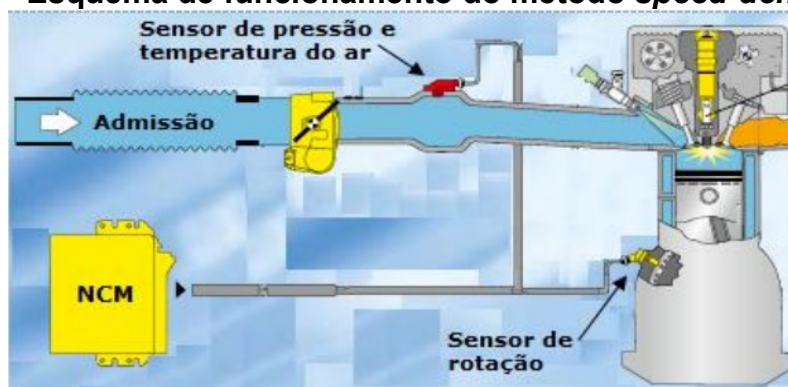
2.4.1 Tempo de Injeção

O tempo de injeção corresponde ao intervalo de tempo da quantidade de combustível injetada no cilindro a cada ciclo, de acordo com a condição de operação do motor, sendo presente em motores equipados com central de injeção eletrônica. Esse cálculo é estabelecido essencialmente pela massa de ar aspirada, objetivando mistura com fator lambda correspondente ao mapa da central. Logo, é primordial que

a estimativa da massa de ar seja bem determinada para eficiência do controle da mistura. Existem métodos diretos e indiretos utilizados pelas centrais eletrônicas na determinação do cálculo da massa de ar admitida. (ABREU, 2014)

Dentre os métodos existentes, a mais utilizada segundo Pujatti (2007) é a denominada como *speed-density*, em que o tempo de injeção é calculado de forma indireta, a partir do fluxo da massa de ar admitido. Este fluxo é determinado pela densidade do ar e rotação do motor, dados pelos sinais dos sensores de rotação e temperatura e pressão no coletor de admissão. O esquema, funcionamento e sensores utilizados neste método estão ilustrados na Figura 6.

Figura 6 – Esquema de funcionamento do método *speed-density*



Fonte: Abreu, 2014

Existem, entretanto, outros métodos para determinação da massa de ar admitida. O *speed-flow* é um método direto, em que a vazão de ar é determinada por medidor de fluxo, em que o seu valor é corrigido conforme variação da temperatura do ar admitido. O método *speed-mass* calcula o tempo de injeção diretamente por um sensor de massa de ar (debímetro). Em testes dinamométricos de bancada, o tempo de injeção pode ser determinado pelo método *speed-angle*, a partir do ângulo de abertura da borboleta de aceleração e rotação do motor. (ABREU, 2014)

2.5 Sistema elétrico automotivo

O sistema elétrico de um automóvel possui importância fundamental na definição de um modelo de automóvel, visto que influencia diretamente em seu posicionamento de mercado, conteúdo, classe e preço final ao consumidor. Apesar de possuir partes totalmente transparentes ao usuário final, possui grande importância

devido à sua contribuição na relação custo/benefício do produto final gerado, sendo que sua participação pode alcançar 20% do custo total de um veículo comum e até 23% em veículos de alta gama (“luxo”). O sistema elétrico, portanto, além de ser intrínseco ao funcionamento “normal” e operações regulares do veículo de assistência de condução e segurança ativa e passiva, também é responsável por grande parte do valor agregado desse a partir de sistemas complementares, como os sistemas de informação e entretenimento (“*Infotainment*”) com componentes como centrais multimídias, rádios digitais, sistemas de navegação e quadro de instrumentos; além de sistemas de conforto do usuário, como aquecimento/resfriamento de bancos e iluminação interna, por exemplo. A relevância do sistema elétrico também é comprovada pelo índice de inovações que o tangem: cerca de 80% das inovações automotivas são relacionadas ao sistema elétrico e eletrônica embarcada veicular. (DAL POGGETO, 2009)

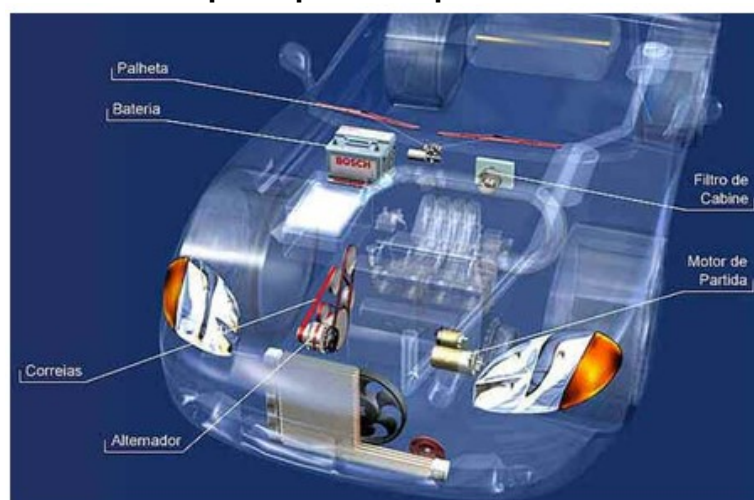
Segundo Bosch (2005), os principais componentes básicos de um típico sistema elétrico automotivo são um acumulador de energia (bateria veicular), um mecanismo gerador de energia (alternador), consumidores de energia (aparelhos eletroeletrônicos) e chicotes elétricos. Para realização da partida do motor a combustão interna do veículo desempenhada pelo motor de partida (consumidor de energia fundamental neste processo), há o auxílio da energia acumulada na bateria, além disso, há o controle dos parâmetros e exigências para seu funcionamento determinadas pela Unidade de Controle Eletrônico (ECU) do motor. Com o motor em funcionamento, o alternador desempenha a função de fornecer corrente para o sistema elétrico e seus componentes. Com base na rotação do alternador e dos consumidores ligados, a tensão de bordo é determinada, sendo suficiente para fornecer energia para alimentação dos consumidores e promover, ainda, o carregamento da bateria automotiva de acordo com a necessidade. Ou seja, caso os consumidores eletroeletrônicos demandarem em seu funcionamento corrente maior que a fornecida pelo alternador, a tensão de bordo diminui ao nível da tensão da bateria, promovendo o seu descarregamento. (BOSCH, 2005)

Ainda segundo Bosch (2005), o balanço de cargas do sistema elétrico deve ser feito de forma a sempre garantir uma partida do motor a combustão interna e funcionamento por período razoável dos consumidores elétricos do veículo com o motor desligado. Tal período é determinado pelo fabricante do veículo de forma a “proteger” o estado de carga da bateria e o seu nível de degradação, a partir do

dimensionamento do sistema elétrico, englobando o consumo elétrico completo dos componentes do veículo. Além disso, isso é garantido pela seleção específica da bateria, motor de partida, alternador e consumidores, sempre alinhado ao projeto do veículo.

A Figura 7 ilustra esquematicamente uma representação de um típico sistema elétrico automotivo com os seus principais componentes básicos, destacando a bateria, o alternador e alguns importantes consumidores de energia elétrica (motor de partida, limpador do para-brisa, faróis entre outros).

Figura 7 - Representação esquemática do sistema elétrico automotivo e seus principais componentes



Fonte: Portal São Francisco, 2016

2.6 Consumidores elétricos automotivos

Com o aumento da complexidade, evolução e emprego constante da tecnologia ao longo dos anos, o número de consumidores elétricos presentes nos automóveis vem crescendo consideravelmente junto ao expoente crescimento da eletrônica embarcada no veículo.

Uma das principais evidências do aumento de requisitos e complexidade tecnológica é o considerável incremento do número de centrais eletrônicas ligadas ao sistema elétrico do veículo com o intuito de desempenhar variadas funções e operações automotivas, sendo que há modelos de veículo que já possuem um número elevado destes consumidores eletrônicos, como centrais eletrônicas (ECUs) (por

exemplo, o veículo de modelo BMW Série 7 já possui um número elevado de 70 centrais eletrônicas). (AZUMA, 2014)

Outra evidência desta tendência tecnológica de incremento de eletrônica embarca ligado ao sistema elétrico do veículo é o aumento considerável do emprego de chicotes elétricos automotivos ao longo dos anos. Atualmente, esses podem chegar a pesar mais de 40 kg e possuir mais de 300 conectores, totalizando em mais de quatro quilômetros de comprimento em um carro de alto luxo. No ano de 1955, entretanto, os chicotes elétricos totalizavam em média apenas 45 metros. Esta evolução é direcionada também por novas regulamentações para economia de combustível, controle de emissões, segurança, dirigibilidade e conforto, além de novas solicitações de mercado e consumidores. (DAL POGGETO, 2009)

Dessa forma, a preocupação com o balanço de cargas do sistema elétrico do veículo é justificada, sempre com o intuito de garantir o funcionamento correto de todos os consumidores elétricos de acordo com a demanda de tempo de acionamento de cada um deles à projeto.

A Tabela 6 ilustra alguns exemplos de consumidores veiculares, além de dados de suas respectivas potências consumidas, em Watts (W), e demanda de corrente elétrica para funcionamento, em Amperes (A).

Tabela 6 – Exemplos de consumidores elétricos automotivos e respectivas demandas de potências (W) e correntes (A)

Carga	Potência (W)	Corrente (A)
Motor de Partida	1000-5000	200-1000
Faróis	100-200	10-20
Lâmpadas laterais	50	4
Lâmpadas de seta	50	4
Instrumentos	23-30	2
Farol de neblina	200	15
Limpadores de pára-brisas	100	8
Lavadores de pára-brisas	20	2
Vidros Elétricos	100-200	10-30
Banco Elétrico	100-200	10-30
Aquecedor	20-100	2-10
Ar Condicionado	500-1000	40-80
Buzinas	200	15
Rádio	20-100	2-10
Desembaçador traseiro	180	15
Desembaçador dianteiro	500	40
Controles do Motor	12-60	1-5
Injetores de combustível	200	15

Fonte: Lourenço, 2010

Os consumidores elétricos podem ser classificados em três tipos: contínuos, de longa e curta duração. (BOSCH, 2005)

2.6.1 Consumidores elétricos contínuos

Os consumidores elétricos contínuos se caracterizam por não poderem deixar de receber corrente elétrica do alternador ou bateria, uma vez que estão relacionados diretamente ao funcionamento do motor e sistemas essenciais do veículo. Os sistemas de injeção de combustível e ignição enquadram-se nessa classificação, portanto, uma vez que caso não sejam alimentados continuamente por corrente elétrica, deixam de funcionar, impedindo o funcionamento do motor a combustão interna. Além disso, se encaixam nessa descrição as centrais eletrônicas relacionadas à segurança passiva e ativa do veículo como a de controle dos “*airbags*”, controle eletrônico de estabilidade, freios ABS, entre outras.

2.6.2 Consumidores elétricos de longa duração

Os consumidores elétricos de longa duração são os componentes que necessitam de alimentação elétrica por longos períodos de tempo, ou seja, possuem grandes tempos de acionamento. Ainda assim, podem possuir potências elétricas elevadas ou mesmo pequenas. Exemplos típicos de consumidores elétricos de longa duração são aqueles relacionados ao sistema de iluminação (faróis, luz de placa, luzes de controle e instrumentos), sistema de climatização (compressor de ar condicionado), desembaçadores de vidros, arrefecimento (eletroventilador do radiador) e sistemas de *Infotainment*, como centrais multimídias ou rádios digitais e seus dispositivos auxiliares, como antenas e alto-falantes.

2.6.3 Consumidores elétricos de curta duração

Os consumidores elétricos de curta duração demandam alimentação por corrente elétrica por menores períodos de tempo, ou seja, possuem curtos períodos de tempo de acionamento. Com isso, impactam menos no consumo elétrico e balanço de cargas por permanecerem ativados por menos tempo em relação aos demais, mesmo no caso de possuírem altas potências elétricas. Destacam-se como exemplos

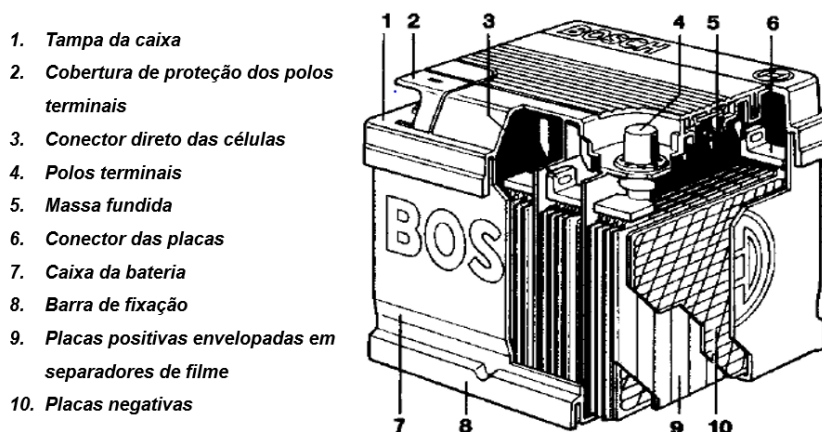
desses componentes o motor de partida, a buzina, luzes de freio, luzes de sinalização de direção e vidros elétricos.

2.7 Baterias automotivas

A bateria automotiva é um componente que armazena energia química, sendo um acumulador, liberando-a como energia elétrica. As suas principais funções são a de fornecer energia elétrica para consumidores do automóvel no momento da partida (motor de partida e sistema de ignição) e alimentar todo o sistema elétrico desde o momento que o veículo se encontra desligado e sem a atuação do alternador. Além disso, as baterias estabilizam e filtram a tensão elétrica do sistema elétrico automotivo. Em veículos atuais a bateria utilizada tipicamente é de ácido-chumbo composta por seis células de 2 volts em série, totalizando 12 Volts. No eletrodo positivo há peróxido de chumbo e no eletrodo negativo há chumbo. O ácido sulfúrico (H_2SO_4) desempenha a função de eletrólito, conduzindo elétrons entre os eletrodos de acordo com o processo de carga ou descarga. (LOURENÇO, 2010)

Os principais componentes de uma bateria automotiva estão ilustrados e identificados na Figura 8.

Figura 8 – Principais componentes de uma bateria automotiva

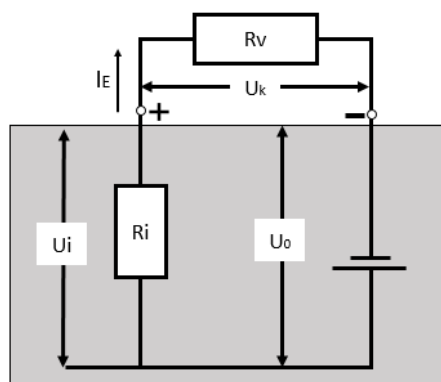


Fonte: Adaptado de Bosch, 2005

A Figura 9 ilustra as grandezas elétricas da bateria em seu interior e as externas relacionadas. Nesta Figura, o símbolo R_v representa a resistência dos consumidores elétricos automotivos; R_i representa a resistência interna da bateria; I_e representa a

corrente de descarga; U_k ilustra a tensão nos bornes da bateria; U_i a queda de tensão obtida em sua resistência interna e U_0 representa a tensão de seu circuito aberto. As resistências são dadas em ohms (Ω), as correntes em amperes (A) e as tensões em volts (V). (BOSCH, 2005)

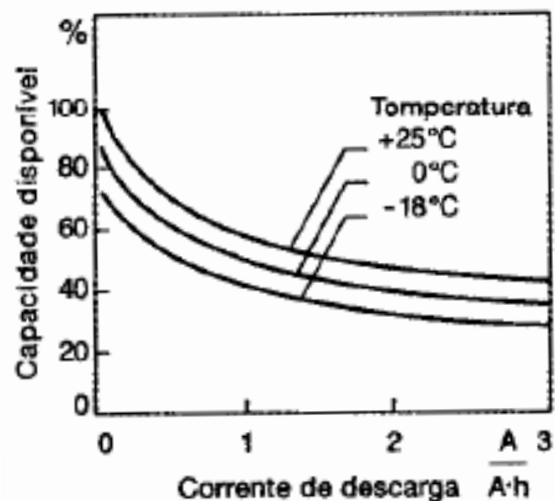
Figura 9 – Representação das grandezas elétricas relacionadas à bateria automotiva



Fonte: Adaptado de Bosch, 2005

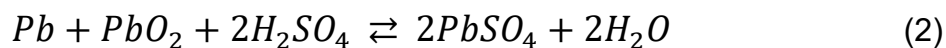
Segundo Bosch (2005), a capacidade de uma bateria automotiva é representada universalmente por quanto de corrente que é possível de ser fornecida em A.h em determinadas condições específicas. A capacidade disponível da bateria é função da corrente de descarga e da temperatura em que essa está submetida, como ilustrado no gráfico presente na Figura 10. Segundo esse gráfico, a capacidade da bateria é menor para correntes de descarga maiores e temperaturas menores.

Figura 10 – Capacidade disponível (%) em função da corrente de descarga (A/Ah) e temperatura (°C)



Fonte: Bosch, 2005

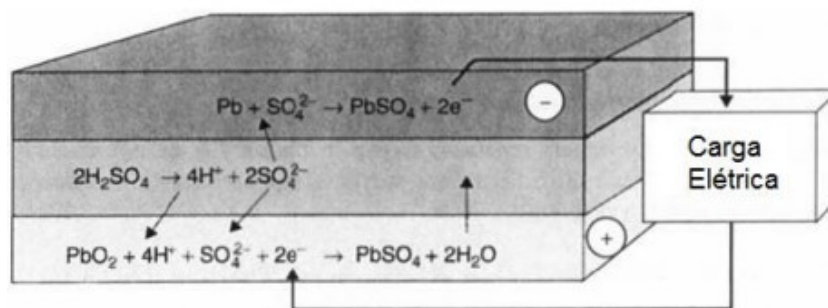
A reação global eletroquímica em uma célula de ácido-chumbo, caracterizando o processo de descarga (sentido direto) e carga (sentido inverso) da bateria de ácido-chumbo, está descrita na Equação 2. (LOURENÇO, 2010)



2.7.1 Processo de descarga da bateria

No processo de descarga da bateria, conforme pode ser visto na Figura 11, o chumbo (Pb) do eletrodo negativo transforma-se em sulfato de chumbo (PbSO₄) e origina elétrons como produtos, utilizando como reagente íons de sulfato (SO₄²⁻) resultantes da reação de ionização da solução eletrolítica de ácido sulfúrico (H₂SO₄). O peróxido de chumbo do eletrodo positivo (PbO₂), em reação com os íons H⁺, íons sulfato e elétrons, gera como produtos sulfato de chumbo e água (H₂O). Observa-se que a concentração e densidade do eletrólito abaixam nesse processo. (BOSCH, 2005)

Figura 11 – Semirreações do processo de descarga da bateria

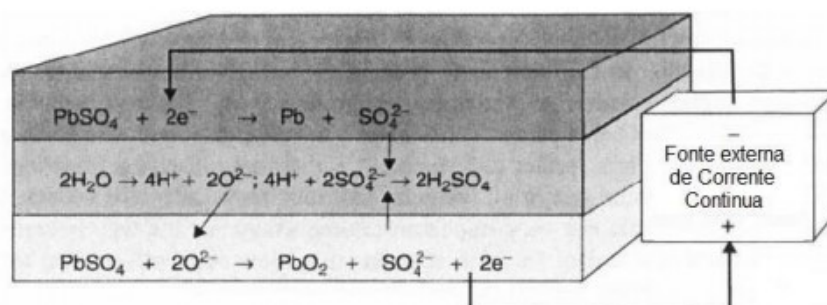


Fonte: Lourenço, 2010

2.7.2 Processo de carga da bateria

Conforme ilustrado na Figura 12, no processo de carregamento da bateria o eletrodo negativo recebe elétrons (provenientes da corrente elétrica gerada por fonte externa de corrente contínua, ou seja, o alternador), reagindo com o sulfato de chumbo e originando chumbo e íons de sulfato. Na solução eletrolítica, ocorrem reações de ionização da água, originando íons de hidrogênio (H^+) e hiperóxidos (O^{2-}), além de reação de formação de ácido sulfúrico por íons H^+ e sulfato. No eletrodo positivo, peróxido de chumbo, sulfato e elétrons são formados pela reação entre íons hiperóxidos e sulfato de chumbo. Neste processo aumenta-se, portanto, a densidade e concentração de ácido sulfúrico no eletrólito. Continuar carregando a bateria quando esta se encontra completamente com carga resulta na decomposição eletrolítica da água, gerando gás explosivo, uma vez que se tem oxigênio no eletrodo positivo e hidrogênio no negativo (devido à ausência de sulfato de chumbo para promover reação química de carregamento nesta situação). (BOSCH, 2005)

Figura 12- Semirreações do processo de carga da bateria



Fonte: Lourenço, 2010

2.7.3 Sensor Inteligente da Bateria – IBS

O IBS (*Intelligent Battery Sensor*, em tradução literal, sensor inteligente da bateria) possui como principal função a de monitorar parâmetros da bateria como corrente, tensão e temperatura da bateria. A partir desses se podem estimar outros parâmetros importantes, como SOC, SOF e SOH. (BOSCH, 2019)

- Estado de carga (SOC - “*State of Charge*”): Porcentagem da carga residual da bateria em detrimento de sua capacidade total em Ah, representando, portanto, o quanto a bateria está carregada.
- Estado de função (SOF – “*State of function*”): Prediz a tensão mínima alcançada durante a fase de partida do motor (“*cranking*”)
- Estado de saúde (SOH – “*State of health*”): Representa, em porcentagem, a capacidade real da bateria em detrimento da nominal. Ao longo de seu funcionamento, a bateria é submetida a um processo de “envelhecimento” por processos irreversíveis, em que sua capacidade de recarregar e prover energia diminui ao longo de sua vida útil.

O IBS é fabricado pelas principais fabricantes de autopeças do mundo, vendido para grandes montadoras, equipando diversos modelos de automóveis. A Figura 13 mostra um típico componente IBS. Esse é conectado diretamente em série ao polo negativo da bateria. Os parâmetros coletados e calculados são transmitidos pela rede automotiva com interconexão local (LIN – Em inglês, “*Local Interconnect Network*”) e utilizado pelas centrais eletrônicas do veículo. (CONTINENTAL, 2019)

Figura 13 – Ilustração de um componente IBS e sua estrutura



Fonte: Continental, 2019

O IBS é um sensor importante que vêm sendo cada vez mais utilizado nos automóveis atuais, pelo fato de promover a leitura e o cálculo de parâmetros importantes que são entrada para sistemas de controle do veículo, principalmente aqueles que objetivam o incremento da eficiência energética. Conforme será descrito no Tópico 2.13 (Estado da Arte), o sistema “alternador inteligente” desenvolvido originalmente pela empresa Bosch e descrito nas patentes N° DE 19638872 e N° US 7816893, é um exemplo característico de utilização do sensor IBS para seu controle e funcionamento, visto que o acoplamento e desacoplamento elétrico do alternador ao sistema elétrico do veículo são dependentes de parâmetros estimados da bateria por seu sensor inteligente, como o SOC. Além disso, o sistema Stop-Start, que também será descrito com maiores detalhes ao longo do Tópico 2.9 se mostra dependente do sensor IBS para sua respectiva estratégia de funcionamento e operação.

2.8 Alternadores

O alternador é um componente mecânico que possui a função de fornecer corrente elétrica para o automóvel, garantindo o seu funcionamento e de seus consumidores em todas as condições de operação do veículo, além de promover o carregamento da bateria. Dessa forma, é o principal responsável em manter o balanço de cargas compensado, de forma que se gere o mínimo de energia para alimentar os consumidores em dependência de sua frequência de rotação. (BOSCH, 2005)

Ainda segundo Bosch (2005), dentre as principais premissas do alternador têm-se que: deve possuir alto grau de eficiência; robustez e resistência a vibrações, altas temperaturas e variações provenientes do vão do motor, umidade e sujeira; potência adicional para recarga da bateria mesmo na condição de todos os consumidores ligados; operação com baixo ruído; e alimentação dos consumidores com corrente contínua, mesmo que esse componente gere corrente alternada (origem de seu nome).

De acordo com Dias (2015), o alternador substitui, atualmente, o componente dínamo automotivo, que possuía função semelhante por gerar corrente elétrica direta (diferente do alternador) para os consumidores do veículo. Mesmo possuindo partes semelhantes presentes no alternador, o dínamo foi substituído por sua baixa eficiência em fornecer energia elétrica, limitações de arrefecimento e de seu sistema elétrico

Os primeiros alternadores clássicos de polos a substituírem os dínamos foram os do tipo garra, possuindo aproximadamente metade do peso e gerando a mesma potência. O seu nome é alusivo aos polos de sua bobina que possuem formato de “garras”. A sua ventilação é caracteristicamente axial com fluxo único por ventoinha externa. Posteriormente, uma nova variante do alternador de polos do tipo garra surgiu, com menores dimensões: o alternador compacto resfriado a ar. Possui arrefecimento por ventilação de fluxo duplo por duas ventoinhas internas, de forma que o ar aspirado axialmente seja extraído radialmente do alternador. Dentre as suas principais vantagens estão a maior eficiência por maior capacidade de atingir velocidades de rotação máximas, maior durabilidade, menor ruído aerodinâmico e magnético. (BOSCH, 2005)

A Figura 14 ilustra os dois tipos citados de alternadores. Em (a), o alternador de polos do tipo garras e em (b) o alternador compacto resfriado a ar.



Fonte: Dias, 2015

2.8.1 Princípio físico de funcionamento do alternador

O princípio físico de funcionamento do alternador é a indução eletromagnética. Esse fenômeno é caracterizado pela ocorrência de corrente elétrica (induzida) em um condutor através da variação do fluxo magnético de um campo em que esse está inserido. (CEPA/USP, 2007)

O fluxo magnético (Φ) é determinado a partir da Equação 3, em que as variáveis desse são ilustradas na Figura 15. (CEPA/USP, 2007)

$$\Phi = |\vec{B}| \cdot A \cdot \cos(\alpha) \quad (3)$$

Sendo,

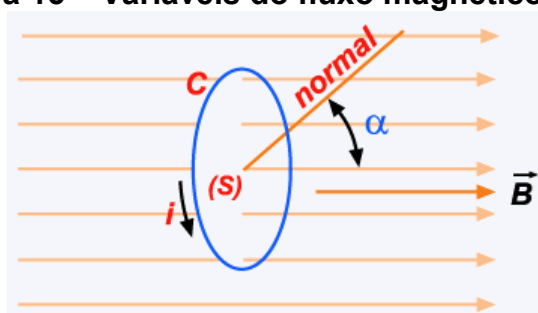
Φ = Fluxo magnético [Tm^2]

\vec{B} = Campo magnético [T]

A = Área da superfície do condutor [m^2]

α = ângulo formado pela normal da superfície do condutor e as linhas de força do campo magnético [$^\circ$]

Figura 15 – Variáveis do fluxo magnético



Fonte: CEPA/USP, 2007

Pode-se observar que a variação do fluxo magnético é ocasionada a partir de mudanças no campo magnético, área do condutor ou ângulo entre o condutor e linhas de campo. Geralmente, varia-se o ângulo (α) a partir da rotação dentro do campo magnético.

Segundo a Lei de Lenz, a corrente induzida é criada sempre no sentido oposto à variação do campo magnético que a gera. Ou seja, caso haja diminuição do fluxo magnético, a corrente é induzida no mesmo sentido do fluxo, de forma a aumentá-lo. Caso haja aumento do fluxo magnético, a corrente induzida possui sentido contrário, de forma a criar um campo magnético induzido contrário que promova a diminuição do fluxo magnético. (CEPA/USP, 2007)

A Lei de Faraday-Neumann estabelece que uma força eletromotriz seja criada em todo condutor em que haja corrente elétrica. Dessa forma, a indução eletromagnética gera uma força eletromotriz induzida (ξ_i), que é quantificada pela razão entre a variação do fluxo magnético ($\Delta\Phi$) pela variação do tempo (Δt), de acordo com a Equação 4. O sinal negativo é referente ao sentido da corrente e tensão induzida, conforme a Lei de Lenz. (CEPA/USP, 2007)

$$\xi_i = - \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \quad (4)$$

Para alternadores, tem-se que a força eletromotriz induzida é senoidal, conforme pode ser visto na Equação 5. Gera-se, portanto, corrente alternada. (YOUNG e FREEDMAN, 2009)

$$\xi_i = - N_e * \frac{d\Phi}{dt} = -N_e \cdot BA \cdot \text{sen}(\omega t) \quad (5)$$

Em que,

N_e = número de espiras

ω = velocidade angular de rotação [rad/s]

O valor da potência elétrica (em Watts) desenvolvida pelo alternador pode ser obtido pela multiplicação da corrente elétrica (em Amperes) gerada pela tensão (em volts).

2.8.2 Componentes principais do alternador

O alternador é composto principalmente pelas seguintes partes: polia, carcaça (com mancais de acionamento, do coletor e capa protetora), rolamentos, estator, rotor com hélice de refrigeração, regulador eletrônico multifunção e conjunto retificador, conforme visto na Figura 16 em detalhe e descritos em seguida, segundo Dias (2015).



Fonte: Adaptado de Bosch, 2019

- **Carcaça:** Protege os componentes internos do alternador, além de suportá-los. É constituída por ligas leves e geralmente duas partes que são encaixadas e aparafusadas, com aberturas para melhorar a refrigeração. Além disso, abriga os mancais de acionamento e do coletor, suportando-os.

- **Polia:** A partir de uma correia de distribuição esse componente interligado ao eixo do rotor é acionado conforme a velocidade de rotação do motor. A correia deve estar tensionada corretamente conforme previsto pelo projeto para garantir desempenho esperado do alternador, suportando variações de torque do motor sem prejuízos ao fornecimento de energia para o sistema elétrico do veículo.

- **Rotor:** É um componente que se constitui de aço, possuindo uma bobina de excitação de fios de cobre esmaltados em sua parte central, dois polos em formato de garras de ligas de ferro ou silício e anéis coletores. Seu eixo possui rolamentos de forma a garantir eficiência de rotação com mínimo desgaste. Assim que há ligação da chave de ignição do veículo, os anéis coletores (também constituídos por cobre) conduzem corrente elétrica da bateria automotiva para a bobina de excitação, gerando campo magnético, polarizando os polos em norte e sul. As escovas são peças pequenas com ligas à base de carvão e possuem a função de alimentar os anéis coletores com a carga proveniente da bateria. Devido ao contato direto com os anéis, as escovas são componentes que sofrem desgaste no alternador. As hélices de refrigeração conectadas ao eixo do rotor promovem a ventilação do alternador e seus componentes por convecção forçada. Em alternadores de polos do tipo garra são montadas externamente, enquanto que em alternadores compactos são presentes dentro desse, conforme descrito anteriormente.

- **Estator:** Em formato circular, geralmente é constituído de ligas de ferro ou silício e espiras de fios de cobre esmaltado localizados entre as ranhuras internas em torno de seu diâmetro. Esses fios de cobre constituem as bobinas do estator, fixadas em núcleo de aço, onde ocorre a indução da corrente gerada pela rotação do rotor. As bobinas estão defasadas em 120° entre elas, estabelecendo, portanto, um sistema trifásico com corrente alternada. À medida que o rotor é rotacionado, observa-se inversão contínua da corrente produzida.

- **Conjunto retificador:** Composto por placa de diodos que possuem a função de transformar a corrente alternada gerada e a tensão em contínuas. Além disso, os diodos impedem a descarga da bateria inibindo correntes reversas. Devido ao fato dos diodos não serem resistentes a altas temperaturas (130°C), a placa que os compõe é feita de Alumínio, de forma a facilitar a dissipação de calor.

- **Regulador eletrônico multifunção:** De acordo com Bosch (2019), a tensão do alternador é regulada e monitorada por esse componente, a partir do contato entre as escovas e anéis coletores, de forma a mantê-la constante para determinada condição de operação. Por ser multifunção, desempenha funções especiais adicionais a essa. O funcionamento correto em condições ideais do alternador é garantido por esse componente. Além disso, a produção de corrente demandada pelo sistema elétrico do automóvel é função da tensão, que é constantemente monitorada e regulada eletronicamente, sendo um importante sistema de controle do alternador.

2.8.3 Parâmetros influentes na operação do alternador

Bosch (2005) destaca que o alternador sofre influências externas, bem como da rotação e temperatura do meio.

- **Rotação:** Com o aumento da rotação (em faixas específicas do regime de funcionamento do componente), o rendimento do alternador cresce. Dessa forma, objetiva-se uma alta relação de transmissão entre o eixo do motor e o alternador a partir de sua polia. Geralmente, a relação utilizada é de 1:2 a 1:3 em veículos de passeio e 1:5 para veículos utilitários. Devido à alta rotação, o alternador e seus componentes são submetidos a altas forças centrífugas, impactando em sua vida útil e ocasionando em aumento de ruído.

- **Temperatura:** As perdas que ocorrem nas máquinas durante o funcionamento e transformação de energia geram aumento da temperatura no meio que estão inseridas. Cada vez mais se observa a tendência de “encapsulamento” de componentes veiculares no cofre do motor, de forma que as perdas térmicas geram aumentos de temperatura mais expressivos devido à diminuição e maior aproveitamento do espaço físico. Dessa forma, torna-se necessário bom

dimensionamento do sistema de arrefecimento do alternador, que aspira o ar de refrigeração do compartimento do motor, realizando convecção natural e forçada por uso de ventoinha. Há ainda alternadores com sistemas de refrigeração líquida em casos que as temperaturas do cofre do motor são extremas.

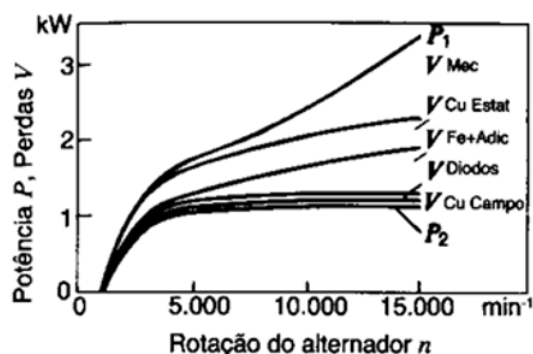
- **Influências externas:** Devido à montagem do motor a combustão interna, o alternador pode ser submetido a cargas mecânicas que geram vibrações e acelerações em suas peças de fixação e demais componentes. Assim, é importante assegurar que frequências de ressonâncias sejam evitadas para evitar danos críticos ou atividade que comprometa seu funcionamento. Além disso, os alternadores estão sujeitos a fatores externos como pingos de água, névoa, sujeira, combustível, óleo, sal e outros característicos de condições climáticas específicas ou dispersos na via de rodagem. Com isso, o alternador deve possuir materiais específicos que evitem corrosão e não possuir correntes de fuga em seus componentes, de forma a não se obter desgaste por eletrólise.

2.8.4 Eficiência do alternador

Durante o processo de conversão da energia mecânica em elétrica ocorrem perdas inerentes. A potência absorvida sobre a liberada resulta no grau de eficiência do alternador. As chamadas “perdas de ferro” são devido à histerese do campo magnético no ferro do estator e rotor, enquanto as “perdas de cobre” são ocasionadas pela resistência elétrica nos enrolamentos do rotor e estator. As perdas mecânicas são consequência do atrito nos mancais de rolamentos, nas escovas e do ar com as ventoinhas. A Figura 17 ilustra um gráfico com curvas de potência absorvida (P_1) e liberada (P_2), além das perdas mecânicas (V_{mec}), de cobre ($V_{CuEstat}$), de ferro ($V_{Fe+adic}$), nos retificadores (V_{Diodos}) e por excitação de campo ($V_{CuCampo}$), em kW em função da rotação do alternador em rpm (min^{-1}). (BOSCH, 2005)

Figura 17 – Gráfico com distribuição de potências e perdas no alternador

P_1 – Potência absorvida
 P_2 – Potência liberada
 V_{Mec} – Atrito do ar e mancal
 $V_{Cu\ Estat}$ – Perdas de cobre no estator
 $V_{Fe+Adic}$ – Perdas de ferro e adicionais
 V_{Diodos} – Perdas de retificadores
 $V_{Cu\ Campo}$ – Perdas de excitação

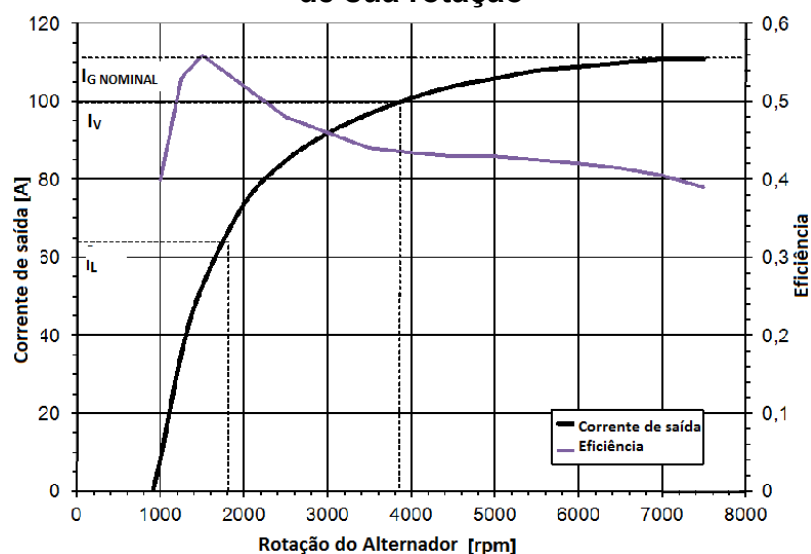


Fonte: Adaptado de Bosch, 2005

De acordo com Bosch (2005), a faixa de trabalho normal do alternador compreende cargas parciais, resultando em grau de eficiência de 50%. Para alternadores maiores e mais pesados, a eficiência cresce para mesma carga de trabalho. O maior peso destes alternadores é compensado pelo ganho em eficiência, mesmo com maior torque de inércia da massa.

O gráfico presente na Figura 18 mostra curvas de eficiência e corrente de saída do alternador em função de sua rotação. Pelo gráfico, observa-se uma queda na eficiência após rotação correspondente à marcha lenta (1500 rpm), que gera corrente de saída I_L (valor igual a 60 A). Além disso, percebe-se neste gráfico que se a corrente de saída do alternador (I_G) for menor que a corrente dos consumidores do automóvel (I_V igual a 100 A), há descarga da bateria (rotação do alternador entre 1800 e 3800 rpm). O valor da corrente nominal ($I_{Gnominal}$) ocorre em 7000 rpm, sendo equivalente neste caso a 110 A.

Figura 18 – Curvas de eficiência e correntes de saída do alternador em função de sua rotação

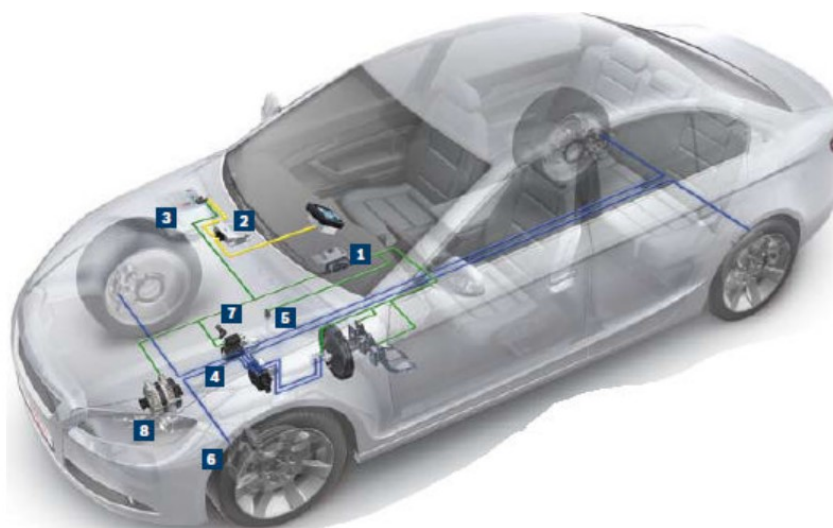


Fonte: Adaptado de Dias, 2015

2.9 Tecnologia Stop-Start

O princípio de funcionamento do sistema Stop-Start mostra-se simples, tendo como função o desligamento automático do motor a combustão interna em paradas completas do veículo (como, por exemplo, em paradas do veículo em semáforos, paradas obrigatórias ou congestionamentos). Em seguida, quando há intenção e ação do condutor em colocar o veículo em movimento (pressionando a embreagem em veículos com câmbio manual ou liberando o pedal de freio em veículos com transmissão automatizada ou automática), o motor é religado automaticamente. Dessa forma, o consumo de combustível do motor a combustão interna durante esses períodos de parada do veículo é eliminado, visto que o motor se encontrará desligado. Para um veículo convencional sem esta tecnologia, durante paradas em condição de marcha lenta, permanece com o seu motor em funcionamento sem o intuito de movimentar o veículo. Com isso, este motor está operando tecnicamente em estado de eficiência zero. A Figura 19 ilustra os componentes principais de um sistema Stop-Start, com subseqüentes descrições dos principais componentes segundo Bosch (2019).

Figura 19 – Componentes do sistema Stop-Start



Fonte: Bosch, 2019

- 1) **Central eletrônica de controle do motor (ECM – “Engine Controle Module”)**: Ajustada com “software” de calibração para o sistema Stop-Start, é o módulo responsável por receber as informações de entrada dos sensores do conjunto motor/transmissão. A partir disso, esse realiza os cálculos de solicitação de torque, avanço de ignição, injeção de combustível e diagnóstico, para controle dos atuadores. Além da ECM, o módulo da carroceria (BCM - “Body Control Module”) recebe diversas informações de sensores do veículo como um todo, como por exemplo, sensores de interruptor do freio de mão, cinto de segurança, bateria, capô, ar condicionado e outros, também fazendo parte do sistema de gestão do Stop-Start;
- 2) **Estabilizador de tensão**: Responsável por estabilizar a tensão de bordo do veículo durante a partidas e consecutivas repartidas, visto que o nível de tensão do sistema elétrico diminui por instantes nesses momentos (podendo comprometer o funcionamento de demais consumidores elétricos, como o sistema de rádio, faróis e demais centrais eletrônicas do veículo);
- 3) **Sensor inteligente de bateria (IBS)**: Conforme descrito no Tópico 2.7.3, é o sensor responsável por fornecer as informações de tensão, corrente, temperatura, estado de carga (SOC), estado de função (SOF) e estado de

saúde (SOH) da bateria, sendo determinante para a estratégia de operação do Stop-Start;

- 4) **Motor de partida:** É o responsável por iniciar a rotação do motor, durante a partida inicial do veículo ou repartidas, até que o sincronismo seja identificado e as combustões iniciadas. Como o sistema Stop-Start proporciona diversas repartidas ao longo da operação do motor, o motor de partida é altamente solicitado, necessitando ser mais robusto e possuir alta durabilidade quando comparado a um motor de partida convencional de um veículo sem o sistema em questão;
- 5) **Sensor de neutro:** Localizado no sistema de transmissão manual do veículo, tem o objetivo de informar se a alavanca de câmbio está posicionada na região de neutro, de forma a permitir o desligamento do motor;
- 6) **Sensor de velocidade:** Localizado nas quatro rodas do veículo com o intuito de informar a sua velocidade instantânea;
- 7) **Sensor de rotação do eixo de comando:** Geralmente é do tipo Hall, sendo responsável por informar a rotação do motor a combustão interna, auxiliar em seu sincronismo e detectar ocorrências de giros reversos.
- 8) **Alternador:** Conforme explicitado no Tópico 2.8, o alternador é o componente responsável por fornecer alimentação à bateria e consumidores elétricos durante o período de motor em funcionamento pela conversão de energia mecânica de rotação do motor em energia elétrica. Assim como o motor de partida, o alternador também é altamente exigido com a utilização do sistema Stop-Start, necessitando de potência e durabilidade adicionais em relação ao convencional.

A bateria de um veículo dotado de sistema Stop-Start também deve ser diferente, com tecnologias especiais, devido à alta demanda e sucessivos descarregamentos e carregamentos pelas sucessivas repartidas do motor. Atualmente, as baterias especiais para esse fim podem ser do tipo EFB (*Enhanced*

Flooded Battery” - Baterias Convencionais Melhoradas) ou do tipo AGM (“*Absorbent Glass Mat*” - Manta de Vidro Absorvido), possuindo separadores de fibra de vidro absorvente. Logo, não possuem eletrólito ácido livre pela alta capacidade de absorção dos seus separadores, sendo mais resistentes à corrosão e vibração. Assim, o uso de tais baterias especiais garante maior durabilidade frente a operação do veículo com sistema Stop-Start (SINDIREPA, 2013).

Para um sistema tradicional de Stop-Start em veículo com transmissão manual, assim que o condutor parar o veículo e colocar a alavanca de câmbio em neutro, liberando o pedal da embreagem (para veículos manuais), os softwares da ECM e BCM realizam a leitura dos sensores do veículo para confirmar o seu estado, permitindo o desligamento do motor. Dentre as condições verificadas, têm-se: a velocidade do veículo é igual a 0 km/h, se o vácuo do sistema de freio é suficiente para garantir a sua frenagem, bateria com carga suficiente para permitir a partida seguinte do motor, se o câmbio está realmente em posição neutro, se o motor não está em condição de adaptação de combustível, porta do motorista e capô fechados, cinto de segurança afivelado, temperatura do motor na faixa permitida de trabalho do sistema e ausência de falhas nos sistemas e sensores da ECM. Caso todas as condições anteriores sejam confirmadas, o motor será desligado automaticamente, enquanto que a ECM continuará ativa monitorando o sistema. A repartida ocorrerá após um tempo pré-estabelecido por calibração ou por segurança caso a velocidade do veículo exceder 3 km/h, motor entrar em condição de temperatura fora de sua faixa de operação permitida, redução do sistema de vácuo do freio, estado de carga da bateria abaixo do limiar mínimo, ar condicionado acionado ou inserção de marcha ré. Caso haja alguma falha dos sensores primários do sistema (exemplo: sensor de rotação, sensor de posição do pedal de embreagem, sensor de neutro e outros), ou em caso de abertura de porta do motorista e desafivelamento do cinto de segurança, a repartida somente será permitida com um ciclo de chave. (MARTINS, 2016)

Apesar dos benefícios energéticos do sistema, é importante garantir que o sistema não afete negativamente a dirigibilidade do veículo, além de minimização do ruído e vibração associados ao desligamento e repartida automática do motor, reduzindo o impacto de percepção do motorista e ocupantes do veículo. Em adição, o tempo de repartida deve ser o menor possível de forma a atender à demanda de torque solicitada pelo condutor, sendo também importante garantir que a injeção de combustível no transiente das partidas seja otimizada e minimizada.

O mercado de veículos com sistema Stop-Start aumentará até 2026 segundo uma taxa de crescimento anual composta de 12,4%, sendo aplicado em diversos modelos de veículos como Audi, BMW, FCA, Ford, GM, Honda, Mercedes Benz, Porsche, Volkswagen entre outros (GLOBE NEWSWIRE, 2020).

Segundo Martins (2016), objetivando-se a otimização do sistema tradicional de Stop-Start, foram desenvolvidas adaptações e evoluções de tal sistema, bem como:

- Stop-Start avançado: O veículo não precisa estar completamente parado para desligamento do motor, atuando abaixo de 20km/h;
- Stop-Start “*Coasting*”: Há o desligamento do motor em alta velocidade (até 120 km/h), utilizando a energia cinética “acumulada/regenerada” para manter o veículo em movimento, de forma que as funções de direção elétrica, central multimídia/rádio, ESP, ABS e outras continuam ativas em funcionamento. Tem-se a repartida do motor com o acionamento do pedal de acelerador pelo condutor.

2.10 Combustíveis brasileiros

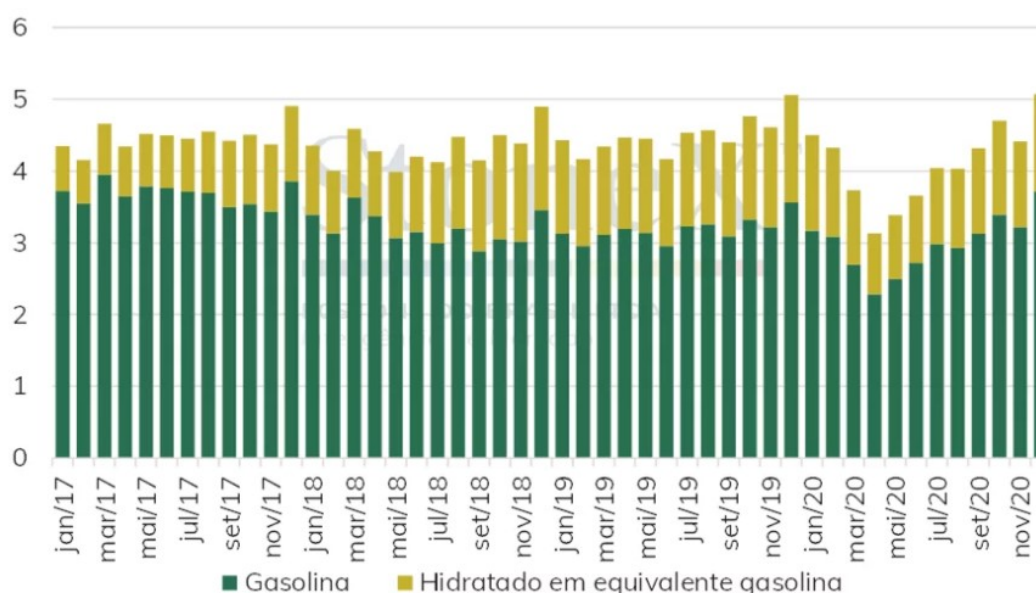
Segundo a Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustível (ANP), o Brasil seria considerado autossuficiente em petróleo a partir do início da década de 2020, através de maiores investimentos tecnológicos em refinarias, por exemplo. (INFOMONEY, 2017)

O país é um grande produtor de petróleo em aspectos quantitativos. Entretanto, em aspectos relativos à qualidade ainda é dependente de petróleo importado. Isso se deve ao fato de que a maioria do petróleo extraído no Brasil é do tipo “pesado”, favoráveis para produção de asfalto e produtos densos. Esse tipo de petróleo também pode ser utilizado para produção de gasolina, mas o processo é mais caro e a maioria das refinarias brasileiras possui limitações técnicas para este tipo de processo. Dessa forma, um quinto do óleo presente nas refinarias para produção de combustível é do tipo “leve” e importado de outros países.

De acordo com a Resolução CIMA (Conselho Interministerial do Açúcar e do Alcool) Nº 1, de 28 de fevereiro de 2013, publicado em 1º de maio de 2013 no Diário Oficial da União, determinou-se a mistura de etanol anidro na gasolina pura, na proporção de 25% em volume, promovendo a diminuição de preços do combustível e incentivando a produção nacional do etanol. A adição de etanol anidro à gasolina é

realizada desde 1989, entretanto diminui o seu rendimento e promove o aumento do consumo, conforme explanado por Abreu (2014). A Figura 20 mostra um gráfico com a evolução recente do consumo de combustíveis no Brasil para veículos com motor de ciclo Otto. Destaca-se a diminuição relevante no primeiro trimestre de 2020 do consumo de combustível, reflexo do início da pandemia do Corona vírus (causador da doença COVID-19) no país, com significativos movimentos de “lockdown” e isolamento social, de forma que houve diminuição da circulação de veículos rodoviários.

Figura 20 - Evolução do consumo de combustíveis para ciclo Otto no Brasil de 2017 a 2020, em milhões de m³



Fonte: Malzoni, 2021

2.10.1 Gasolina

A gasolina é constituída por uma mistura de hidrocarbonetos geralmente mais “leves” que os presentes no óleo diesel. Pode conter, ainda, compostos nitrogenados, oxigenados e de enxofre. É obtida por processo de destilação do petróleo na faixa de 30 a 220 °C. (ABREU, 2014)

A Tabela 7 mostra as principais características da gasolina automotiva utilizada nesse trabalho (gasolina padrão utilizada para “testes de emissões”), composta por mistura de 22% de etanol anidro em volume (E22).

Tabela 7 - Propriedades da gasolina E22 (padrão para “testes de emissões”)

Propriedade	Valores
Conteúdo de etanol (%)	22,0
Relação Ar/Combustível estequiométrica	13,10
Octanagem (RON) *	-
Octanagem (MON) **	80,0
Velocidade laminar da chama (m/s)	0,300
Temperatura de autoignição (°C)	400,0
Massa de Enxofre (%)	0,090
Massa de Oxigênio (%)	9,700
Massa de Hidrogênio (%)	13,600
Massa de Carbono (%)	76,700

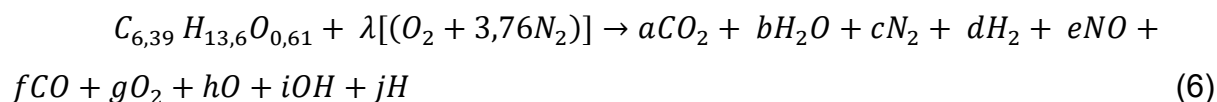
* MON - *Motor Octane Number* (Número de Octano Motor). Este número é determinado pelo método ASTM D 2700, a partir de um motor padrão fabricado pela companhia DRESSER-WAUKESHA. É obtido a partir da simulação de um regime severo de operação do motor como em uma subida a 900 rpm

** RON - *Research Octane Number* (Número de Octano Pesquisa). Este número é determinado pelo método ASTM D 2699, tendo como base um motor padrão fabricado pela companhia DRESSER-WAUKESHA. Simula-se um regime brando de operação do motor a 600rpm.

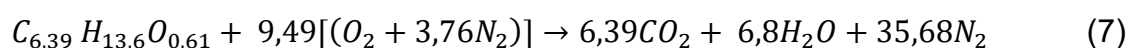
Fonte: Adaptado de Abreu, 2014 (apud Sodr e e Costa, 2010)

2.10.2 Rea o de combust o

Segundo Sales (2001), a rea o de combust o do combust vel Gasolina (E22) ($C_{6,39}H_{13,6}O_{0,61}$) para mistura pobre ou rica (dependente do A/F e do fator lambda)   descrita pela Equa o 6.



Para mistura estequi trica, ou seja, fator lambda unit rio (λ igual a 1), t m-se a rea o de combust o do E22 (gasolina brasileira automotiva utilizada na pesquisa) descrita na Equa o 7. (SALES, 2001)



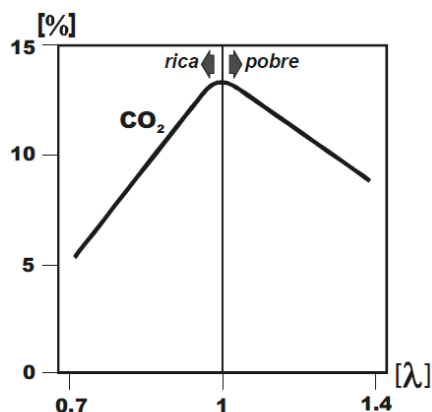
A partir das equações 6 e 7, pode-se observar que a quantidade de formação de CO_2 está interligada à quantidade de combustível injetada, sendo, portanto, relação direta com o fator lambda. Além disso, no caso da combustão estequiométrica, se predomina a formação dos gases CO_2 , N_2 e H_2O .

2.10.2.1 Dióxido de carbono (CO_2)

O dióxido de carbono (CO_2) é originado pela combinação de uma molécula de carbono associado a duas de oxigênio, sendo um produto da combustão. A queima total ou incompleta do combustível possui grande influência em sua formação, além da relação ar/combustível e suas variações.

Conforme visto na Figura 21, a variação de concentração de CO_2 formado é dependente do fator lambda, em que para misturas estequiométricas obtém-se nível máximo de dióxido de carbono na combustão. (MANAVELLA, 2006)

Figura 21 — Concentração de CO_2 formado de acordo com o fator lambda (λ)



Fonte: Manavella, 2006

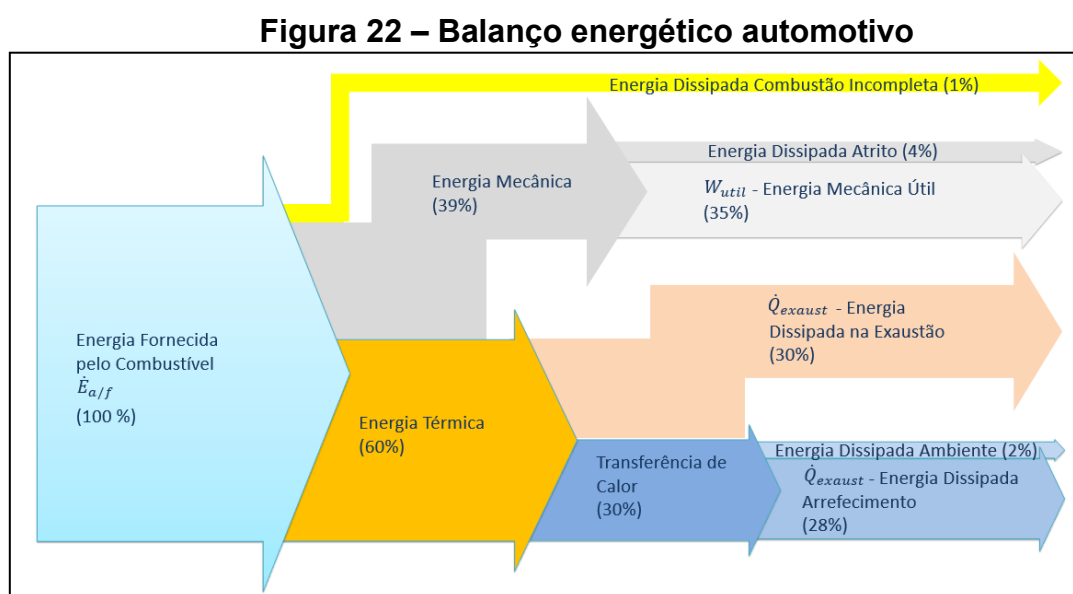
2.11 Balanço energético do veículo

A conversão de energia é o princípio fundamental de um balanço de energia, em que uma parte da energia total fornecida a um sistema é acumulada internamente, enquanto outra parte é dissipada para o meio externo. O calor útil é representado pela máxima energia proveniente do combustível e as trocas de calor são estabelecidas nas vizinhanças, conforme descrito por Shapiro (2002).

Além disso, conforme visto na Equação 8, a energia acumulada em um sistema é resultante da soma da energia gerada com a diferença entre a que entra e a energia que sai do volume de controle determinado. (INCROPERA, 2008)

$$\Delta E_{acum} = E_{ger} + (E_{ent} - E_{sai}) \quad (8)$$

A Figura 22 ilustra um fluxograma com a distribuição usual de energia em percentuais do balanço térmico de um veículo. As perdas de energia foram estimadas considerando os sistemas e componentes em separado inicialmente. As principais perdas são oriundas do calor dos gases de exaustão, sistema de arrefecimento, bloco do motor (radiação e convecção), combustão incompleta, sistema de lubrificação e atrito das partes móveis do conjunto formado por motor a combustão interna e seus componentes. (OLIVEIRA Jr, 2007)



Fonte: Oliveira Jr, 2007

Heywood (1988) seguiu os princípios da 1ª lei da termodinâmica (trabalho líquido realizado ou sofrido por um sistema fechado em processo adiabático entre um estágio inicial e outro final, a partir da conservação de energia) para determinar uma relação que descreva o balanço energético de um veículo, conforme descrito na Equação 9.

$$\frac{E_a}{f} = Q_{exhaust} + Q_{arref} + H_{ci} + Q_{conv+rad} + W_{util} + Q_{fric} \quad (9)$$

Sendo:

$E_{a/f}$ = Energia proveniente do combustível para determinado A/F (relação ar/combustível) [J];

$Q_{exhaust}$ = Energia dissipada pelos gases de exaustão [J];

H_{ci} = Entalpia dos gases de exaustão por combustão incompleta [J];

Q_{arref} = Energia liberada pelo sistema de arrefecimento [J];

$Q_{conv+rad}$ = Calor liberado por convecção e radiação [J];

Q_{fric} = Energia mecânica dissipada por atrito de fricção [J];

W_{util} = Energia mecânica útil (trabalho resultante líquido) [J].

Carreño (2016) realizou uma metodologia para analisar o rendimento térmico de motores a partir do balanço energético, baseadas em técnicas experimentais e teóricas. Segundo ele, a análise térmica do motor é interessante no sentido de quantificar as suas perdas térmicas, buscando formas para melhorias em seu rendimento global. Apesar dos benefícios do uso de balanças térmicas e sua ampla disseminação dentre os trabalhos analisados por ele, a análise na maioria desses possui uma abordagem mais simples, ou seja, considerando apenas a eficiência do freio e perdas globais de refrigeração e exaustão.

Dessa forma, pode-se constatar pelo balanço energético do automóvel que de toda a energia química proveniente do combustível, em média somente 35% é aproveitado como energia mecânica líquida, sendo o trabalho útil para movimentação do veículo. Com isso, comprova-se que o incremento na eficiência energética dos componentes e sistemas automotivos é essencial para garantir maior aproveitamento da energia disponível dos combustíveis, de forma a diminuir as perdas térmicas e mecânicas e aumentar o montante resultante de energia mecânica para rodagem do veículo de forma mais eficiente.

Como visão geral, conforme explanado por Tormos *et al.* (2018), busca-se sumariamente diminuir as perdas mecânicas por atrito entre os componentes auxiliares ou movidos pelo eixo do motor a partir de otimização desses sistemas. Assim, aumenta-se a eficiência energética do motor a combustão interna, diminuindo o consumo de combustível e emissões de gases estufa.

A Tabela 8 ilustra alguns exemplos de tecnologias que promovem a diminuição de perdas no balanço energético automotivo e a consequente diminuição do consumo de combustível e emissão de gás carbônico (CO₂).

Tabela 8 – Tecnologias que promovem a redução da emissão de dióxido de carbono (CO₂)

Medidas/ Tecnologias	Redução de CO ₂	
	Mínima	Máxima
Redução da fricção mecânica de componentes	0,4%	5,0%
Pneus de baixa resistência a rolamento	2,0%	2,0%
Melhorias aerodinâmicas	1,5%	1,8%
Monitoramento da pressão dos pneus	1,0%	1,0%
Sistema de direção elétrica	2,0%	3,0%
Veículos elétricos a bateria	7,8%	7,8%
Bomba de combustível "inteligente"	0,3%	0,3%
Painéis solares no teto veicular	17,0%	29,0%
Alternadores de alta eficiência	0,5%	2,0%
Variação da razão de compressão	5,0%	10,0%
Sistema Stop-Start	3,0%	4,0%
Recuperação do "calor" de exaustão	1,5%	1,5%
Recuperação energética pelo freio	3,0%	3,0%
Otimização da caixa de marchas	1,0%	2,0%
Sensor inteligente da bateria (IBS)	1,5%	1,5%
Lubrificantes de baixa viscosidade	0,5%	4,0%
Utilização de materiais de baixo peso	0,9%	20,0%
Transmissão Continuamente Variável (CVT)	2,1%	9,0%
Transmissão de dupla embreagem	4,0%	5,0%
Injeção direta com carga estratificada (mistura estequiométrica)	8,0%	14,0%
Injeção direta com carga homogênea (mistura estequiométrica)	0,7%	5,0%
Ignição por compressão por carga homogênea	11,0%	25,0%

Fonte: Adaptado de Krail e Shade, 2010

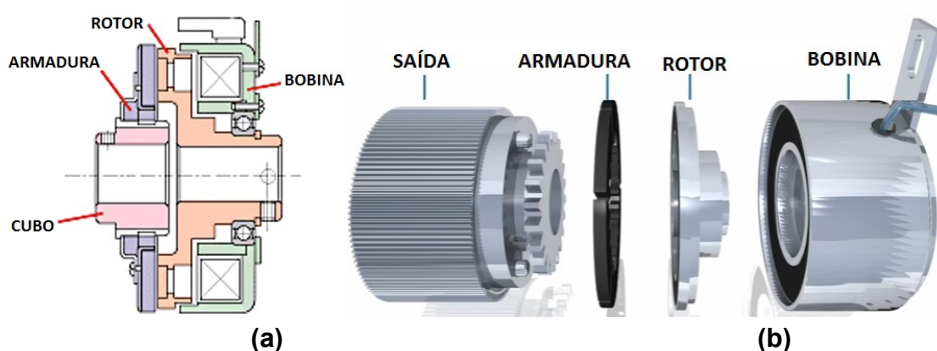
2.12 Sistema de embreagem eletromagnética

Atualmente, diversas áreas e equipamentos como máquinas agrícolas, impressoras e copiadoras, compressores, servomotores, maquinário fabril e de automação, equipamentos médicos, automóveis, entre outros adotam um sistema de embreagem eletromagnético. A partir desse sistema, há o acoplamento e desacoplamento de mecanismos de entrada e saída conforme a necessidade e operação. Para isso, esse tipo de embreagem é acionado eletricamente, mas, por conseguinte, transmite torque mecanicamente. (FLEMMING, 2009)

Segundo Muramatsu *et al.* (2015), no contexto dos automóveis, as embreagens eletromagnéticas vêm sendo amplamente utilizadas principalmente como interruptores mecânicos entre o compressor de ar condicionado e o motor a combustão interna, visto que o compressor é acionado e movimentado pelo movimento do motor. Esse tipo de embreagem foi introduzido nos automóveis há 50 anos, sendo que anualmente são produzidas em torno de 70 milhões desses componentes ao ano para essa finalidade no cenário automotivo.

A Figura 23 ilustra um desenho técnico de uma embreagem eletromagnética (a) e seus componentes em formas tridimensionais em ordem de montagem (b).

Figura 23 – Embreagem eletromagnética
(a) Desenho técnico do componente montado
(b) Componente em vista explodida



Fonte: Adaptado de Ogura, 2016

Durante a aceleração dos componentes no estágio de acoplamento, observa-se pequeno escorregamento. Entretanto, quando se alcança a condição de total acoplamento, não há escorregamento relativo. Obtém-se, portanto, eficiência resultante de acoplamento de 100%, tendo assim total transferência de torque entre a entrada e a saída, além de equidade de velocidades. Para isso, o seguinte processo é realizado: inicia-se o estágio de acoplamento a partir da aplicação de corrente e tensão na bobina de campo da embreagem, a qual se eletromagnetiza e produz linhas de fluxo magnético. Essas linhas de fluxo preenchem o espaço de ar entre o rotor e a carcaça de aço da bobina. A armadura é conectada ao cubo (representando uma saída de carregamento como por exemplo uma polia, eixo, engrenagem ou outro tipo de componente). Magnetiza-se, portanto, o rotor que atrai em seguida a armadura, gerando contato de fricção mecânico e magnético. Ambos são acelerados por forças de fricção e magnéticas, atingindo a velocidade do rotor em curto período de tempo, caracterizando assim a transferência de carga e equivalência de velocidades entre entrada e saída. (FLEMMING, 2009)

Para o desacoplamento ocorrer, a corrente ou tensão aplicada na bobina de campo deve ser removida. Assim, a armadura fica livre para desacoplar do rotor, visto que a atração magnética entre esses é cessada. Usualmente há molas que seguram a armadura durante o desacoplamento, mantendo-a distante do rotor e criando um pequeno vazio de ar entre as duas superfícies. (OGURA, 2016)

Ogura (2016) também explana que o acoplamento e desacoplamento cíclico é possível para este tipo de embreagem eletromagnética. Isso é permitido a partir da alimentação de corrente ou tensão também em ciclo para as bobinas.

2.13 Estado da Arte

O alternador é alvo constante de pesquisas e desenvolvimentos tecnológicos visando o aumento de sua eficiência mecânica e elétrica visto que, apesar de fundamental para o funcionamento dos veículos, esse componente também representa um efeito negativo sobre o consumo de combustível e emissão de CO₂. Isso se deve ao fato de ser acionado pelo eixo do motor, conforme já explicado anteriormente, de forma que devido à inércia dos acessórios frontais conectados e acionados pelo motor (como o alternador), estabelecem-se cargas parasitas que representam perdas mecânicas de fricção e calor para a operação e potência motor a

combustão interna, gerando impactos negativos em seu consumo de combustível e emissões de gases como o CO₂.

Tatur *et al.* (2018) explicitam em seu trabalho que o alternador pode impactar em até 7% da potência de acionamento do motor, ocasionando perdas mecânicas e térmicas, sendo um número altamente expressivo frente às outras fontes de perdas energéticas no veículo. Além disso, de acordo com Bosch (2005), o peso dos componentes do sistema elétrico (bateria, alternador e consumidores) representa cerca de 5%, aproximadamente, do peso total de um veículo de passeio. Assim, em média, para cada 100 km rodados e 10 kg de peso do alternador há consumo de 0,1 litro de combustível para 100 W de potência de acionamento.

Com isso, estratégias de operação em função da demanda de energia elétrica ou estado de carga elétrica da bateria têm sido desenvolvidas para mitigação de efeitos negativos, bem como atuações mecânicas em seus componentes também já foram realizadas e desenvolvidas em prol disso, conforme será apresentado a seguir.

Jansen e Antchak (2004) descreveram no documento de patente N° US 2004011818 um dispositivo com a função de desacoplar um eixo de acionamento e um componente acionado por correia de um veículo automotivo, de forma a permitir que o componente acionado por correia opere temporariamente a uma velocidade diferente da velocidade do eixo de acionamento ou mesmo seja desacoplado mecanicamente de forma parcial e temporária. O motor a combustão interna pode acionar diversos periféricos pelo movimento de seu eixo. Assim, segundo os autores, como resultado dessas mudanças de velocidade, os componentes periféricos acionados por correia pelo eixo do motor estão continuamente tentando acelerar e desacelerar. Isso poderia resultar em níveis inaceitáveis de ruído e vibração, além de durabilidade reduzida dos componentes devido a altas cargas e vibrações flutuantes. Além disso, acelerações e desacelerações rápidas do motor, como durante as mudanças de transmissão e a inicialização ou desligamento do motor, geram deslizamento entre a correia e a polia, bem como uma forte carga de impacto na correia. Logo, o principal intuito desse dispositivo para os autores foi o da redução das vibrações torcionais entre eles, diminuindo o nível de ruído e vibrações para componentes periféricos ao motor, como o alternador.

Posteriormente, Jansen e Antchak (2009) também descreveram pelo documento de patente N° US 20090176608 a melhoria do dispositivo desacoplador anterior com a utilização de artifícios mecânicos para controlar a tensão da correia

especificamente do alternador pela sua polia. Com a utilização de uma mola de torção em uma embreagem mecânica, objetivaram a redução da tensão da correia do alternador, de forma a diminuir o seu impacto durante a geração de energia elétrica. A mola de torção e a mola da embreagem são enroladas em sentidos opostos, permitindo assim a expansão dessas, acoplando-se à superfície interna durante a aceleração da polia em relação ao coxim. Tal dispositivo permite, portanto, somente o desacoplamento parcial e temporário do alternador ao eixo do motor, permitindo variações de velocidade relativa entre esses. Novamente, o principal intuito dos autores com esse dispositivo foi o de redução de cargas vibracionais e ruídos, não tendo a melhoria da eficiência energética veicular ou redução de emissões como foco e efeito neste cenário.

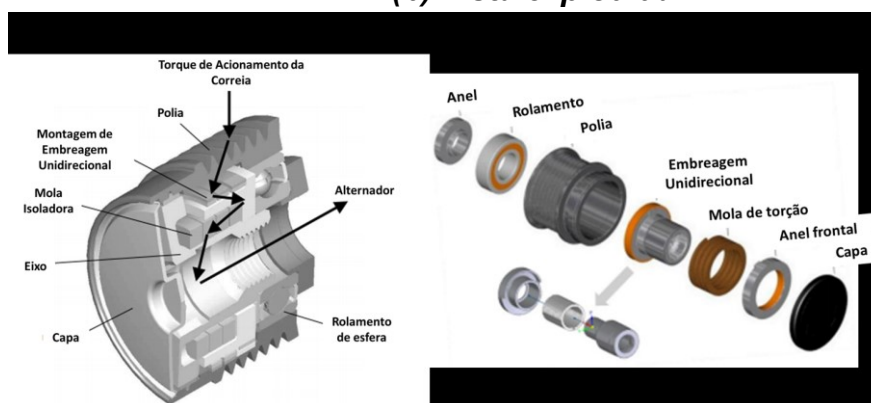
Maiores detalhes deste dispositivo desacoplador foram também descritos em um artigo por Jansen e Antchak (2004), com principal aplicação em alternador. Tal dispositivo foi nomeado como *OAD* (“*Overrunning Alternator Decoupler*”) e industrializado pela empresa *Litens Automotive*, sendo implementado em diversos modelos de veículos posteriormente. Os autores destacam que para uma tensão de correia pré-definida de 200N, o deslizamento da correia na polia do alternador utilizando o dispositivo *OAD* é inferior a 0,5%, enquanto que para um alternador sem o sistema o deslizamento na polia excede 6%. Tal resultado indica que um alternador com esse dispositivo pode funcionar com uma baixa tensão de correia predefinida.

A Figura 24 ilustra os principais componentes do dispositivo *OAD*.

Figura 24 – Dispositivo *OAD*: “*Overrunning Alternator Decoupler*”

(a) Componentes principais

(b) Vista explodida



Fontes: (a) Adaptado de Jansen e Antchak, 2004

(b) Adaptado de Ferreira et al., 2018

Ferreira *et al.* (2018) apresentaram um estudo de potenciais melhorias de eficiência energéticas veiculares com redução de consumo de combustível e emissões de gases a partir da avaliação experimental de múltiplas configurações do “*Front-End Accessory Drive*” (*FEAD*), ou seja, do conjunto de componentes periféricos interligados frontalmente e movimentados pelo motor a combustão a partir de correia ou corrente. Apesar de não apresentar resultados quantitativos, o estudo mostra que a eficiência da transmissão no *FEAD* é aumentada pelo dispositivo *OAD*, atenuando vibrações torcionais no rotor do alternador e indicando a potencialidade desse tipo de dispositivo para a contribuição da redução do consumo de combustível e menor emissão de gases de exaustão.

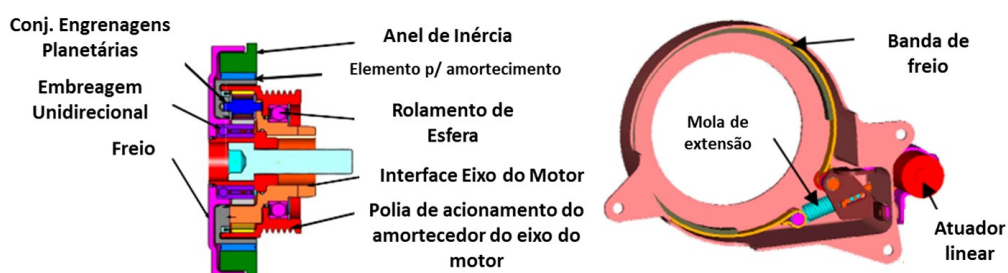
Cho *et al.* (2011) realizaram um estudo em um motor inédito 1.8 litro da montadora Hyundai com aplicação no mercado americano. O conjunto motopropulsor possui diversas tecnologias embarcadas para aumento de rendimento, potência e diminuição de consumo energético e emissões de gases de exaustão. Dentre as tecnologias utilizadas, destaca-se a aplicação de dispositivo *OAD* para o “*Front-End*” desse motor. Segundo esse estudo, foi possível atingir redução de até 0,7% de consumo de combustível somente pela aplicação do dispositivo *OAD*. Tal redução foi motivada pela diminuição de perdas de fricção e inerciais do alternador, além da redução em torno de 28% da tensão aplicada na correia pelo alternador.

Ali *et al.* (2008) descreveram em seu artigo um mecanismo de transmissão de duas “velocidades” conectado ao eixo do motor, nomeado como E^3 , de forma que a velocidade dos componentes do *FEAD* com todos os seus acessórios periféricos seja reduzida em condições de marcha lenta e regime transiente do motor (não somente o alternador, mas também a bomba d’água e compressor do ar condicionado, por exemplo). É importante destacar que esse mecanismo, portanto, representa uma forma de desacoplamento parcial de acessórios conectados ao eixo do motor, visto que durante a sua atuação ainda há acionamento dos componentes do *FEAD* (em velocidade reduzida e com esforços menores). Esse mecanismo possui duas configurações: uma com engrenagens e outra com polias e correias.

Para a primeira configuração, há um conjunto de engrenagens planetárias em que o eixo do motor está conectado à porta planetária, a polia de saída é conectada à coroa e a engrenagem solar é conectada a um sistema de frenagem, ligado a uma embreagem unidirecional, que por sua vez, tem a sua pista interior conectada ao eixo

do motor, conforme ilustrado na Figura 25. Sumariamente, o acionamento e desacionamento do sistema de freio ocasiona uma mudança da razão entre o coeficiente de “velocidade alta e baixa” do sistema, diminuindo esforços de acionamento do eixo do motor para os acessórios. (ALI *et al.*, 2008)

Figura 25 – Dispositivo E³: Configuração com engrenagens



Fonte: Adaptado de Ali *et al.*, 2008

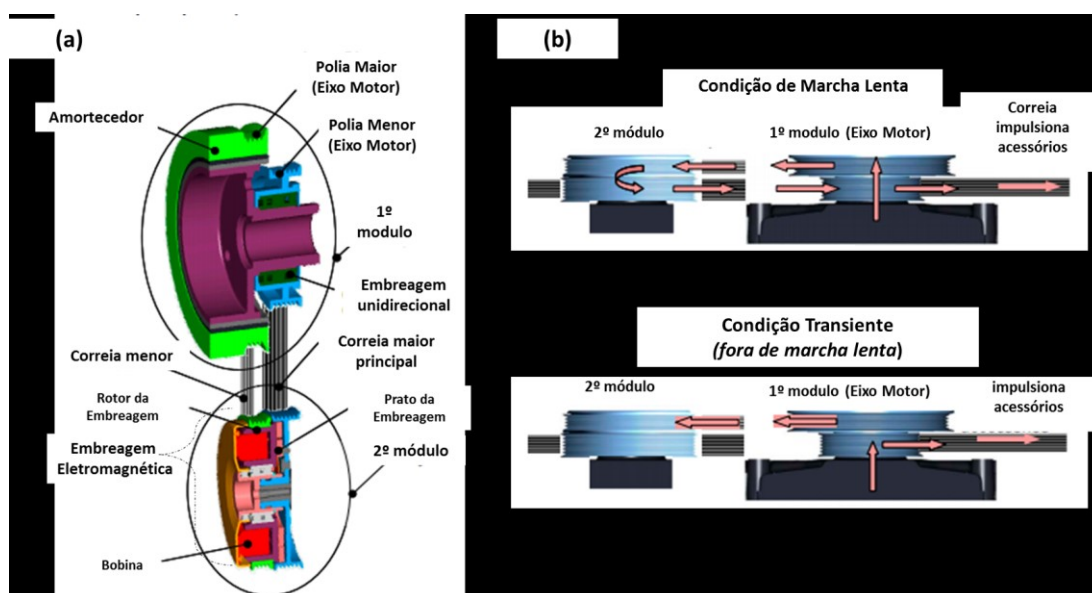
Para a configuração por correias do disposto E³, há dois módulos principais: um módulo montado no conjunto do eixo do motor, sendo uma polia maior rígida conectada ao eixo e outra polia menor também conectada ao eixo através de uma embreagem unidirecional; o segundo módulo é acionado por correia, consistindo em duas polias que podem girar independentemente, conectadas por uma embreagem eletromagnética. Uma correia conecta a polia maior do eixo do motor e a polia externa do segundo módulo, enquanto outra correia conecta a polia menor do primeiro módulo, além da polia interior do segundo módulo e todos os acessórios periféricos frontais do motor (como alternador, bomba d’água, compressor do ar condicionado e bomba de direção hidráulica).

Em marcha lenta, a embreagem eletromagnética fica acoplada, conectando a polia interna e externa do conjunto da embreagem intermediária. Assim, a polia grande do primeiro módulo do eixo do motor impulsiona a polia externa no conjunto da embreagem intermediária. A polia interna do segundo módulo torna-se, portanto, o impulsor dos acessórios. Em regimes transientes do motor (fora de condição de marcha lenta), a embreagem eletromagnética permanece desengatada, desconectando a polia interna e externa do conjunto da embreagem intermediária. O eixo do motor ainda aciona a grande polia maior do primeiro módulo, que impulsiona a polia externa do conjunto da embreagem intermediária. Entretanto, como a embreagem está desengatada, não há energia transferida para a polia interna para

acionar os acessórios. Os acessórios agora são impulsionados pela polia interior menor do primeiro módulo do eixo do motor.

Tal dispositivo E³ com configuração por polias, seus respectivos componentes e funcionamento em regime de marcha lenta e transiente do motor estão ilustrados na Figura 26.

Figura 26 - Dispositivo E³: Configuração com Polias e Correias
(a) Módulos e respectivos componentes
(b) Funcionamento em regime de marcha lenta e transiente do motor a combustão interna



Fonte: Adaptado de Ali *et al.*, 2008

Ali *et al.* (2008) descreveram que testes experimentais foram realizados em veículos com motores diversos dotados de ambas configurações do dispositivo E³, realizando comparações com a configuração base sem o dispositivo, seguindo o ciclo de condução no modo japonês 10-15, o ciclo FTP-75 (regime urbano) e o ciclo rodoviário HW. Tomando como base os testes realizados em um motor 3.8L e com condição de demanda de carga mínima pelos acessórios, houve melhoria da economia de combustível de 1,3% no ciclo urbano, 2,1% em condição de ciclo estrada e 1,5% de ganho pela combinação dos ciclos. Com isso, é importante ressaltar que tais resultados foram obtidos pelo desacoplamento mecânico somente parcial de todos os acessórios frontais ligados ao eixo do motor.

A empresa Bosch desenvolveu uma estratégia para desativar parcialmente o alternador e promover a redução da carga sobre o eixo do motor. A estratégia é descrita nos processos de patente N° DE 19638872 (KOHL *et al.*, 1998) e N° US 7816893 (OSHIMA, 2010). Segundo o documento, em condições específicas é possível desacoplar eletricamente o alternador em relação às cargas elétricas do veículo. A desativação elétrica do alternador ocorre em função do estado de carga da bateria das condições de operação do motor a combustão interna. O estado de carga (SOC) e demais parâmetros da bateria são “lidos” e disponibilizados pelo sensor inteligente da bateria (IBS) por rede protocolada de comunicação veicular local (rede LIN), conforme já descrito. O acoplamento elétrico é promovido quando a bateria atinge um nível mínimo de carga elétrica e necessita de uma recarga. Desta forma, durante os períodos de desacoplamento elétrico do alternador, o carregamento mecânico sobre o eixo do motor é minimizado parcialmente, uma vez que parte do carregamento mecânico ainda permanece em função da massa inercial rotativa presente no eixo do alternador. Desta forma, mesmo que com menor intensidade, o eixo do motor continua com o efeito de um carregamento mecânico, impactando na eficiência energética do motor a combustão interna. Essa tecnologia ficou conhecida comercialmente em aplicações por montadoras como “alternador inteligente” (IAC - *“Intelligent Alternator Control”* ou IGC – *“Intelligent Generator Control”*).

Ripoli *et al.* (2010) descreveram a utilização de tecnologias aplicadas a um veículo com o intuito de redução de consumo de combustível e, conseqüentemente, redução de emissões, de forma avaliar os resultados de cada sistema individualmente e também com aplicação em conjunto. As tecnologias aplicadas foram o controle eletrônico por pulsos (PWM – *“Pulse Width Module”*) do eletroventilador, alternador inteligente (IGC) de alta eficiência (HEG – *“High Efficiency Generator”* - eficiência aumentada em 10% por melhorias em seu layout elétrico comparado a alternadores “comuns”, alcançando até 77% de eficiência) e sistema Stop-Start. Os testes foram realizados em regime urbano, a partir do ciclo FTP-75 e também por ciclo urbano real na cidade de São Paulo. A Tabela 9 expõe os resultados alcançados de reduções (%) no consumo combustível e em emissões de CO₂ por aplicação de tecnologia. A combinação de todas as tecnologias no ciclo urbano real de São Paulo resultou em redução em torno de 21% no consumo de combustível.

Tabela 9 – Resultados de aplicações de tecnologias energéticas em ciclos urbanos

Tecnologias/Ciclos	Ciclo FTP 75		Ciclo Urbano Real (São Paulo)
	Consumo Combustível	Emissões CO2	Consumo Combustível
Eletrorventilador (PWM)	7,60%	7,60%	3,10%
HEG	2,10%	2,10%	0,90%
HEG + IGC	3,10%	3,10%	6,20%
Stop-Start	5,90%	5,80%	13,70%
Combinação Tecnologias (PWM+HEG+IGC+Stop-Start)	-		21,10%

Fonte: Adaptado de Ripoli *et al.*, 2010

Montalto *et al.* (2012) demonstraram em seu artigo o detalhamento de um algoritmo utilizado para aplicação em um alternador inteligente (desacoplamento e acoplamento elétrico), além de avaliação experimental em ciclos de condução FTP-75 e Estrada. Os principais estados descritos de operação do alternador inteligente são: Freio regenerativo (“*Regenerative Braking*”), em que há o aumento da tensão do alternador (acoplamento elétrico) para carregamento da bateria em situações de desacelerações e cut-off; “*Passive Boost*”, em que o alternador é desacoplado eletricamente em situações de demanda elevada de torque do motor, como acelerações; Gerenciamento à frio (“*Cold engine management*”), em que o alternador se encontra desacoplado para reduzir emissões à frio do motor; Desligamento (“*Shutoff*”), em que nos momentos de desligamento do motor, o alternador se acopla eletricamente para aumento de carga e diminuição de tempo de desligamento; Carga rápida (“*Quick Charge*”), em que o alternador se acopla eletricamente na maior tensão possível quando o SOC está muito baixo e Estado estável (“*Steady State*”), em que durante a operação normal, o alternador permanece ciclando, ou seja, acoplando e desacoplando eletricamente para atingir um SOC pré-definido como “*target*”. Os testes experimentais utilizando o ciclo novo de condução europeu (NEDC) resultaram em diminuição de consumo de combustível com redução de 2,0% em emissões de CO₂.

Lakshminarasimhan e Athani (2013) descreveram um sistema de controle inteligente do alternador, sua implementação em um veículo de teste, incluindo o controle, lógicas e medições de energia recuperada e economia de combustível sob diferentes condições de teste. Metodologicamente, foram feitos testes experimentais seguindo o ciclo novo de condução europeu (NEDC), obtendo redução de até 4,5%, além de testes também segundo um ciclo de simulação de condições reais de

rodagem urbana de uma cidade indiana, ocasionando em redução no consumo energético de até 7,1%.

Sohn *et al.* (2013) propuseram um modelo que estima o torque de acionamento do alternador sob várias condições de acionamento, como velocidade do motor, corrente de saída e tensão de geração, de forma a atingir uma tensão “*target*” a partir de um sistema de gerenciamento energético de um alternador inteligente. As equações do modelo foram derivadas a partir do circuito equivalente de um alternador, diagrama fasorial e relação de perda de potência do gerador síncrono. Tal abordagem não refletiu apenas os aspectos e características físicas do alternador do veículo, mas permitiu estimar estados de difícil mensuração, como a tensão induzida e a corrente de campo gerada, possibilitando a análise de comportamentos internos. Na validação do modelo proposto foram constatados erros de 1,7% a 2,5% em comparação com os resultados experimentais que, segundo os autores, são explicados por simplificações realizadas na formulação do modelo para diminuição de complexidade. Conforme explicitado pelos autores, tal modelo pode ser aplicado em casos reais de alternadores inteligentes para otimização de tais sistemas tendo como variável principal de entrada o torque de acionamento do alternador desejado e estimado para operação do alternador e melhorias em sua eficiência energética.

Waldman *et al.* (2015) descreveram o desenvolvimento e a implementação de uma estratégia supervisora do gerenciamento de energia para o sistema elétrico veicular a partir do controle do ciclo de funcionamento do alternador com o principal intuito de minimizar o consumo energético enquanto atende à demanda de corrente dos consumidores elétricos de um veículo. Essa estratégia foi baseada em um modelo orientado para controle do sistema elétrico de 12 Volts de um carro de passeio, capturando a tensão da bateria e seus respectivos fatores, como o seu estado de carga, além da energia consumida pelo alternador. Metodologicamente, foi criado um algoritmo de controle de funcionamento do alternador a partir de forma que as seguintes variáveis fossem respeitadas: estado de carga da bateria deve permanecer entre 80% e 90%; tensão da bateria deve permanecer entre 11,0 V e 14,6 V e taxa de variação de tensão limitada em 0,1 V/s. A estratégia consiste na diminuição do ciclo de trabalho do alternador em momentos de acelerações do motor e alta demanda de carga elétrica para os consumidores elétricos e aumento do ciclo de trabalho do alternador em momentos de desaceleração e corte de combustível (“*cut-off*”), para regeneração de carga da bateria, desde que as condições das variáveis pré-

determinadas citadas anteriormente sejam respeitadas. Em testes experimentais, foi atingido resultado combinado entre ciclo rodoviário e ciclo urbano de redução no consumo energético em torno de 1% pela utilização dessa estratégia de controle do ciclo de trabalho do alternador, em que os autores destacam que não houve custo incremental de novos componentes de hardware para atingir esse resultado, somente aplicação de nova estratégia na calibração de funcionamento do alternador.

Athani *et al.* (2016) desenvolveram um algoritmo capaz de estimar a melhoria no consumo energético causada pela aplicação do alternador inteligente (desacoplamento elétrico), de forma a fornecer tal informação para o usuário de um “veículo conectado”, a partir de sistemas de “*Infotainment*” do veículo (painel de instrumentos e central multimídia) e também dispositivos móveis (aplicativo de celular, por exemplo). Tal algoritmo possui a capacidade de estimar a demanda de torque do alternador inteligente, torque do motor, de forma que esses dois parâmetros são entradas para o cálculo do consumo de combustível, além das demais informações do veículo, como velocidade, rotação do motor, tensão da bateria, estado de carga (fornecidos por sensor IBS) e informação de distância percorrida (odômetro). O modelo foi validado a partir de testes segundo o ciclo novo de condução europeu (NEDC), em que a utilização do alternador inteligente resultou em melhoria em torno de 3%, enquanto o modelo mostrou-se 63% acurado entre as suas previsões e os resultados reais obtidos em ciclo.

Tatur *et al.* (2018) realizaram um estudo focado no alternador e suas estratégias de operações e configurações. Quatro tipos de alternadores e nove tipos de correias com dois layouts diferentes de acionamento foram submetidos aos testes. Na primeira parte do estudo foram avaliados diferentes designs de correias, modos de operação e níveis de tensão para avaliação da eficiência de alternadores sem influência externa. O torque de perda mecânica dos alternadores testados variou de 0,15 Nm a 0,3 Nm a 500 rotações por minuto e 0,39 Nm a 1,05 Nm a 2750 rpm. Essa perda de torque é causada pelos rolamentos e as garras de refrigeração integradas aos alternadores. Esses mostraram uma eficiência de 73% a 75% no melhor ponto de operação (próximo à rotação de 1000 rpm do motor a combustão interna). Na segunda parte do estudo os autores aplicaram algoritmos de operação de alternador inteligente, ocasionando em melhorias no consumo de combustível em relação à configuração original de uma bancada de testes. Comparado a uma tensão de saída constante do alternador de 14,4 V, a estratégia inteligente desenvolvida obteve economia de

combustível de 0,40% para o ciclo de direção US06 em condições de homologação. Sob condições de condução reais, com maior demanda de corrente de consumidores, foram alcançadas economias de 0,86%. Para testes segundo o ciclo FTP-75 (condução urbana em laboratório), foram alcançadas economias de 0,57% e 1,05% em condições reais de condução urbana.

Shin *et al.* (2019) desenvolveram um novo algoritmo para ser aplicado em um alternador inteligente (ou seja, que possui a capacidade de desacoplamento elétrico por variação de tensão) para o gerenciamento energético do alternador em si e do carregamento da bateria veicular. A estratégia de controle proposta é baseada em “regras” para predição da velocidade do veículo para estimar a quantidade de energia elétrica recuperada pela energia residual. Se a bateria descarregar tanto quanto a quantidade de energia elétrica prevista, a recuperação futura da energia residual mantém um nível de carga para armazenamento de energia suficiente. Usando a previsão de energia elétrica e as informações do veículo, três modos de controle são definidos: carga, descarga e estado estável. Este modelo de controle determina o torque do alternador necessário, estabelecendo o ponto “target” do regulador de tensão convencional. Tal modelo de algoritmo, nomeado como PAC (“*Predictive Alternator Controller*” – Controlador Preditivo do Alternador) foi validado por simulações e também experimentalmente a partir de testes em um ciclo real de condução na cidade de Midan (Coréia do Sul), com repetição de 5 testes no mesmo percurso, ocasionando em redução de 2,1% no consumo de combustível. Entretanto, os autores destacam que este método pode ser aplicado apenas a veículos que trafegam na mesma rota repetidamente, visto que as informações preditivas só podem ser estimadas a partir de rotas fixas: como o algoritmo de previsão proposto é projetado apenas com as entradas de velocidade e aceleração, deve-se estendê-lo a uma aplicação mais versátil considerando diversas situações de tráfego e de sistemas de transporte inteligentes, por exemplo, para novas entradas para o modelo de previsão de velocidade.

Apesar dos diversos artifícios para reduzir o efeito do carregamento mecânico do alternador sobre o eixo do motor, além da desativação elétrica parcial, nenhuma das estratégias apresentadas anteriormente promove um completo desacoplamento mecânico do alternador em relação ao motor e conseqüentemente a completa e estratégica desativação elétrica do alternador. Diante desse cenário apresentado, Sales (2015; 2019) descreveu nos processos de Patente Nº INPI BR102015001454-

6 (Brasil), N° US 10.247.265 (EUA) e N° EP 15777859.8 (Europa) um novo alternador junto à sua respectiva estratégia de acoplamento e desacoplamento mecânico e elétrico completos, utilizando-se de uma embreagem eletromagnética. Tal estratégia segue a lógica de operação e carregamento da bateria de forma análoga ao do “alternador inteligente”. Dessa forma, os esforços mecânicos no eixo do motor são diretamente “eliminados”, com o objetivo de redução do consumo energético, bem como das emissões do veículo, além de incremento do seu desempenho e dirigibilidade.

Sales *et al.* (2017) realizaram a avaliação isolada experimental do primeiro protótipo desse novo alternador com desacoplamento eletromecânico, submetendo-o a testes experimentais em veículo segundo ciclo urbano (FTP-75) e ciclo rodoviário (*Highway*). No ciclo urbano, houve redução de 3,09% no consumo de combustível, enquanto que no ciclo estrada houve redução de 2,33%, resultando na redução energética combinada de 2,81%. Conseqüentemente, diminuições nas emissões de CO₂ também foram constatadas: 2,95% para o ciclo urbano e 1,84% para o ciclo estrada.

Este novo alternador com desacoplamento eletromecânico (ADE) aliado à tecnologia Stop-Start foi submetido a novos testes experimentais veiculares, sendo foco das análises experimentais deste trabalho com suas devidas otimizações em sua estratégia de operação, além de melhorias no processo de construção de novos protótipos durante o desenvolvimento desta Dissertação.

Em relação ao sistema Stop-Start, há relatos de sistemas similares que promoveram o desligamento e repartida automáticos de motores e que foram desenvolvidos inicialmente na década de 1970 com o intuito de reduzir as emissões de monóxido de carbono (CO) e para reduzir o consumo de combustível devido à sua escassez pela crise do Petróleo nesta década. Em 1974, foi aplicado um sistema similar em um Toyota Crown, o qual declarava redução de 10% de consumo energético em condução urbana. Nas décadas de 1980 e 1990, foram introduzidos nos modelos Volkswagen Polo, Volkswagen Golf, Audi A2 e Fiat Regata. Entretanto, não atingiram sucesso comercial devido ao alto preço desses sistemas na época e a impopularidade dos motoristas com tais sistemas e sua forma de operação nos veículos (KATIRTZIDIS, 2011).

Silva *et al.* (2009) focaram na análise e simulação de tecnologias consideradas de baixo custo e complexidade para melhoria da eficiência energética veicular. Dentre

as tecnologias estudadas estão o freio regenerativo, o corte de combustível em declives ou desacelerações (“*cut-off*”), downsizing de motores com utilização de sobrealimentação (turbocompressores) e sistema Stop-Start. Para a simulação dos sistemas, os autores utilizaram um código denominado “EcoGest”, que é baseado em equações do comportamento da dinâmica longitudinal de veículos combinados com a simulação numérica do motor e do conversor catalítico. Este código numérico permite simular o desempenho energético e ambiental de um veículo rodoviário numa rota predefinida, responsável pelo comportamento (com ciclos de condução), especificações do veículo, especificações do conjunto motopropulsor, especificações de combustível, número de passageiros e tipo de estrada. O modelo foi usado para simular veículos leves e pesados, incluindo carros e ônibus movidos a gasolina, diesel, gás natural e hidrogênio. Segundo os autores, o sistema pode ocasionar em reduções de até 8% de consumo de combustível em ciclo NEDC, com redução na emissão de CO₂ também em torno disso. A utilização do código com a combinação do sistema Stop-Start, downsizing do motor com utilização de turbocompressor e “*cut-off*” pode resultar em diminuições do consumo de combustível de 15 a 49%, de acordo com a classe do veículo (pequeno, médio, grande), ciclo de condução e eficiência de conversão elétrica para carga e descarga do sistema elétrico, representando um investimento de \$700 a \$1200 comparado a um veículo comum à gasolina com a aplicação destas tecnologias.

Wang *et al.* (2013) desenvolveram uma calibração para sistema Stop-Start aplicada em um veículo automático com motor 1.6 litro turbodiesel. Foram analisados os possíveis casos de utilização e uso do sistema, de forma a cobrir as diversas situações possíveis para funcionamento do sistema em um veículo automático. Dentre os “desafios” elencados pelos autores na calibração deste sistema os principais são relacionados à necessidade de entrega rápida de torque propulsivo de um motor parado, de forma a minimizar a sua partida; a melhoria energética com redução de consumo de combustível oferecida por esta tecnologia deve justificar o custo associado a ele; além disso, o conforto e a conveniência do motorista devem ser minimamente impactados. Os autores destacam que para o teste laboratorial em ciclo FTP-75, 384 segundos de motor em marcha lenta poderiam ser eliminados com a utilização da tecnologia, enquanto que para o ciclo NEDC há oportunidade de eliminação de 280 segundos de marcha lenta do veículo pelo sistema Stop-Start, ocasionando na redução do consumo de combustível durante tais períodos. Em

média, em testes experimentais em laboratório segundo ciclo FTP-75 (urbano), foi atingido uma redução de 3,5% no consumo de combustível com a utilização da estratégia desenvolvida de Stop-Start e aplicada neste veículo.

Martins (2016) realizou um estudo da utilização das tecnologias Stop-Start e gerador fotovoltaico aplicadas a um veículo leve com motor de ignição por centelha com o objetivo de aumento da eficiência energética. Testes experimentais foram realizados em ciclo de condução urbana real no centro da cidade de Belo Horizonte (17 km), com aumento de autonomia (km/l) do veículo em 10,21% e 4,63% na combinação homologativa do ciclo urbano (FTP-75) com o ciclo rodoviário (“*Highway*”). Conseqüentemente, observou-se redução de emissão de CO₂ de 16% no ciclo urbano real e 2,95% na combinação dos ciclos urbano e rodoviário em laboratório.

Athani *et al.* (2018) realizaram um trabalho relacionado à criação de uma configuração por algoritmo aplicado ao sistema Stop-Start de acordo com a aprendizagem de modo condução do motorista para melhoria da experiência do usuário. Os autores destacam que o sistema Stop-Start tradicional gera reclamações dos condutores durante a sua utilização, como a perda de conforto térmico da cabine do veículo durante as paradas automáticas do motor, visto que o sistema de ar condicionado é desligado da mesma forma, e quebra de expectativa em momentos que o motor não desliga automaticamente, visto ao número elevado de variáveis que deve ser atendida para isso. Assim, os autores desenvolveram um algoritmo baseado em “*machine learning*” para a detecção do comportamento real do usuário durante uma parada em marcha lenta do veículo de acordo com alguns eventos iniciais sucessivos durante o uso inicial do veículo com transmissão manual e adaptação adicional do mesmo para o gatilho de um evento de parada automática. Logo, o sistema “aprende” o comportamento do condutor mais usual ao parar um veículo manual (tal como por exemplo se o condutor realmente coloca a alavanca em neutro e desaciona o pedal de embreagem, ou se mantém o veículo engrenado com o pedal de embreagem acionado ou mesmo a ordem mais usual de ações durante uma parada do veículo), de forma a maximizar o número de vezes que o sistema é realmente acionado, com o desligamento e repartida automáticas do motor. Assim, com a utilização desse algoritmo, foi possível obter economia de combustível de 13% em ciclo urbano real, redução de 9,5% em ciclo de rodagem indiano em laboratório (IDC) e redução de consumo energético de 9,0% para novo ciclo de condução europeu de

laboratório (NEDC). Além disso, em escala de 0 a 5, o sistema com o algoritmo implementado foi classificado por um grupo de condutores quanto à experiência de uso com nota de 4,7, em comparação a nota de 3 para o sistema convencional, comprovando o atingimento do objeto de melhoria nesse quesito.

Storey *et al.* (2019) realizaram um estudo de caracterização de um motor a combustão interna 2,5 litros e injeção direta de combustível com sistema Stop-Start, com variação de três tipos de combustível: E0 (100% gasolina), E21 (21% etanol em volume em mistura com gasolina) e iBu12 (12% em volume de isso-butanol em mistura com gasolina). O veículo dotado com este motor foi submetido a testes experimentais em ciclo de condução FTP-75. Um dos principais objetivos deste artigo foi a análise de quantidade de emissão de material particulado, uma vez que caracteristicamente motores com injeção direta em relação a motores com injeção indireta possuem melhor consumo energético; entretanto, emitem mais material particulado durante regime transiente. As emissões em massa de material particulado para E0 e iBu12 mostraram aumento com operação de sistema Stop-Start, enquanto que para o E21 não houve diferença. Conforme visto na Tabela 10, tem-se os resultados alcançados por combustível e suas devidas configurações: com Stop-Start ou sem sistema Stop-Start (“*baseline*”), além da redução percentual atingida em consumo de combustível entre as configurações com Stop-Start e “*baseline*” para o mesmo combustível. Tem-se que a economia de combustível diminui conforme o esperado com a menor densidade de energia das misturas de oxigênio dos combustíveis, especialmente para E21. As reduções de consumo de combustível obtidas foram consistentemente maior no modo Stop-Start, atingindo redução de consumo de até 4,55% em comparação com a configuração “*baseline*”, ou seja, sem a operação do sistema Stop-Start.

Tabela 10 - Resultados de emissões e consumo por variação de combustível e configurações (FTP-75)

Combustível / Configuração / Resultados		CO [g/mi]	CO2 [g/mi]	NOx [g/mi]	THC [g/mi]	MPG [mi/galão]	% Redução Consumo Combustível
E0	Stop-Start	1,17	283,0	0,0031	0,030	29,9000	4,55%
	Baseline	1,30	298,0	0,0050	0,031	28,6000	
E21	Stop-Start	0,75	284,0	0,0075	0,028	27,2000	3,03%
	Baseline	1,06	292,0	0,0080	0,032	26,4000	
iBu12	Stop-Start	0,92	284,0	0,0066	0,024	29,0000	3,57%
	Baseline	0,94	293,0	0,0067	0,024	28,0000	

Fonte: Adaptado de Storey *et al.*, 2019

Bao *et al.* (2019) destacam em seu estudo que veículos com sistema Stop-Start convencionais em ciclo real realizam paradas curtas em semáforos, gerando desligamentos frequentes de curta duração do motor. Os autores destacam que isso pode acelerar excessivamente a deterioração dos componentes do sistema (apesar de serem equipamentos com maior durabilidade em relação a convencionais), além de redução do conforto de condução nestas condições de paradas demasiadamente curtas em semáforos. Em adição, tais paradas curtas com desativação e repartida repentina do motor podem resultar em aumento de consumo energético. Diante disso, com o intuito de cobrir tais situações resolvendo tal situação os autores propuseram um novo tipo de sistema inteligente de Stop-Start, denominado de S-S Visual, o qual utiliza informações de trânsito para sua operação e “tomada” de decisão quanto ao desligamento do motor. A partir da detecção do estado dos semáforos e condições de tráfego por reconhecimento de imagem, o S-S Visual pode determinar se é necessário desligar o motor na sua condição atual de marcha lenta. A utilização desse sistema é permitida a partir de redes neurais que analisam as condições de tráfego em semáforos (tempo restante que permanece em estado vermelho/fechado), sobretudo, inserido no contexto de cidades “inteligentes e conectadas”. Testes experimentais foram feitos na China, visto que algumas de suas cidades já oferecem a infraestrutura necessária para funcionamento do sistema, como as informações de contagem de tempo de semáforos conectadas ao trânsito em tempo real. Assim, o Stop-Start inteligente (S-S Visual) mostra-se promissor para a melhoria do sistema convencional, com potenciais ganhos energéticos pela retroalimentação de informações em tempo real do ambiente, além de ganhos na durabilidade de seus componentes.

Conforme foi visto anteriormente, há estudos diversos que promovem a combinação de tecnologias diferentes de eficiência energética para redução do consumo de combustível e emissão de gás CO₂. Lopes (2018) realizou um estudo de tecnologias aplicadas em veículos automotores considerando as interações entre essas, segundo uma ferramenta estatística experimental (“*Design of Experiments*”). A partir do seu estudo, mostrou-se que a aplicação simultânea de várias tecnologias pode promover efeitos combinados que nem sempre são iguais aos esperados considerando cada tecnologia de forma individual. Os resultados das simulações foram também validados experimentalmente em um veículo de passeio com dez tecnologias energéticas embarcadas, como alternador de alta eficiência, sistema

Stop-Start e alternador “inteligente” (desacoplamento elétrico). Segundo o estudo, maiores interações foram observadas em tecnologias aplicadas no trem de forças do veículo, principalmente motor, transmissão e alternador. Entretanto, não apresentaram interações significativas as tecnologias que reduzem as forças de resistência ao deslocamento (aerodinâmica, inércia, óleo de câmbio e pneu). Além disso, obteve-se erro elevado (em torno de 2,5%) quando não consideradas as interações de tecnologias de eficiência energética na previsão de consumo de combustível quando essas são significativas.

3 METODOLOGIA

Serão apresentados neste capítulo os recursos necessários e utilizados para realização deste trabalho, além dos procedimentos experimentais, descrição dos testes e metodologias de análise estatística para obtenção dos resultados.

3.1 Aparato experimental

Neste Tópico são descritos os materiais utilizados para realização dos testes experimentais, englobando ainda a instrumentação e o protótipo do alternador em foco deste trabalho.

3.1.1 *Características do veículo de teste utilizado*

O veículo utilizado nos testes experimentais possui tração dianteira, transmissão manual de cinco marchas à frente e marcha a ré com sincronizadores para o engate dessas e é dotado de um motor a combustão interna da linha FIRE EVO (*Fully Integrated Robotized Engine*), com cilindrada de 1,0 litro, 8 válvulas e tecnologia *Flex*, ou seja, tem a possibilidade de ser abastecido com os combustíveis gasolina comum, etanol hidratado ou mistura de ambos em qualquer proporção. A gasolina misturada com 22% de etanol anidro (E22) foi o combustível utilizado em todos os testes experimentais realizados nesta pesquisa.

Os dados do motor a combustão interna utilizado nos testes encontram-se na Tabela 11.

Tabela 11 – Especificações do motor a combustão interna utilizado nos testes

Ficha Técnica Motor 1.0 litro FIRE EVO Flex		
Tipo de ciclo de operação	Ignição por centelha	
Combustível	Gasolina/Etanol	
Disposição dos cilindros	4 cilindros em linha	
Número de válvulas por cilindro	2	
Eixo de comando de válvulas	Um (cabeçote)	
Diâmetro x Curso	70,0 x 64,9 mm	
Cilindrada	999,1 cm ³	
Potência Máxima (ABNT,1996)	Gasolina	Etanol
	73,0 cv / 53,7 kW (6250 rpm)	75,0 cv / 55,2 kW (6250 rpm)
Torque máximo (ABNT,1996)	Gasolina	Etanol
	9,5 kgf.m / 93,1 N.m (3580 rpm)	9,9 kgf.m / 97,0 N.m (3580 rpm)
Taxa de compressão	12,15:1	
Sistema de injeção	Injeção eletrônica indireta Magneti Marelli multiponto	
Sistema de ignição	Ignição eletrônica digital Magneti Marelli incorporada ao sistema de injeção	

Fonte: Adaptado de FIAT, 2019

O veículo também é dotado de sistema Stop-Start, que realiza o desligamento do motor em paradas do veículo (conforme descrito no Tópico 2.9). Tal sistema pode ser habilitado/desabilitado manualmente pelo condutor a partir de um botão localizado geralmente no painel do veículo. Esse sistema foi desativado para cada um dos ensaios realizados para as configurações de testes que não previam o seu funcionamento, conforme será explicitado ao longo deste capítulo.

3.1.2 Alternador com desacoplamento eletromecânico (ADE) por embreagem eletromagnética

O protótipo do alternador com desacoplamento eletromecânico (ADE) utilizado neste trabalho foi construído a partir de um alternador convencional que foi equipado com uma embreagem eletromagnética integrada em sua polia, a qual permite com que o eixo do alternador com o rotor seja desacoplado ou acoplado ao eixo do motor.

Assim como em um alternador inteligente o acoplamento e desacoplamento do alternador protótipo dependem principalmente do estado de carga da bateria e regime de funcionamento ou operação do motor. Dessa forma, o desacoplamento mecânico

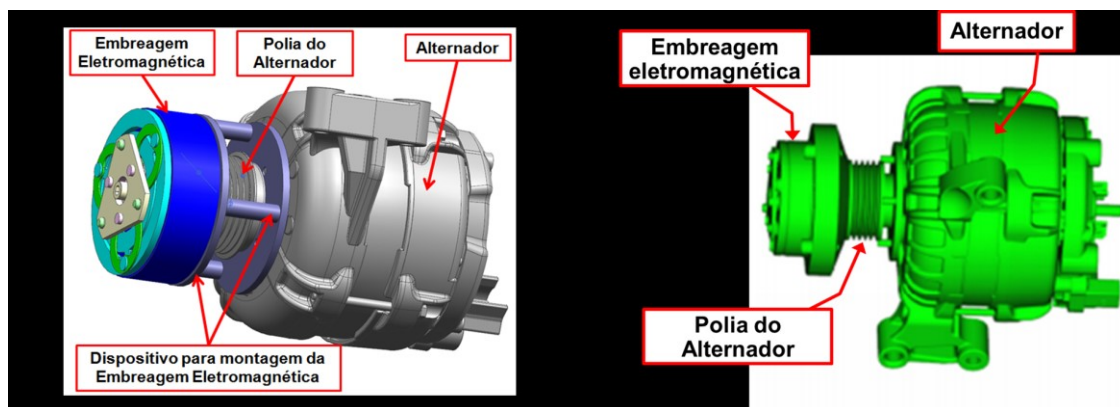
do alternador pode desativá-lo completamente elétrica e mecanicamente, sendo essa a principal diferença em relação ao alternador inteligente, que permite apenas o desacoplamento elétrico. O “alternador inteligente” está descrito juntamente com o sensor inteligente de bateria no Tópico 2.13. O primeiro protótipo de alternador foi contemplado no Processo de Patente Nº INPI BR102015001454-6 (Brasil) (apresentada no Anexo A), bem como seus resultados energéticos obtidos isoladamente por Sales *et al.* (2017).

Para este trabalho, uma evolução do primeiro protótipo construído foi realizada, com modificações no dispositivo de montagem da embreagem eletromagnética. Removeu-se, por exemplo, as hastes do dispositivo de montagem da embreagem eletromagnética, aumentando-se a manutenibilidade do conjunto alternador e embreagem, visto que a troca da correia da polia (quando necessária) é facilitada. Isso faz com que o protótipo mais recente e evoluído seja o mais próximo de ser industrializado em larga escala entre os dois. Além disso, outros detalhes construtivos do conjunto do alternador com desacoplamento eletromecânico foram melhorados no protótipo mais recente, como o ajuste de folgas, lubrificação e montagem, com o intuito de melhorar a confiabilidade e durabilidade do sistema para os testes experimentais deste trabalho.

A Figura 27 apresenta os detalhes construtivos do primeiro protótipo do alternador (a) e também os detalhes do protótipo mais evoluído utilizado nesta pesquisa (b).

Figura 27 – Protótipos do ADE equipado com a polia integrada à embreagem eletromagnética

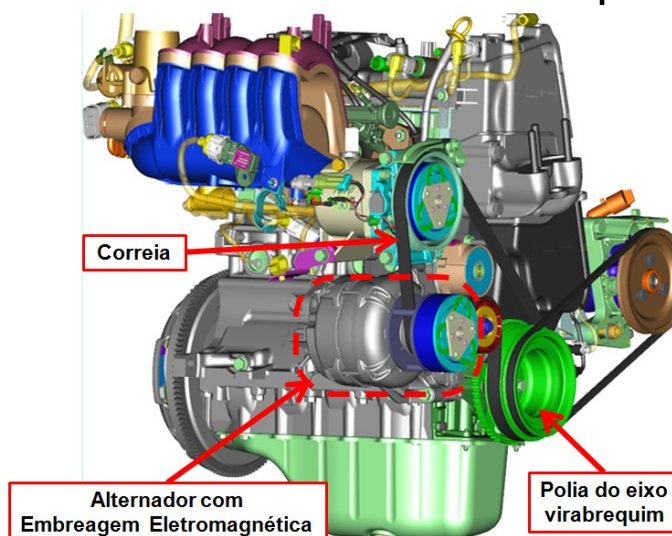
- (a) 1º protótipo do alternador com desacoplamento eletromecânico
 (b) 2º protótipo do alternador com desacoplamento eletromecânico utilizado neste trabalho (evolução do 1º protótipo)



Fontes: (a) Adaptado de Sales, 2015
 (b) Autor, 2020

A Figura 28 ilustra o posicionamento do conjunto alternador e embreagem eletromagnética no motor a combustão interna utilizado neste trabalho, com a sua conexão à polia do eixo do motor a partir de uma correia (nesta Figura, ilustra-se o primeiro protótipo, entretanto, o posicionamento do segundo protótipo - o qual foi utilizado neste trabalho – no conjunto frontal do motor é o mesmo ilustrado).

Figura 28 – Conjunto alternador e embreagem eletromagnética conectado à polia do eixo do motor a combustão interna por correia



Fonte: Dados da pesquisa, 2020

O protótipo utilizado de alternador com desacoplamento eletromecânico é constituído de um alternador convencional de alta eficiência de 150 A.h, bem como de uma embreagem eletromagnética integrada à sua polia. A Tabela 12 apresenta as especificações do alternador e da embreagem eletromagnética utilizados nesta pesquisa. Alongou-se o eixo do alternador para integrar o conjunto de polia e embreagem eletromagnética.

Tabela 12 – Especificações do alternador e embreagem eletromagnética

Alternador	
<i>Tensão</i>	12 V - 14 V
<i>Corrente</i>	85 A - 150 A
<i>Diâmetro da polia</i>	54 mm
<i>Inércia de rotação</i>	26 Kg.cm ²
<i>Relação de transmissão (alternador/ eixo do motor)</i>	2,397:1
Embreagem Eletromagnética	
<i>Diâmetro externo</i>	115 mm
<i>Tensão de alimentação</i>	12 V
<i>Corrente</i>	1,8 A

Fonte: Dados da pesquisa, 2020

3.1.2.1 Estratégia para desacoplamento e acoplamento do ADE

O sistema computacional Labview da empresa “*National Instruments*” foi utilizado para programação da estratégia de acoplamento e desacoplamento do alternador protótipo utilizado neste trabalho. Este programa realiza o comando de dois relés do sistema de controle do alternador, funcionando como chaves para alimentação elétrica da embreagem eletromagnética e ADE, sendo que um dos relés é responsável pelo acionamento mecânico, enquanto o segundo controla o acionamento elétrico do alternador. Os relés permitem a alimentação elétrica da embreagem eletromagnética para acoplamento ou, em caso contrário, garante o desacoplamento em função dos sinais de estado de carga da bateria, rotação do motor a combustão interna, velocidade do veículo e posição do pedal do acelerador.

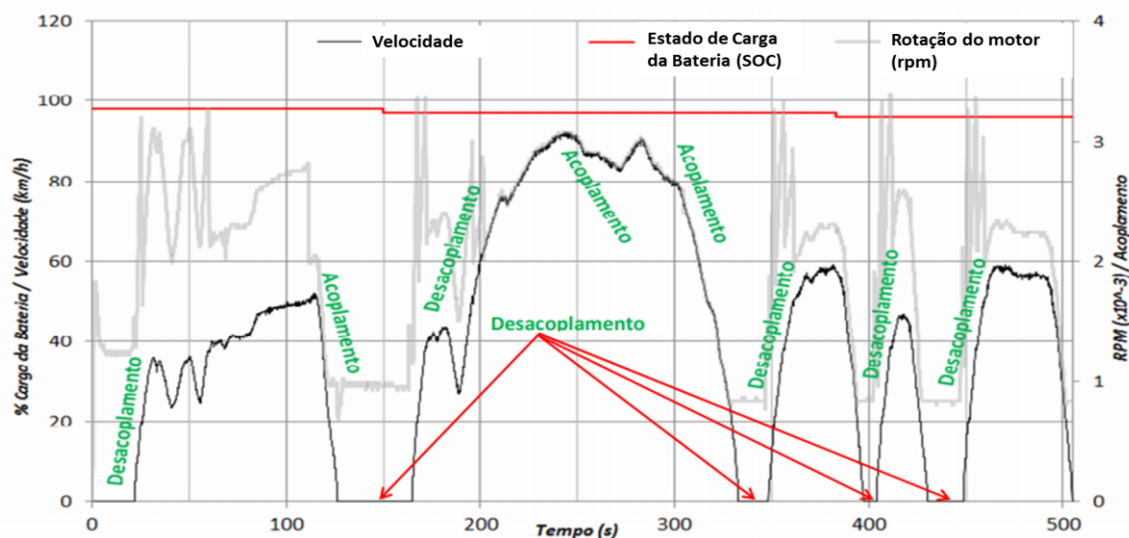
Tem-se a ocorrência de desacoplamentos caso o estado de carga da bateria seja igual ou maior a 75% nas acelerações, além de em regimes de rotações com

variação mínima do pedal do acelerador e de marcha lenta. Com isso, evita-se o carregamento do eixo do motor pela inércia da massa rotante do alternador, além do carregamento promovido pelo campo eletromagnético da geração de energia elétrica do rotor do alternador. Em contrapartida, os acoplamentos ocorrem para regimes de desaceleração, com o propósito de regeneração de energia. É importante destacar que os desacoplamentos somente são promovidos quando é garantido que o estado de carga da bateria esteja acima de 75%. Para percentuais menores a esse limite inferior, o alternador permanecerá acoplado, mesmo em acelerações, priorizando o carregamento da bateria.

A análise pelo sistema da característica do regime de funcionamento do motor é um aspecto primordial da estratégia funcional de desacoplamento e acoplamento do alternador protótipo. Na desaceleração, com motor engrenado na transmissão, o sistema antes de acoplar a embreagem avalia a sequência de dados referentes à rotação do motor por um período de 1,0 segundo. Se as características confirmam a desaceleração, a embreagem acopla o alternador mecanicamente e, somente após 2,0 segundos, se permite a liberação da energia elétrica para a bateria (acoplamento elétrico). Os dois eventos são defasados para minimizar o impacto mecânico sobre o conjunto de motor e transmissão. Para os desacoplamentos, o mesmo tipo de análise é realizada, entretanto durante 5,0 segundos para os dados de estado de carga da bateria, rotação do motor e velocidade do veículo. Logo, o desacoplamento elétrico ocorre antes do mecânico, defasados em 0,5 segundo. Tais tempos podem ser ajustados pelo programa de sistema. A determinação desses valores foi feita de forma experimental, com o intuito de reduzir a percepção de possíveis impactos mecânicos de acoplamento no conjunto motopropulsor do veículo, melhorando a sua dirigibilidade. Tal estratégia está contemplada nos processos de patente N° INPI BR102015001454-6 (SALES, 2015), Patente N° US 10.247.265 (SALES, 2019) e Patente N°EP 15777859.8 (SALES, 2019).

A estratégia de operação do alternador protótipo em função da rotação do motor a combustão interna, velocidade do veículo e estado de carga da bateria está representada na Figura 29.

Figura 29 – Representação da estratégia de desacoplamentos e acoplamentos em função do regime de funcionamento do motor a combustão interna e velocidade do veículo



Fonte: Dados da pesquisa, 2020

3.1.3 IBS e bateria veicular

O sistema elétrico do veículo utilizado nesta pesquisa é dotado de um “sensor inteligente da bateria” (IBS), com funcionamento explicitado no Tópico 2.7.3. Tal sensor associa-se ao polo negativo da bateria veicular com as especificações de 12 V, 350 A e capacidade de 60 Ah.

3.1.4 Sistema de controle do ADE protótipo e coleta de dados

Conforme explicitado, o sistema de controle e coleta de dados do alternador protótipo com desacoplamento eletromecânico é constituído de módulos da empresa “National Instruments” reunidos em uma central da empresa Nirax, além de um programa computacional desenvolvido em plataforma Labview.

3.1.4.1 Equipamentos para instrumentação

A central da empresa “Nirax” utilizada nessa pesquisa constitui-se de um controlador, módulos da fabricante “National Instruments” e um gabinete, conforme descritos a seguir:

- NI CompactRIO 9035 85T: Controlador de alto desempenho com CPU *dual-core* de 1,33 GHz com oito *slots* para módulos;
- NI 9221: Módulo com entradas analógicas com 08 canais para medições em alta velocidade em uma faixa de ± 60 V (tensão direta);
- NI 9860: Módulo para aquisições de sinais das redes veiculares CAN e LIN;
- NI 9205: Módulo de entrada analógica com 32 canais para leitura de sensores e/ou instrumentos na faixa de ± 200 mV a ± 10 V;
- Gabinete: Permite o acondicionamento e instalação dos módulos utilizados na pesquisa (fabricado em aço), conforme ilustrado na Figura 30.

Figura 30 – Gabinete com módulos para controle e coleta de dados



Fonte: Arquivo do autor, 2020

Além disso, foi utilizado um “*shunt*” de 150 A para 60 mV. Esse componente é tipicamente um resistor utilizado em um circuito elétrico para ligar dois pontos, promovendo uma ligação em paralelo com o medidor de corrente, permitindo com que esse opere em circuitos de correntes elevadas. O “*shunt*” utilizado na pesquisa possui resistência de $0,0004 \Omega$, interferindo minimamente na medição.

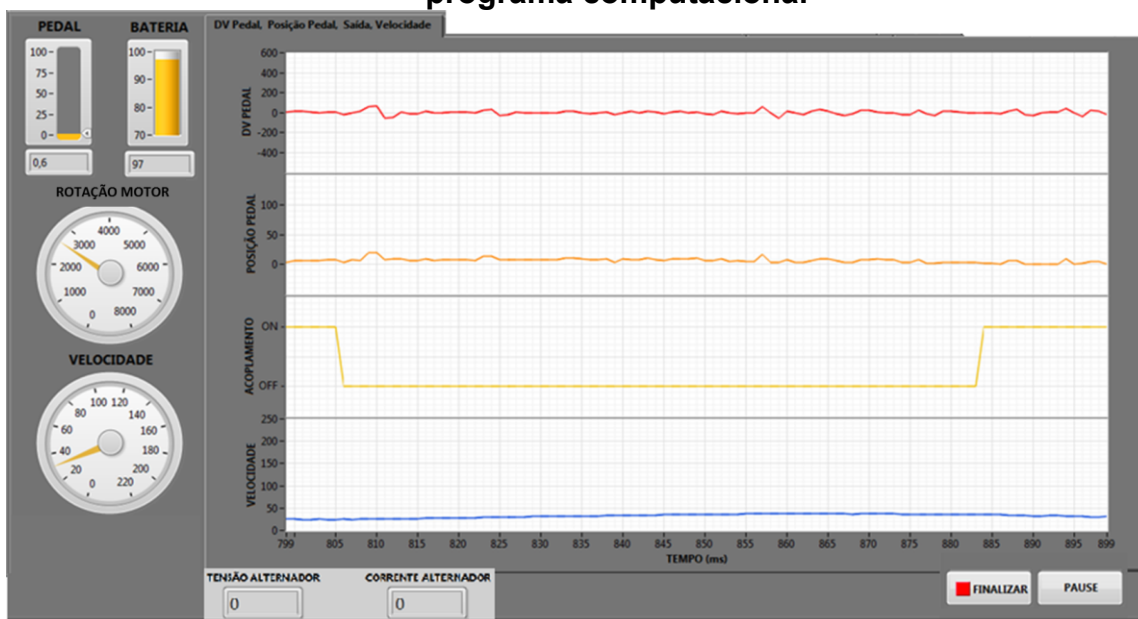
3.1.4.2 Programa computacional

O programa computacional desenvolvido e utilizado na pesquisa foi criado utilizando a plataforma NI LabVIEW. O sistema foi criado a partir de camadas, responsáveis pelas seguintes funções: interface, aquisição de dados, controle de ambiente, gravação e geração de gráficos.

A Figura 31 mostra uma das interfaces do programa computacional, em que se têm gráficos de variáveis de saída dos testes, como derivada do pedal acelerador e

porcentagem de acionamento (além da forma gráfica, há um mostrador em barras digitais com dado instantâneo), acoplamento do alternador e velocidade do veículo (também em formato de mostrador instantâneo). Mostradores com a porcentagem de estado de carga da bateria e rotação do motor por minuto (“giro”) também estão presentes. Dados instantâneos de tensão (em Volts) e corrente (em Amperes) do alternador também podem ser visualizados nesta aba.

Figura 31 – Exemplos de parâmetros coletados nos testes e visualizados no programa computacional

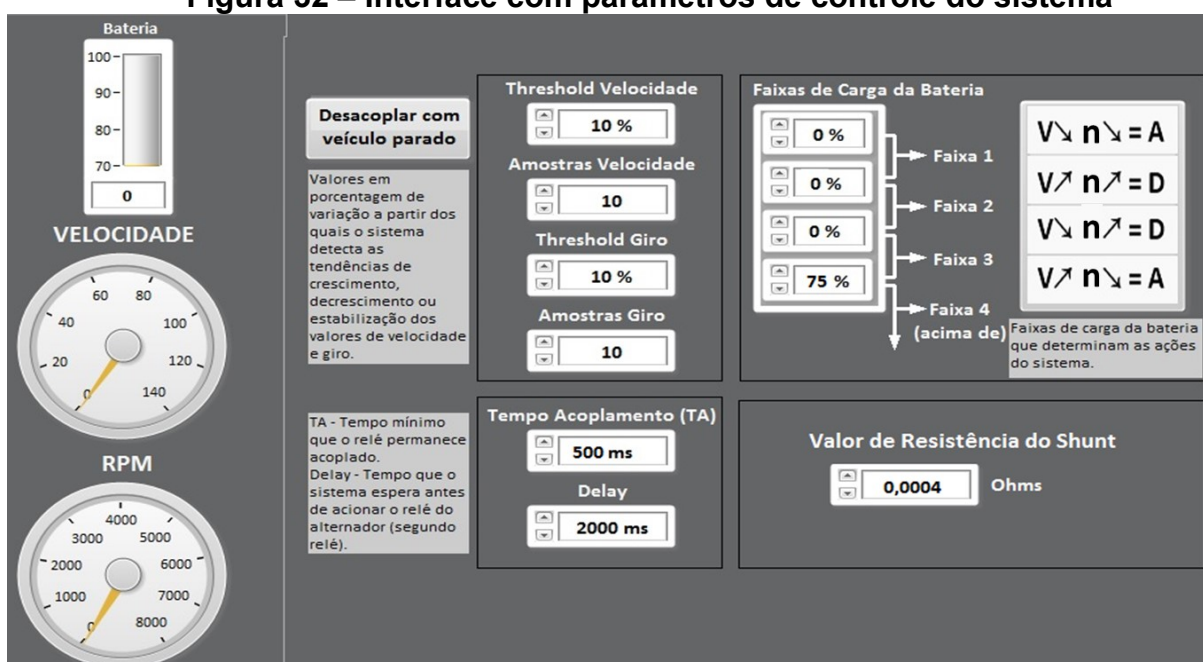


Fonte: Arquivo do autor, 2020

A Figura 32 mostra uma interface do programa computacional destinada ao controle do ambiente e dos componentes do sistema. Pode-se controlar, conforme visto na Figura, as faixas de carga da bateria e ações respectivas para cada uma, o valor da resistência do “*shunt*” do alternador escolhido (o adotado nos testes possui resistência de $0,0004 \Omega$), o tempo mínimo de acoplamento mecânico do sistema (nos testes foi adotado 500 milissegundos), tempo de “atraso” do acionamento do relé elétrico do alternador após acoplamento mecânico (nos testes foi adotado 2000 milissegundos, ou seja, 2 segundos). Além disso, pode-se controlar o número de amostras de velocidade analisadas pelo sistema para tomada de decisão de acoplamento ou desacoplamento (adotado o número de 10 amostras nos testes deste trabalho) e a inclinação da velocidade e “giro” do motor (“*threshold*”) para atuação das estratégias do sistema, de forma que quanto maiores as inclinações adotadas, maior

atuação do sistema em acelerações ou desacelerações bruscas (nos testes, foram adotadas os valores de inclinação que proporcionaram melhores resultados experimentais). Escolhe-se ainda a possibilidade de desacoplamento do alternador em marcha lenta (opção escolhida para os testes desta pesquisa). As estratégias adotadas para acoplamento (A) e desacoplamento (D), a partir do acréscimo ou decréscimo de velocidade (V) associado à elevação ou diminuição da frequência do motor (n), também são relacionadas, conforme visto na porção superior direita da Figura 32.

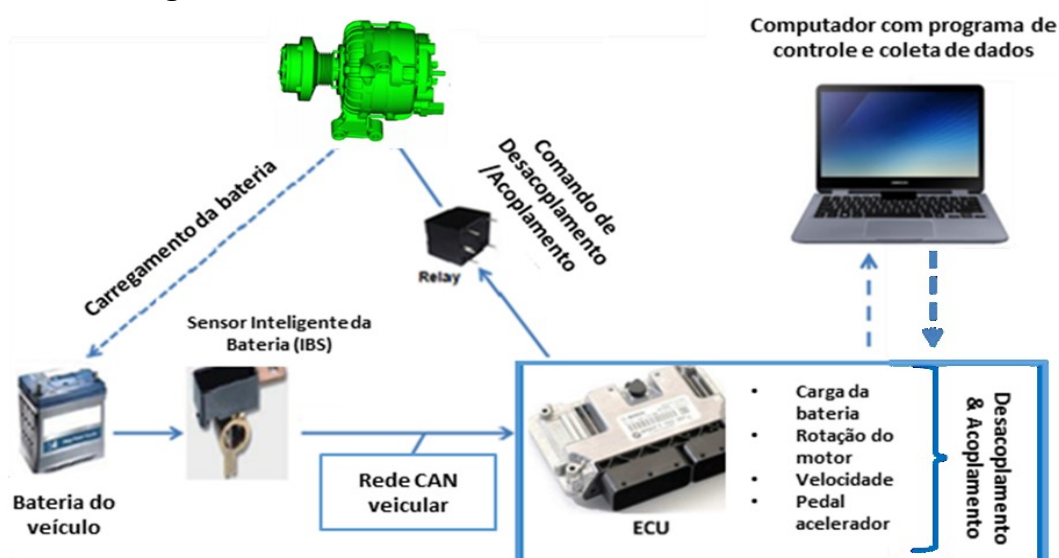
Figura 32 – Interface com parâmetros de controle do sistema



Fonte: Adaptado de dados da pesquisa, 2020

O sistema de controle do alternador protótipo (ADE) e seu funcionamento estão ilustrados esquematicamente na Figura 33. A partir de parâmetros da rede CAN como rotação do motor, velocidade do veículo, porcentagem de acionamento do pedal acelerador e estado de carga da bateria (obtidos por medidas do sensor inteligente da bateria), o sistema de controle por LabVIEW comanda a estratégia de acoplamento ou desacoplamento do alternador. Os comandos de acoplamento ou desacoplamento são sintetizados por relés. Com isso, têm-se o carregamento intermitente da bateria veicular, de acordo com as condições previstas por estratégias.

Figura 33 – Sistema de controle do ADE e coleta de dados



Fonte: Arquivo do autor, 2020

3.1.5 Aparato para os testes de emissões e consumo de combustível

Foram realizados ensaios no Laboratório de Emissões da FCA – Fiat Chrysler Automóveis, segundo as normas ABNT 7024 (2017) e ABNT NBR 6601 (2012), para determinação do consumo de combustível das configurações de teste abordadas neste trabalho. Esse laboratório é acreditado pelo INMETRO desde 1998. O consumo de combustível foi determinado por 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, estabelecendo relação direta com o consumo de combustível. Apesar de também se coletar as emissões de NOx, essas não serão consideradas neste estudo, visto que não são contribuintes para a determinação do consumo de combustível.

Segundo a norma ABNT NBR 6601 (2012), os veículos que serão submetidos aos ensaios de emissões devem ser acondicionados anteriormente ao teste em ciclo urbano (FTP-75) em ambiente com temperatura entre 20 °C e 30 °C por no mínimo 12 horas e máximo 36 horas.

O dinamômetro de chassi do Laboratório de Emissões foi utilizado nos ensaios com a função de simulação da resistência ao deslocamento do veículo de teste em um ambiente controlado. A Tabela 13 possui as principais características técnicas do dinamômetro utilizado nos testes deste trabalho.

Tabela 13 – Características técnicas do dinamômetro de chassi do Laboratório de Emissões

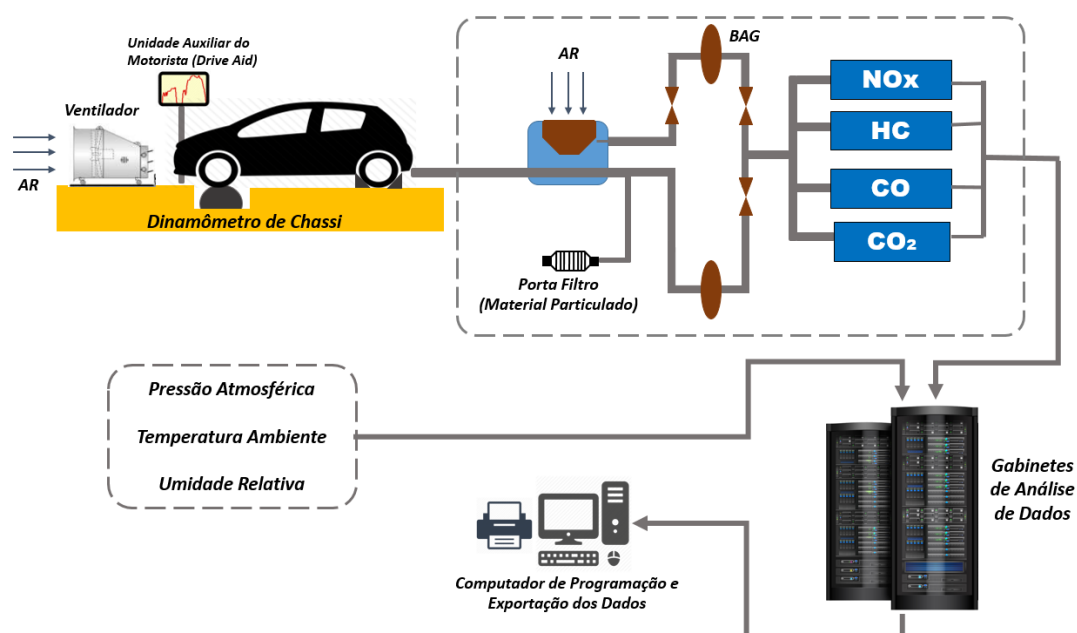
<i>Fabricante</i>	AVL - Zöllner
<i>Modelo</i>	ROADSIM
<i>Diâmetro do rolo</i>	1219,2 MM
<i>Faixa de massa inercial simulada</i>	454 kg - 2500 kg
<i>Potência máxima de pico</i>	220 kW
<i>Faixa de velocidade operacional</i>	0 - 160 km/h (0,01% de resolução do fundo de escala)

Fonte: AVL, 2019

A potência resistiva do veículo (condições de carga) é simulada a partir da unidade elétrica de absorção de energia do dinamômetro. Tal potência de resistência é dependente de fatores com a inércia equivalente, desaceleração do veículo, arrasto aerodinâmico e resistência. A inércia do veículo, por sua vez, é simulada a partir de um conjunto de massas acopladas ao eixo do rolo do dinamômetro, de forma a reproduzir o efeito dinâmico do movimento equivalente linear veicular. (SALES, 2010)

A Figura 34 ilustra uma representação esquemática do Laboratório de Emissões e Consumo de combustível com seus respectivos instrumentos e equipamentos partes dos processos.

Figura 34 - Representação esquemática do Laboratório de Emissões e Consumo de Combustível



Fonte: Autor, 2020

O amostrador dos gases de exaustão é do tipo “volume constante” (AVC), o qual permite com que as massas reais das substâncias emitidas pelo motor a partir do tubo de exaustão do veículo em teste. Coleta-se e analisa-se constantemente parte do volume total da mistura dos gases de exaustão pelo ar de diluição. Os balões de coleta de amostras de ar de diluição e para os gases de exaustão diluídos (indicados como “bags” no desenho esquemático da Figura 42) possuem materiais especiais com o intuito de inibir alterações e desvios das análises. Dessa forma, os analisadores de CO₂, CO e HC realizam as respectivas análises das amostras coletadas e armazenadas nos balões ao longo dos ensaios de emissões.

A medição dos hidrocarbonetos totais (HC) é realizada a partir da passagem desses gases por uma chama de hidrogênio, produzindo corrente iônica proporcional à quantidade de carbono total presente (expressada em ppmC). Utiliza-se o propano (C₃H₈) como gás de referência pela resposta ser três vezes maior do que a do metano (CH₄), com somente um carbono por molécula. Aquece-se a linha de coleta para análise em tempo real com uma faixa de medição de até 3000 ppmC ($\pm 0,5\%$). A faixa de medição dos balões de coleta chegam a até 300 ppmC ($\pm 0,5\%$). Para medição de gases CO₂ e CO são utilizados detectores por absorção de raios infravermelhos não dispersivos (NDIR), em que se introduzem as amostras dos gases em câmara com luz infravermelha. Em seguida, pela composição do gás detectado, um comprimento de onda específico é selecionado e esse absorve luz, diminuindo a sua intensidade na saída da câmara. Logo, a partir de uma luz de referência, a sua intensidade é comparada, resultando em uma diferença e, finalmente, se obtendo a composição da respectiva amostrada concentrada. A análise em tempo real também é realizada a partir do aquecimento da linha de coleta, com faixa de medição até 20000 ppmC ($\pm 0,5\%$). Para os balões de coleta de gases CO e CO₂, a faixa de medição é de até 1000 ppmC ($\pm 0,5\%$). (SALES, 2010)

3.2 Procedimentos experimentais

3.2.1 Configurações dos testes experimentais

A Tabela 14 explicita as configurações adotadas e analisadas durante os testes experimentais neste trabalho. A partir das seis configurações adotadas, pode-se analisar os efeitos separadamente da aplicação das tecnologias de alternador inteligente, sistema Stop-Start e alternador com desacoplamento eletromecânico (ADE) no consumo energético e emissão de CO₂, bem como os efeitos da aplicação combinada de tais sistemas. Deve-se destacar, portanto, que para as configurações em que haja a operação cíclica do ADE, ou seja, em que se têm a atuação estratégica de desacoplamento eletromecânico pela embreagem eletromagnética, há consequentemente também a ativação do alternador inteligente (desacoplamento elétrico).

Conforme norma do Laboratório de Emissões em que os testes foram realizados, no mínimo três ensaios devem ser realizados para cada configuração, com o objetivo de se obter repetitividade de no máximo 0,005 para consumo energético (MJ/km) entre os testes (considerando-se para o cálculo da incerteza expandida infinitos graus de liberdade e nível de confiança de 95%, ou seja, o fator de abrangência K da distribuição t-Student foi adotado como igual a 2).

Tabela 14 – Características das configurações de tecnologias adotadas para os testes experimentais

Configurações		Características
1	Baseline	<i>Embreagem eletromagnética acoplada (alternador convencional), com sistema Stop-Start e alternador inteligente desativados.</i>
2	Somente Alternador Inteligente	<i>Alternador inteligente ativado e sistema Stop-Start desligado</i>
3	Somente S-S	<i>Embreagem eletromagnética conectada (alternador convencional) durante os testes e sistema Stop-Start ligado com alternador inteligente desligado</i>
4	Somente ADE	<i>Embreagem eletromagnética operando de forma estrategicamente "cíclica" (acoplando e desacoplando mecânica e eletricamente o alternador) durante os testes com o sistema Stop-Start desligado.</i>
5	Alternador Inteligente + S-S ligado	<i>Alternador inteligente ativado e sistema Stop-Start ligado com embreagem sempre acoplada (acoplamento/desacoplamento do alternador somente elétrico)</i>
6	ADE + S-S ligado	<i>Embreagem eletromagnética operando de forma estrategicamente "cíclica" (acoplando e desacoplando mecânica e eletricamente o alternador) durante os testes combinado com o sistema Stop-Start ligado</i>

Fonte: Autor, 2020

3.2.2 Ciclos de emissões urbano e estrada

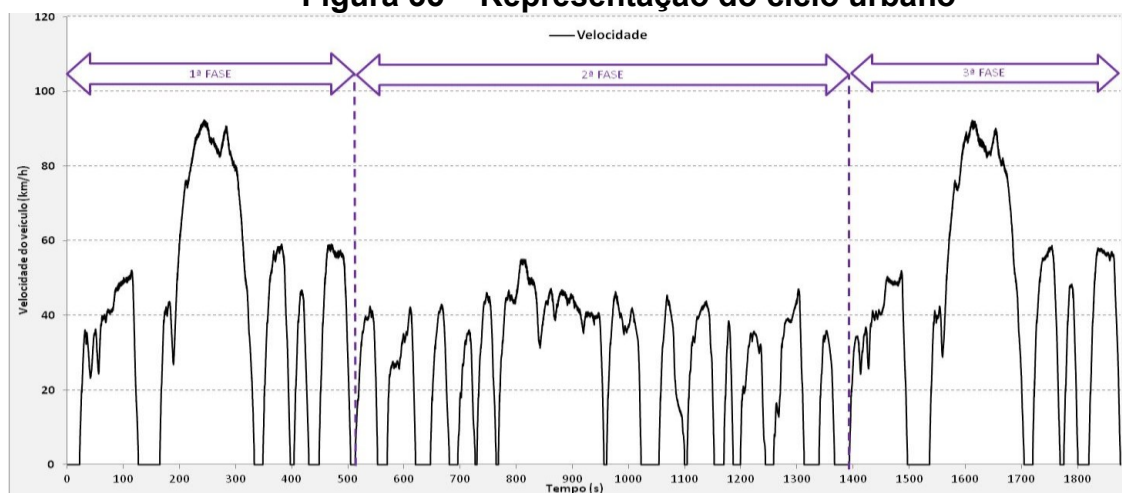
O veículo de teste utilizado neste trabalho foi submetido a ensaios de laboratório de emissões e consumo por ciclos de condução que simulam a circulação em centro urbano e em percurso rodoviário, seguindo um programa de direção com diagrama de velocidade por tempo. Esses ensaios são realizados para se determinar a emissão em massa de hidrocarbonetos totais e não metano, monóxido de carbono e dióxido de carbono, para obtenção do consumo de combustível pelo balanço de carbono.

Para simulação do percurso em centro urbano, realiza-se testes denominados como ciclo urbano. Esse ciclo é dividido em três fases: com duração de 505 segundos, a 1ª fase é a fase transitória com partida a frio; a 2ª fase (estabilizada) tem duração de 866 segundos, iniciando-se imediatamente após a 1ª; e em seguida, após intervalo de 10 minutos \pm 1 minuto, inicia-se a 3ª fase com partida a quente (caracterizada como fase transitória com partida a quente). As distâncias percorridas em quilômetros são registradas em cada fase, assim como as massas das emissões, que são determinadas pelas concentrações finais da amostra e do volume total da mistura obtido em cada fase do ensaio. Logo, o resultado das emissões em ciclo urbano total é resultado da média ponderada entre as três fases, sendo obtido em g/km (ABNT NBR 6601, 2012).

Para a simulação do percurso rodoviário e determinação das respectivas emissões neste perfil de condução tem-se o ciclo estrada, em que o veículo segue duas fases de condução idênticas com duração de 767 segundos cada etapa. A primeira fase é utilizada para o pré-condicionamento do veículo, sem medição dos gases de exaustão. Já na segunda fase são realizadas as medições de massa de monóxido de carbono, dióxido de carbono e hidrocarbonetos totais e não metano, de forma se obter o consumo de combustível por balanço de carbono.

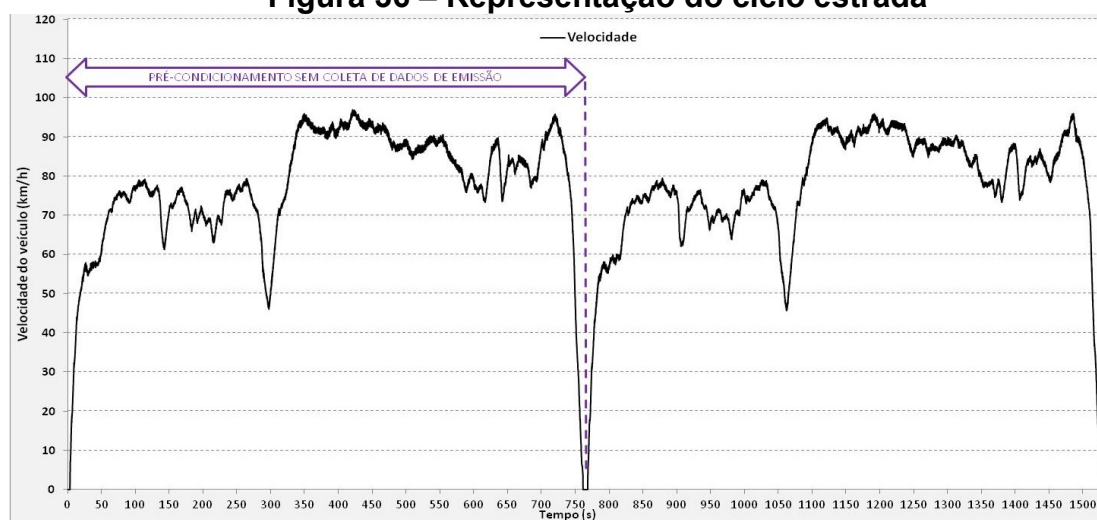
As Figuras 35 e 36 apresentam diagramas característicos com perfil de condução para o ciclo urbano e ciclo estrada, respectivamente, sendo que o intervalo de 10 minutos entre a 2ª e 3ª fase do ciclo urbano não foi representado para fins de simplificação.

Figura 35 – Representação do ciclo urbano



Fonte: Dados da pesquisa, 2020

Figura 36 – Representação do ciclo estrada



Fonte: Dados da pesquisa, 2020

3.2.3 Determinação das emissões no ciclo urbano e estrada

Segundo a norma ABNT NBR 6601 (2012), determina-se os resultados de emissões finais dos gases da exaustão considerados para a determinação do consumo de combustível pelo balanço de carbono (CO, CO₂ e HC) pelas somas ponderadas dos poluentes em massa (g/km), considerando tanto o ciclo urbano quanto o ciclo estrada.

Para o ciclo estrada, obtém-se as emissões em massa (g/km) de forma direta pelas medições que foram realizadas nos 767 segundos logo após a 3ª fase do ciclo urbano (posterior ao pré-condicionamento do veículo).

Para o ciclo urbano, as emissões são determinadas a partir da Equação 10 (NBR 6601).

$$Y_{MP} = 0,43 \cdot \left(\frac{Y_1 + Y_2}{D_1 + D_2} \right) + 0,57 \cdot \left(\frac{Y_3 + Y_2}{D_3 + D_2} \right) \quad (10)$$

Sendo:

Y_{MP} : Emissão ponderada de cada componente do gás emitido (CH₄, THC NMHC, CO, CO₂) [g/km];

Y_1 : Emissão em massa de cada componente do gás emitido na fase transitória (1ª fase) com partida a frio, em gramas;

Y_2 : Emissão em massa de cada componente do gás emitido na fase estabilizada (2ª fase), em gramas;

Y_3 : Emissão em massa de cada componente do gás emitido na fase transitória com partida a quente (3ª fase), em gramas;

D_1 : Distância percorrida pelo veículo considerando medição durante a fase transitória com partida a frio (1ª fase), em km;

D_2 : Distância percorrida pelo veículo considerando medição durante a fase estabilizada (2ª fase), em km;

D_3 : Distância percorrida pelo veículo considerando medição durante a fase transitória com partida a quente (3ª fase), em km.

3.2.4 Cálculo do consumo de combustível pelo método de balanço de carbono

O consumo de combustível é calculado a partir da norma ABNT NBR 7024 (2017). Os gases de exaustão do veículo em teste são coletados e analisados durante as fases do ciclo urbano e estrada, segundo a norma ABNT NBR 6601 (2012).

A partir das massas de hidrocarbonetos totais (THC), monóxido de carbono (CO) e dióxido de carbono (CO₂), em g/km (emitidos pelo motor do veículo durante os ciclos), obtém-se o consumo de combustível na unidade l/100 km.

Tal cálculo é regido pela seguinte Equação 11.

$$C = \frac{[(0,8656 \cdot m_{THC}) + (0,4288 \cdot m_{CO}) + (0,2729 \cdot m_{CO_2})] \cdot (100 + \%V_{H_2O})}{(6,4487 \cdot \%V_{gas}) + (4,1102 \cdot \%V_{ETOH})} \quad (11)$$

Sendo:

C : Consumo de combustível em litros por 100 quilômetros;

m_{THC} : Massa de THC emitida, em gramas por quilômetro;

m_{CO} : Massa de CO emitida, em gramas por quilômetro;

m_{CO_2} : Massa de CO₂ emitida, em gramas por quilômetro;

$\%V_{gas}$: Porcentagem, em volume a 20°C, de gasolina no combustível utilizado

(No álcool etílico hidratado combustível, admite-se $V_{gas}=0$);

$\%V_{ETOH}$: Porcentagem, em volume a 20°C, de etanol no combustível utilizado;

$\%V_{H_2O}$: Porcentagem, em volume a 20°C, de água no combustível utilizado

(Tem-se que para as misturas de gasolina e álcool etílico anidro, admite-se $\%V_{H_2O} = 0$).

Para o consumo total de combustível do ciclo estrada, considera-se as massas emitidas de CO₂, CO e HC ou então o volume ou massa de combustível consumido, considerando-se também a distância total percorrida no percurso rodoviário.

Para o consumo de combustível em ciclo urbano, deve-se realizar a média ponderada dos valores dos consumos obtidos pelo cálculo das três fases, assim como visto na Equação 12.

$$C_{urb} = 0,43 \cdot \left(\frac{C_1 \cdot D_1 + C_2 \cdot D_2}{D_1 + D_2} \right) + 0,57 \cdot \left(\frac{C_3 \cdot D_3 + C_2 \cdot D_2}{D_3 + D_2} \right) \quad (12)$$

Sendo:

D_1, D_2, D_3 : Distância percorrida na 1ª, 2ª e 3ª fases, respectivamente, em km;

C_1, C_2, C_3 : Consumo de combustível obtido para a 1ª fase (partida a frio), 2ª fase (estabilizada) e 3ª fase (transitória com partida a quente), em l/100 km;

A autonomia por litro é, portanto, calculada a partir do valor obtido de consumo (Equação 13).

$$A = \frac{100}{C} \quad (13)$$

Sendo:

A: Autonomia, em km/l;

C: Consumo de combustível, em l/100km.

Conforme descrito pela Equação 14, a autonomia combinada de combustível é calculada pela média ponderada das autonomies em ciclo urbano e estrada (fatores 0,55 e 0,45, respectivamente).

$$A_{comb} = \frac{1}{\frac{0,55}{A_{urb}} + \frac{0,45}{A_{estr}}} \quad (14)$$

Sendo:

A_{comb} : Autonomia combinada de combustível, em km/l;

A_{urb} : Autonomia urbana de combustível, em km/l;

A_{estr} : Autonomia rodoviária de combustível, em km/l.

3.2.5 Cálculo do consumo energético

De acordo com as Portarias do INMETRO nº 377 (2011), nº 285 (2015) e nº 15 (2016), o consumo energético (MJ/km) é obtido a partir dos resultados das autonomies (km/l). Tem-se que a multiplicação entre os valores de poder calorífico inferior (MJ/kg) e densidade (kg/l) resulta na densidade energética (MJ/l) da gasolina E22 utilizada nos testes. Esses parâmetros, os quais foram medidos a 20 °C e a 1 atm de pressão, estão dispostos na Tabela 15.

Diante disso, o consumo energético (em MJ/km) para cada ciclo e de forma combinada são obtidos pela divisão entre a densidade energética (em MJ/l) da gasolina comum E22 (misturada com 22% de etanol anidro) e a autonomia (em km/l).

Tabela 15 – Parâmetros energéticos da Gasolina E22

Parâmetro	Gasolina E22
Poder calorífico inferior [MJ/kg]	38,920
Densidade [kg/l]	0,745
Densidade energética [MJ/l]	28,995

Fonte: Adaptado de INMETRO, 2015

3.3 Método adotado para tratamento dos dados (ferramenta “*box plot*”)

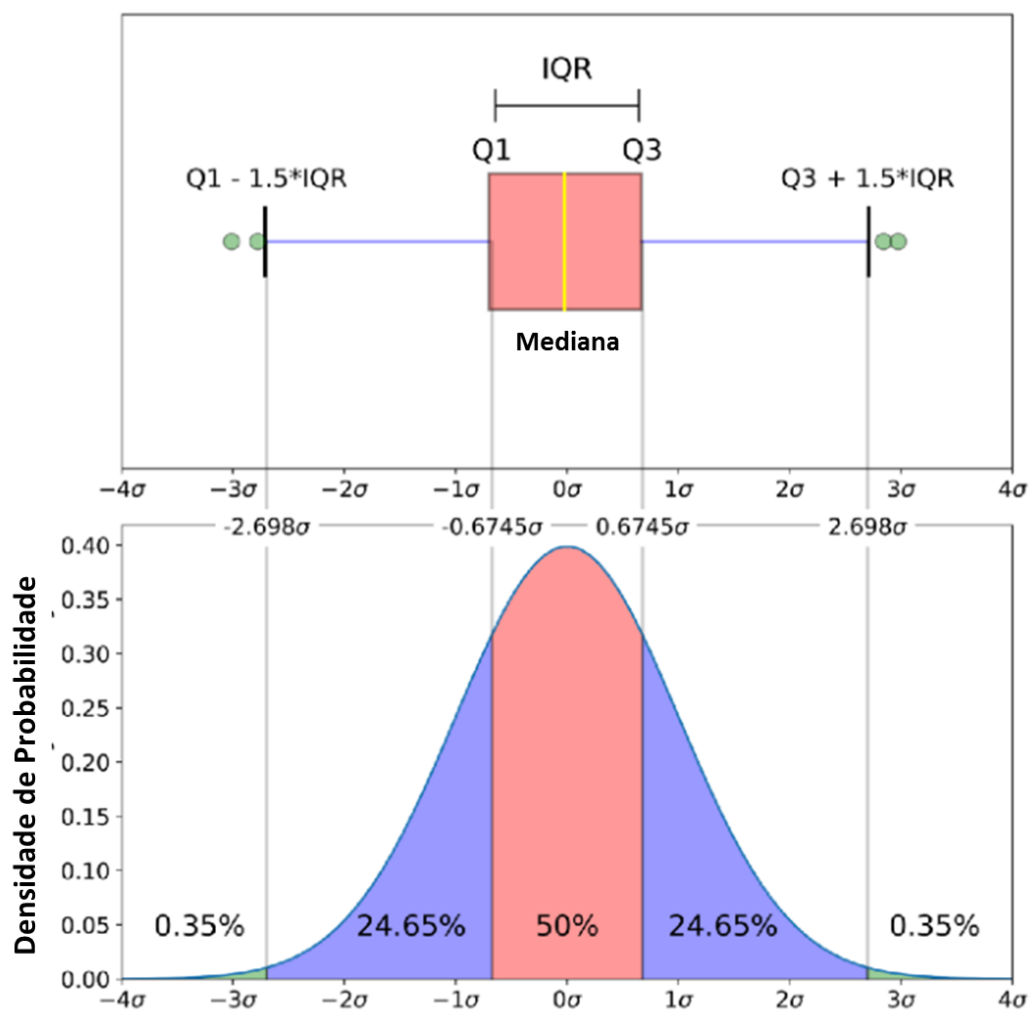
Neste Tópico descreve-se a ferramenta adotada para o tratamento e análise dos dados experimentais obtidos e dispostos no capítulo de Resultados. O método para análise de incertezas está abordado no Apêndice A deste trabalho.

Será utilizado neste trabalho a ferramenta metodológica estatística “*Box Plot*” para a análise e disposição dos resultados obtidos de consumo energético para as configurações de teste. Esse método estatístico proporciona melhor interpretação de dados experimentais, com a possibilidade de análise e visualização de grupos de amostras e respectivos resultados atípicos (“*outliers*”).

Basicamente, a ferramenta “*box plot*” segue a distribuição Normal de probabilidade de disposição dos resultados, os quais são estruturados em caixas (“boxes”) retangulares com uma linha interna determinando a mediana do grupo e delimitando o segundo quartil (Q2) e duas hastes semelhantes a letra “T” (valores compreendidos entre a caixa e limites inferior e superior do conjunto de dados). O primeiro quartil de resultados (Q1) representa 25% dos menores valores encontrados. Já a mediana/segundo quartil (Q2) representa a divisão entre a metade superior e inferior da amostra, enquanto que o terceiro quartil (Q3) compreende 75% da parte com os maiores valores o grupo de dados. A dimensão da caixa (IQR) é representada pela diferença entre o primeiro e o terceiro quartis ($Q3 - Q1$), representando, portanto, 50% dos dados em torno da mediana. A haste inferior é dada pela subtração do primeiro quartil com a multiplicação entre o IQR por 1,5 ($Q1 - 1,5 \cdot IQR$), enquanto que a haste superior é determinada pela soma entre o terceiro quartil e a multiplicação do IQR por 1,5 ($Q3 + 1,5 \cdot IQR$). Finalmente, os chamados pontos *outliers* são dados como os valores abaixo e acima dos limites das hastes inferior e superior, caso existentes. (FIGUEIREDO, 2019)

A Figura 37 ilustra a relação entre a distribuição normal e o diagrama de bloco (“*box plot*”), com os seus principais parâmetros. Como forma de análise visual das caixas do diagrama, tem-se que quanto menor a dimensão das caixas (distância interquartil - IQR), menor a dispersão dos dados das amostras, indicando, consequentemente, menor variabilidade (menor valor de repetitividade padrão).

Figura 37 – Exemplo de Diagrama de Blocos (*Box Plot*) e seus parâmetros principais segundo a distribuição Normal de probabilidade



Fonte: Adaptado de Galarnyk, 2018

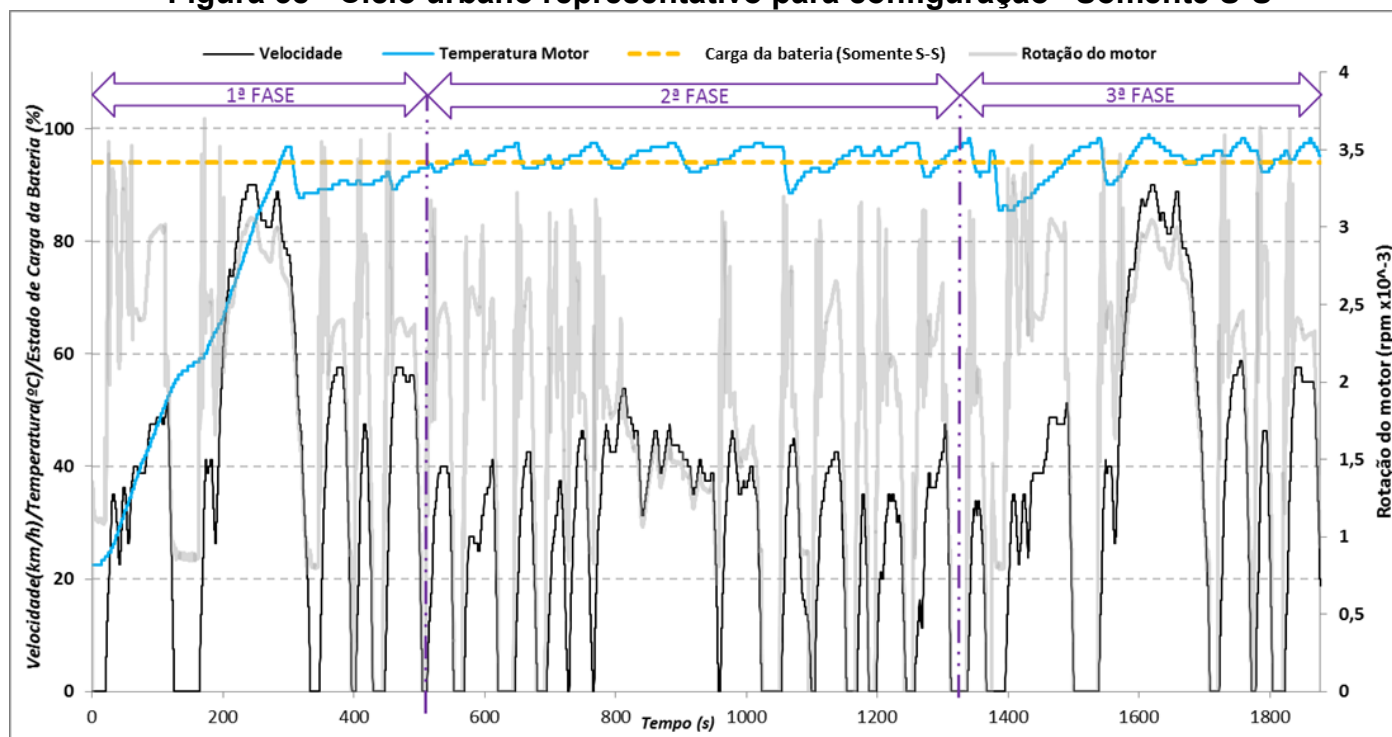
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados dessa pesquisa serão apresentados em diagramas que ilustram as estratégias das configurações dos testes, ou seja, desacoplamento elétrico e eletromecânico do alternador (alternador inteligente e ADE protótipo), assim como o funcionamento do sistema Stop-Start e a combinação dos sistemas, conforme dispostos no Capítulo 3 - Metodologia. Além disso, também são apresentados os resultados experimentais obtidos entre as configurações para autonomia/consumo energético e emissões, com foco nas emissões relacionadas ao CO₂. Tais resultados obtidos em Laboratório de Emissões utilizando as metodologias das Normas ABNT NBR 6601 (2012) e ABNT NBR 7024 (2017) são apresentados de forma comparativa entre a configuração base (alternador acoplado) e as demais configurações com estratégias energéticas, conforme explícito no Tópico 3.2.1 - Configurações dos testes experimentais.

4.1 Estratégia de funcionamento do sistema Stop-Start

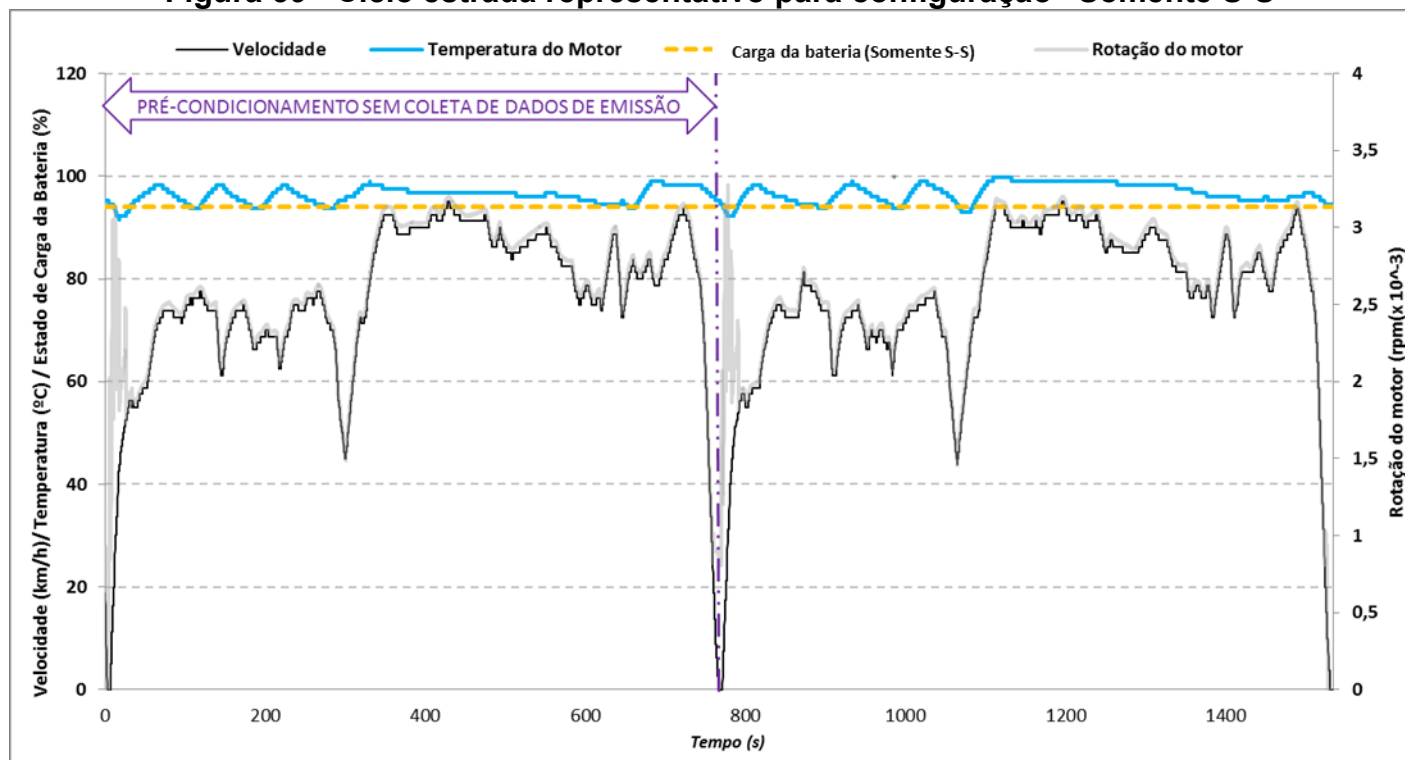
A operação e o funcionamento do sistema Stop-Start pôde ser observado para as configurações 3, 5 e 6, segundo a Tabela 14, em que esse estava habilitado (configurações: “somente S-S”, “alternador inteligente + S-S ligado” e “ADE + S-S”). Dessa forma, apresenta-se nas Figuras 38 e 39 os resultados experimentais do ciclo urbano e estrada respectivamente, estabelecidos nas Normas NBR 6601 (2012) e ABNT NBR 7024 (2017) para um dos ensaios representativos da configuração de “somente S-S”, demonstrando a sua estratégia de desligamentos do motor a combustão interna em momentos de velocidade nula do veículo em função da temperatura da água do motor, estado de carga da bateria e rotação.

Figura 38 - Ciclo urbano representativo para configuração “Somente S-S”



Fonte: Dados da pesquisa, 2020

Figura 39 - Ciclo estrada representativo para configuração “Somente S-S”

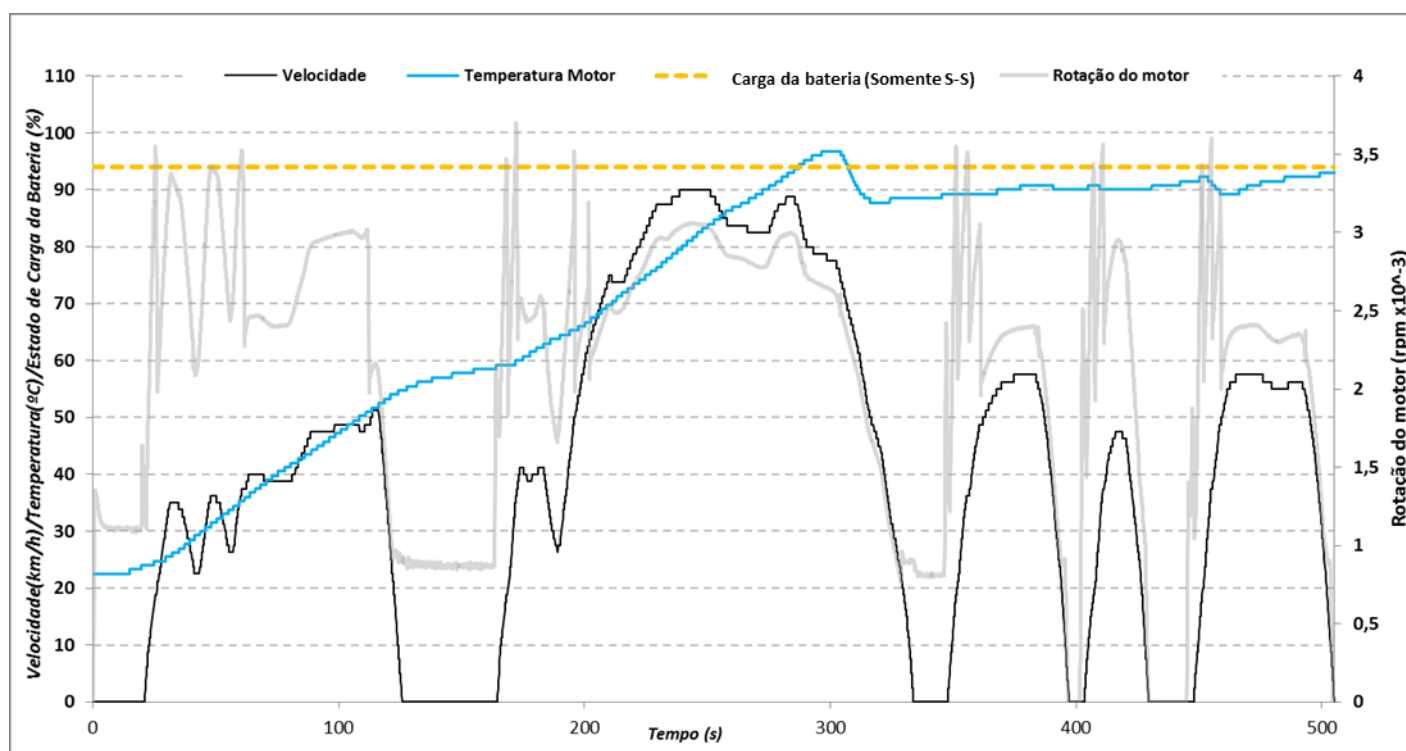


Fonte: Dados da pesquisa, 2020

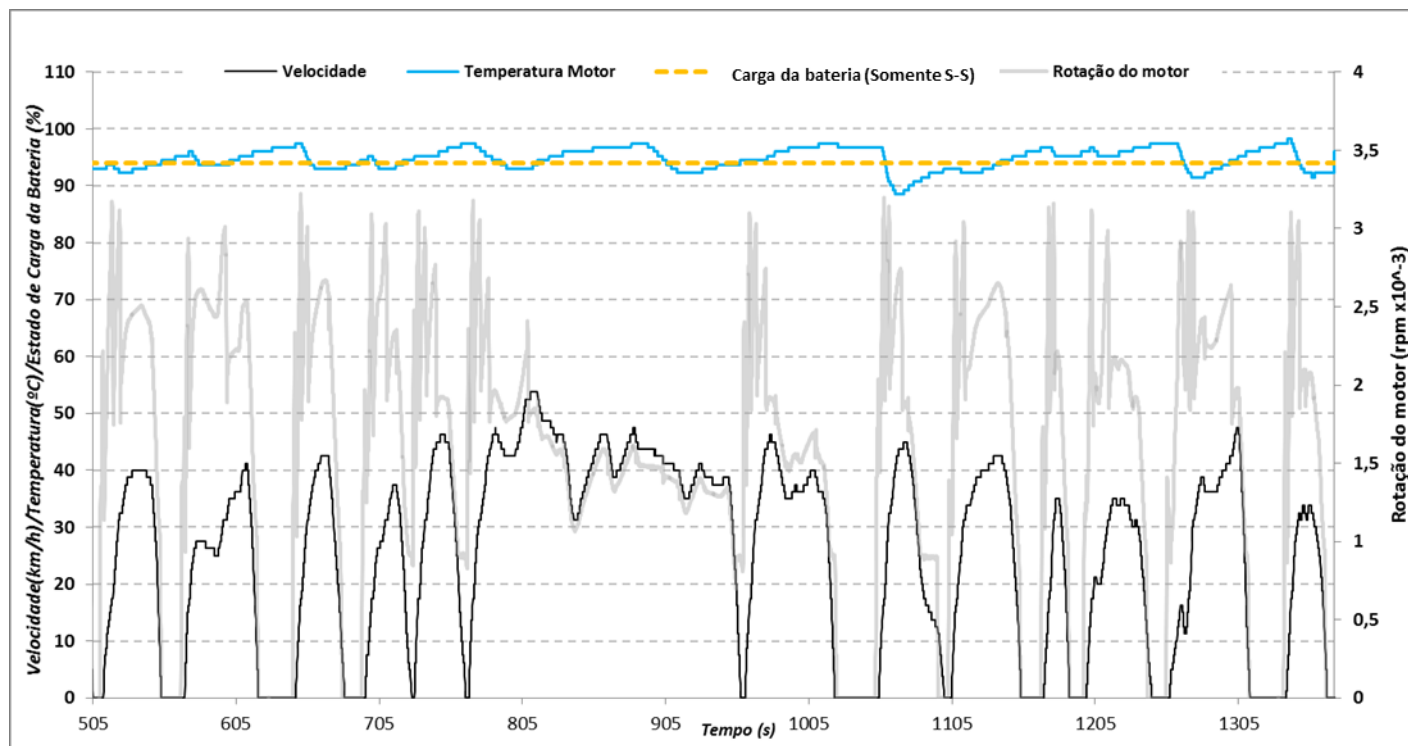
As Figuras 40.a, 40.b e 40.c exibem o detalhe da primeira, segunda e terceira fases do ciclo urbano respectivamente, sendo possível melhor visualização da operação do sistema Stop-Start no ciclo urbano. Conforme pode-se observar pela Figura 47, não há atuação do sistema Stop-Start no ciclo estrada, uma vez que não há momentos de velocidade nula no perfil de rodagem desse ciclo. Logo, durante o ciclo estrada não há atuação e, portanto, não há contribuição desse sistema para o incremento da eficiência energética do veículo, somente no ciclo urbano.

Figura 40 - Detalhe das fases do ciclo urbano para configuração “Somente S-S”

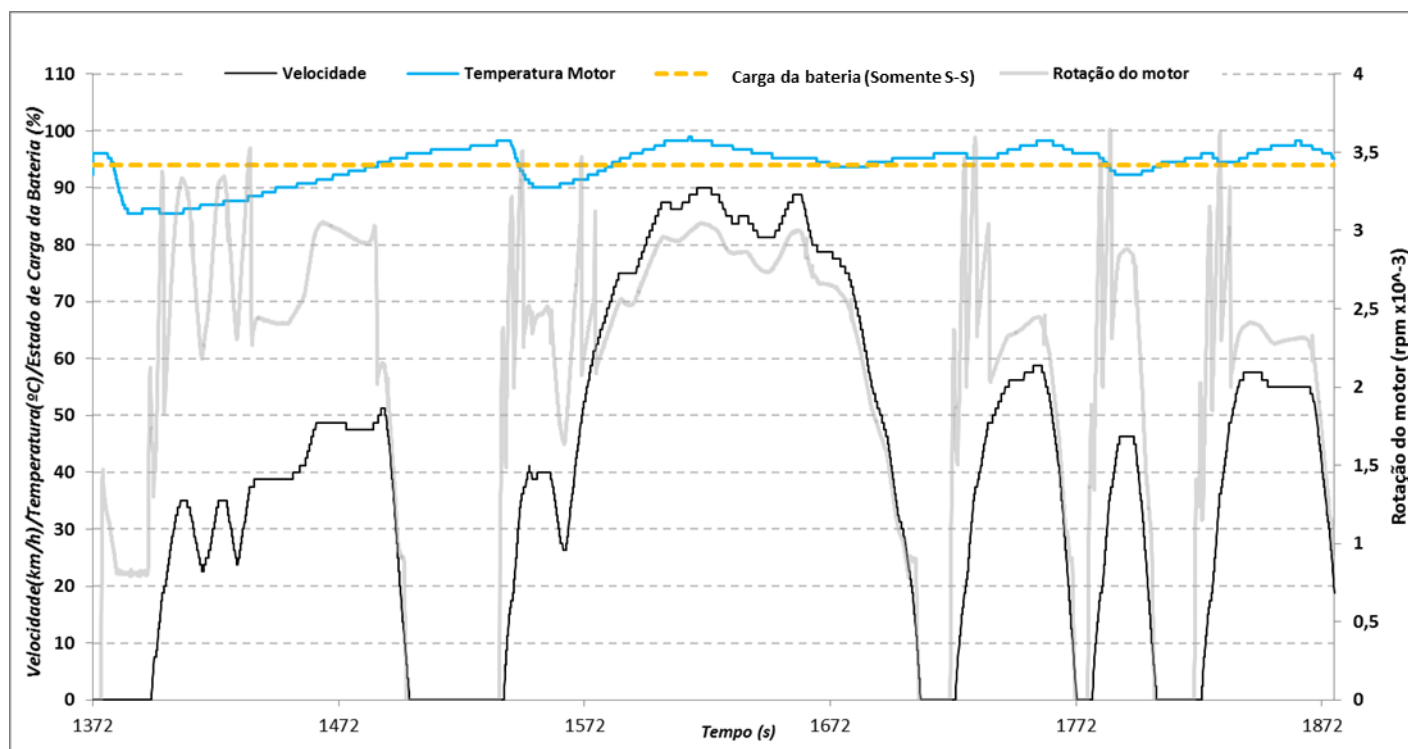
- (a) 1ª fase do ciclo urbano
- (b) 2ª fase do ciclo urbano
- (c) 3ª fase do ciclo urbano



(a)



(b)



(c)

Fonte: Dados da pesquisa, 2020

Conforme pode-se observar na Figura 40.a, o funcionamento do sistema Stop-Start é atrelado à temperatura da água do motor. No início do ciclo urbano, o motor a

combustão interna apresenta temperatura em torno dos 20 °C, de forma que ao longo do seu funcionamento é promovido o seu “aquecimento” (“*warm-up*”) até o ponto de atingimento de sua “temperatura ótima” de trabalho. Ao longo do início da primeira fase do ciclo urbano, a temperatura do motor aumenta conforme o seu regime de trabalho com o tempo. Diante disso, para os primeiros dois momentos de velocidade iguais a zero (em torno de 120 e 330 segundos), não há desligamento do motor a combustão interna pela inibição do sistema Stop-Start em função do não atingimento da temperatura mínima da água do motor para ativação do sistema (90 °C), próximo à média da temperatura normal de operação do motor após “*warm-up*” (em média de 90 a 100 °C). Em seguida, em torno de 400 segundos da primeira fase do ciclo urbano, já corre o primeiro desligamento do motor (rotação igual a 0 rpm) em velocidade igual a 0 km/h, visto que a temperatura da água do motor já ultrapassou naquele momento 90 °C.

Após o motor atingir a sua temperatura de trabalho ótima de operação, prevista conforme estratégia, pode-se observar pelas Figuras 40.b e 40.c que na 2ª e 3ª fases do ciclo urbano os desligamentos do motor (rotação igual a zero) em momentos que seriam de marcha lenta (velocidade nula) ocorrem conforme esperado, visto que a temperatura da água do motor permanece na maior parte do tempo maior que 90 °C (variando em torno de 90 a 100 °C).

Outro fator influente na estratégia de funcionamento do sistema Stop-Start é o estado de carga da bateria do veículo, conforme descrito pelo Tópico 2.9. O estado de carga da bateria do veículo, fornecido pelo sensor IBS, deve apresentar valor mínimo determinado conforme estratégia, de forma a garantir a repartida do motor após desligamentos e garantir o funcionamento do sistema elétrico nestes momentos. O sensor IBS utilizado no modelo de veículo desta pesquisa possui parametrização com resolução de 5%. Assim, somente quando houver aumento ou diminuição do estado de carga da bateria relativo a uma diferença igual ou maior a 5% indica-se para a central eletrônica do veículo (central BCM). Com isso, observa-se pela Figura 40 que durante toda a duração do ciclo urbano o estado de carga da bateria para esta configuração permanece em 94%, acima de 75% (limite mínimo para funcionamento do sistema, não promovendo a inibição do sistema devido a isso, conforme previsto em estratégia).

Apesar das Figuras 38 a 40 serem representativas do ciclo urbano e estrada para um ensaio da configuração de “somente Stop-Start”, o mesmo comportamento e

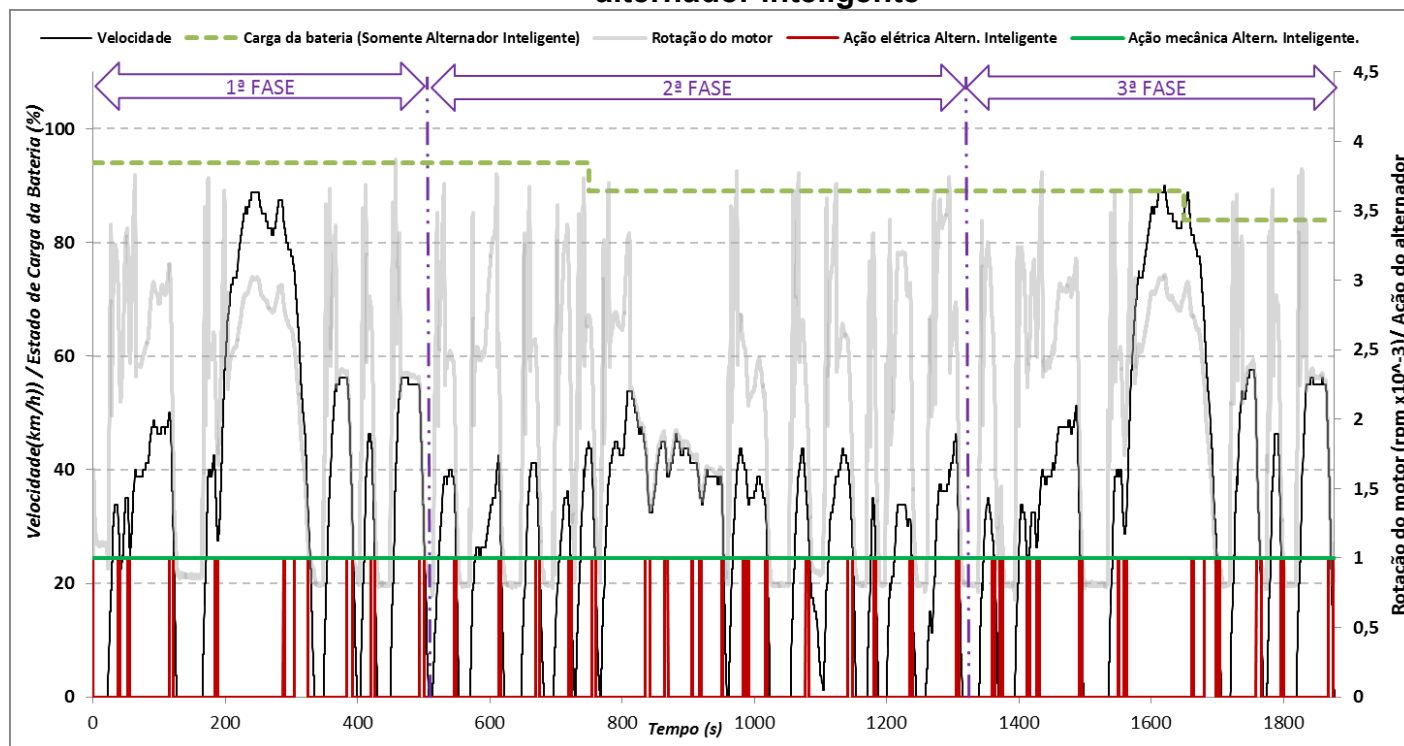
estratégia desse sistema pôde ser observado para as demais configurações em que esse sistema esteve ativo, ou seja, para as configurações 5 (“alternador inteligente com Stop-Start”) e 6 (“ADE com Stop-Start”), com eventuais diferenças nos níveis de carga da bateria ao final do ciclo estrada.

4.2 Estratégia de funcionamento do alternador inteligente (acoplamentos e desacoplamentos elétricos)

A operação e o funcionamento do alternador inteligente pôde ser observado para as configurações 2 e 5, segundo a Tabela 14, em que esse sistema estava habilitado (configurações: “somente alternador inteligente” e “alternador inteligente + S-S”). Dessa forma, apresenta-se nas Figuras 41 e 42 os resultados experimentais do ciclo urbano e estrada respectivamente, estabelecidos nas Normas NBR 6601 (2012) e ABNT NBR 7024 (2017) para um dos ensaios representativos da configuração de “somente alternador inteligente” demonstrando a sua estratégia de acoplamento e desacoplamento somente elétrico do alternador do veículo experimental segundo a sua operação introduzida pelo Tópico de Estado da Arte (2.13), em função do regime de motor (rotação), velocidade do veículo, perfil de condução (posição do pedal do acelerador, acelerações/desacelerações do veículo com momentos de “*cut-off*”) e estado de carga da bateria.

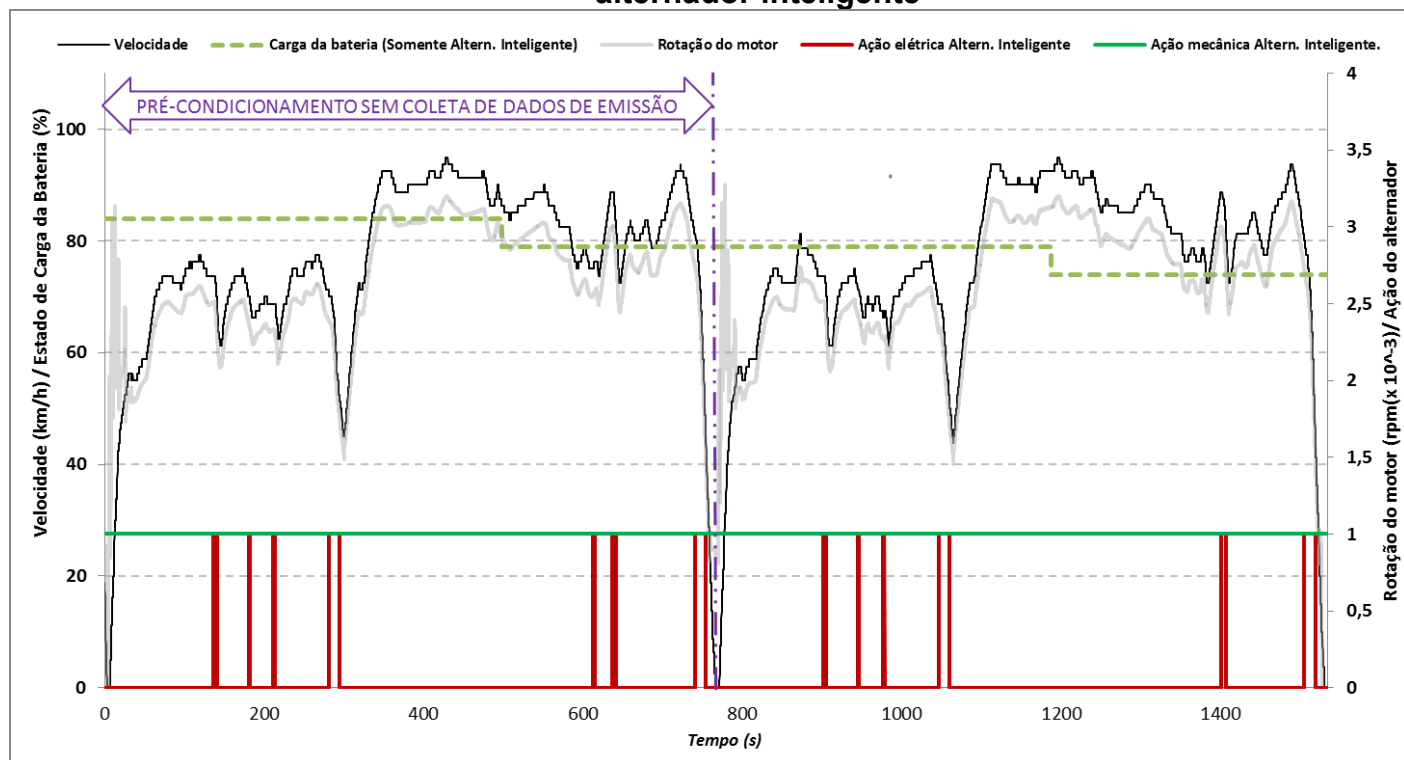
Conforme pode-se observar pelas Figuras 41 e 42, para as configurações com alternador inteligente, somente há acoplamentos e desacoplamentos elétricos do alternador. Visto isso, não há desacoplamento mecânico do alternador de alta eficiência em relação ao eixo do motor. É importante destacar que durante o ciclo urbano e estrada houve variação do estado de carga da bateria, importante fator para a estratégia do alternador inteligente. Conforme indicado por Montalto *et al.* (2012), o alternador inteligente busca manter um estado de carga da bateria próximo a 85% em estado estável, como uma forma de “*trade-off*” entre balanço energético e eficiência energética, sendo que se o nível da bateria for criticamente baixo, esse entra em estado de carregamento rápido (ficando acoplado eletricamente até atingir nível de bateria adequado). Nesse caso, observa-se que ao fim do ciclo estrada, o estado de carga da bateria apresentado foi de 74%, não sendo crítico segundo a sua estratégia.

Figura 41 – Ciclo urbano representativo para configuração de “Somente alternador inteligente”



Fonte: Dados da pesquisa, 2020

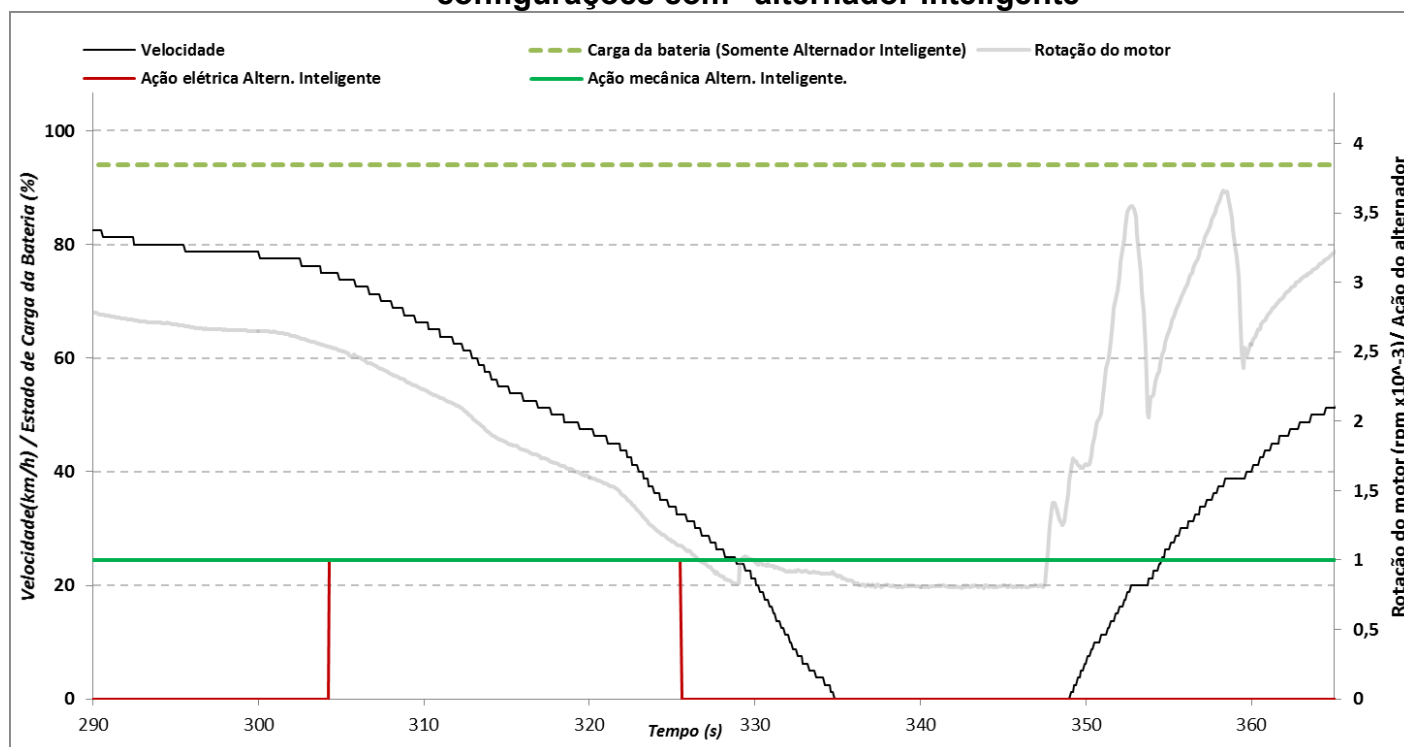
Figura 42 – Ciclo estrada representativo para configuração de “Somente alternador inteligente”



Fonte: Dados da pesquisa, 2020

Ilustra-se na Figura 43 um típico acoplamento elétrico para as configurações com alternador inteligente (detalhamento da 2ª fase do ciclo urbano). Tais acoplamentos ocorrem em momentos de desaceleração do veículo (com eventual corte de combustível), sendo também denominado como freio regenerativo: nesses momentos há geração de energia pelo alternador a partir do movimento rotativo do eixo do motor impulsionado pela energia cinética de desaceleração. Em seguida, em torno de 325 segundos, instantes antes de se iniciar a marcha lenta do motor, o alternador desacopla-se eletricamente, diminuindo parcialmente a carga no motor, priorizando a eficiência energética desse conforme estratégia (importante destacar que nesta configuração o sistema Stop-Start não está ativo, logo não se prevê o desligamento do motor em marcha lenta). Em seguida, em torno de 340 segundos, o movimento do veículo é retomado em aceleração, de forma que o alternador permanece desacoplado eletricamente, conforme previsto por sua estratégia, priorizando novamente a diminuição de carga parcial no eixo do motor em momentos de arrancada e acelerações, melhorando a eficiência energética.

Figura 43 – Detalhamento dos acoplamentos e desacoplamentos elétricos para configurações com “alternador inteligente”



Fonte: Dados da pesquisa, 2020

Novamente, apesar das Figuras 41 a 43 serem representativas do ciclo urbano e estrada para um ensaio da configuração de “somente alternador inteligente”, o mesmo comportamento e estratégia desse tipo de alternador pôde ser observado para as configuração 5 (“alternador inteligente com Stop-Start”), com diferença que nos momentos de velocidade nula em que se teriam rotações do motor próximas a 850 rpm (marchas lentas) houve atuação do sistema Stop-Start, desligando o motor, além de eventuais diferenças nos níveis de carga da bateria ao final do ciclo estrada.

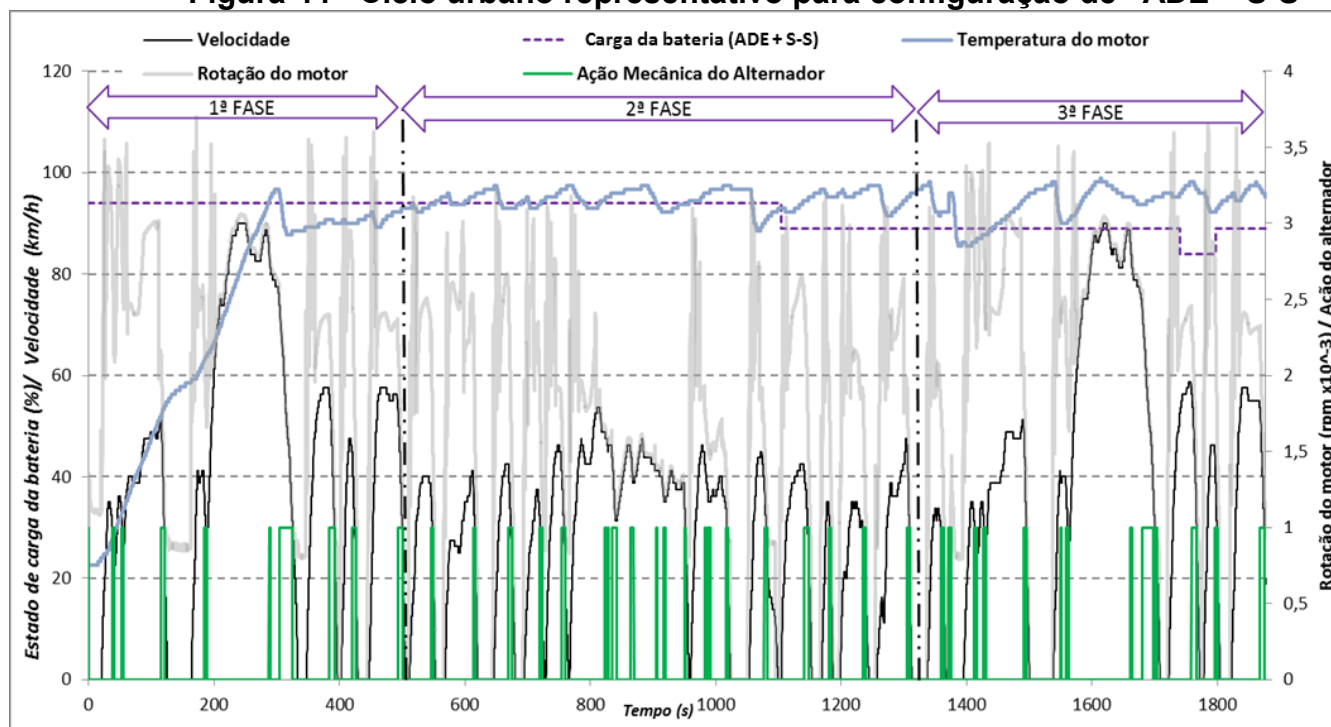
4.3 Estratégia de funcionamento do ADE protótipo com embreagem eletromagnética operando de forma “cíclica” (acoplamentos e desacoplamentos eletromecânicos)

A operação e o funcionamento do ADE protótipo com embreagem eletromagnética pôde ser observado para as configurações 4 e 6, segundo a Tabela 14, em que esse estava habilitado (configurações: “somente ADE” e “ADE + S-S”). Dessa forma, apresenta-se nas Figuras 44 e 45 os resultados experimentais do ciclo urbano e estrada respectivamente, estabelecidos nas Normas NBR 6601 (2012) e ABNT NBR 7024 (2017) para um dos ensaios representativos da configuração de “ADE + S-S”, demonstrando a sua estratégia de operação do alternador em função do regime de condução dos ciclos (tais como posição do pedal do acelerador e acelerações/desacelerações do veículo com momentos de “*cut-off*”), estado de carga da bateria, rotação do motor e velocidade do veículo.

Conforme pode ser analisado e comprovado pelas Figuras 52 e 53, os acoplamentos e desacoplamentos eletromecânicos foram guiados por uma estratégia similar à adotada nas configurações com “alternador inteligente” (desacoplamentos e acoplamentos somente elétricos), confirmando a expectativa do seu funcionamento de acordo com as pré-condições e parâmetros inicialmente previstos e configurados estrategicamente para o alternador protótipo com embreagem eletromagnética “ciclado”. Além disso, o funcionamento do sistema Stop-Start nesta configuração combinado com o ADE mostrou-se igual ao já demonstrado e obtido nas demais configurações em que tal tecnologia estava ativada, ou seja, de acordo com as condições inerentes ao seu funcionamento, ocasionou desligamentos do motor a combustão interna nos momentos de velocidade nula do veículo (paradas, as quais o

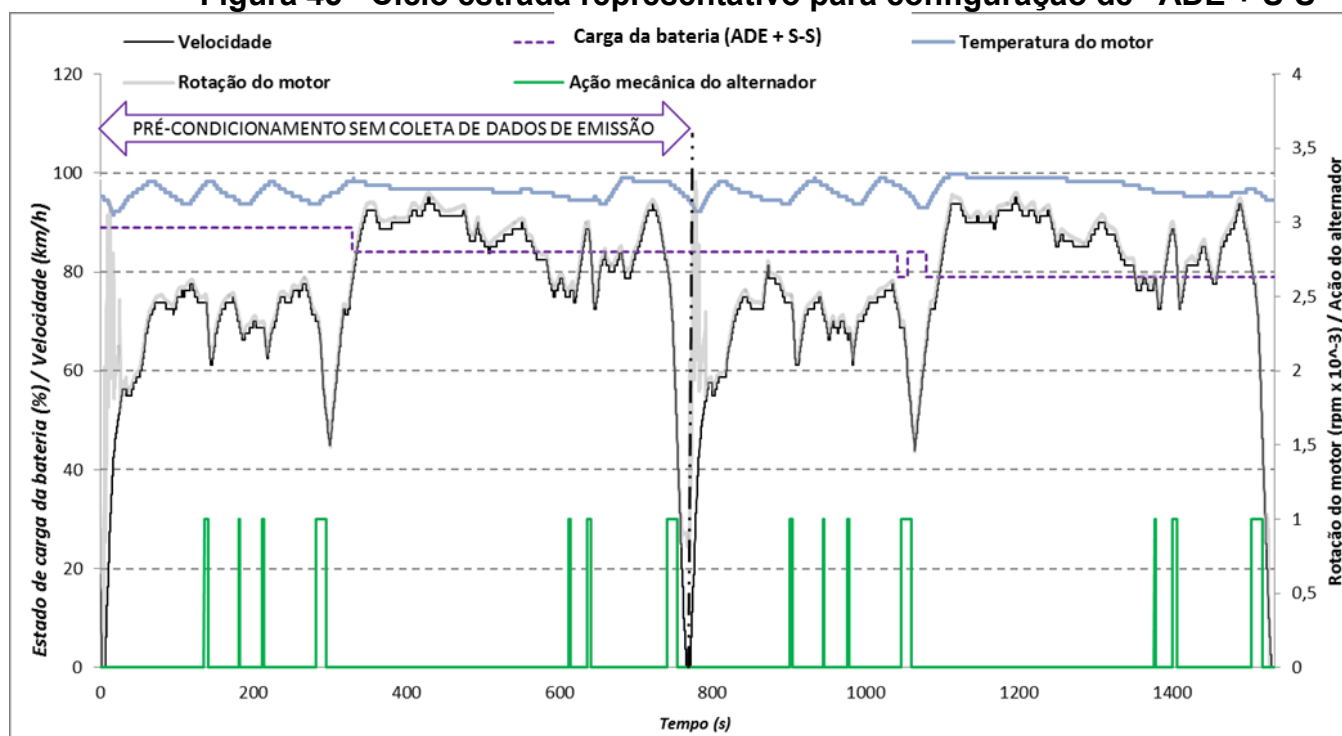
motor estaria originalmente em regime de marcha lenta, com rotação próximo à 850 rpm).

Figura 44 - Ciclo urbano representativo para configuração de “ADE + S-S”



Fonte: Dados da pesquisa, 2020

Figura 45 - Ciclo estrada representativo para configuração de “ADE + S-S”



Fonte: Dados da pesquisa, 2020

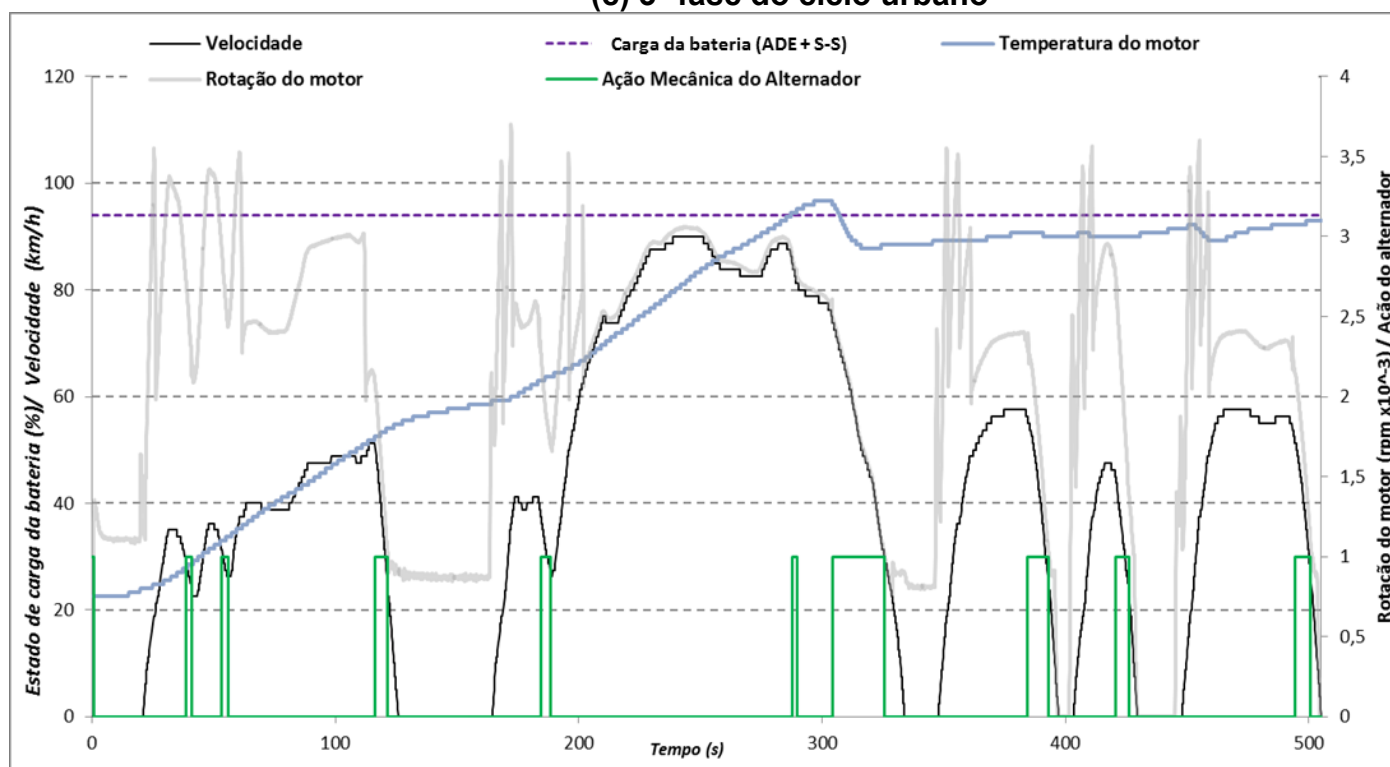
As Figuras 46.a, 46.b e 46.c exibem o detalhe da primeira, segunda e terceira fases do ciclo urbano respectivamente, sendo possível melhor visualização da operação no ciclo urbano do sistema Stop-Start aliado ao ADE protótipo com embreagem com operação “cíclica”, proporcionando acoplamentos/desacoplamentos eletromecânicos

Figura 46 - Detalhe das fases do ciclo urbano para configuração “ADE + S-S”

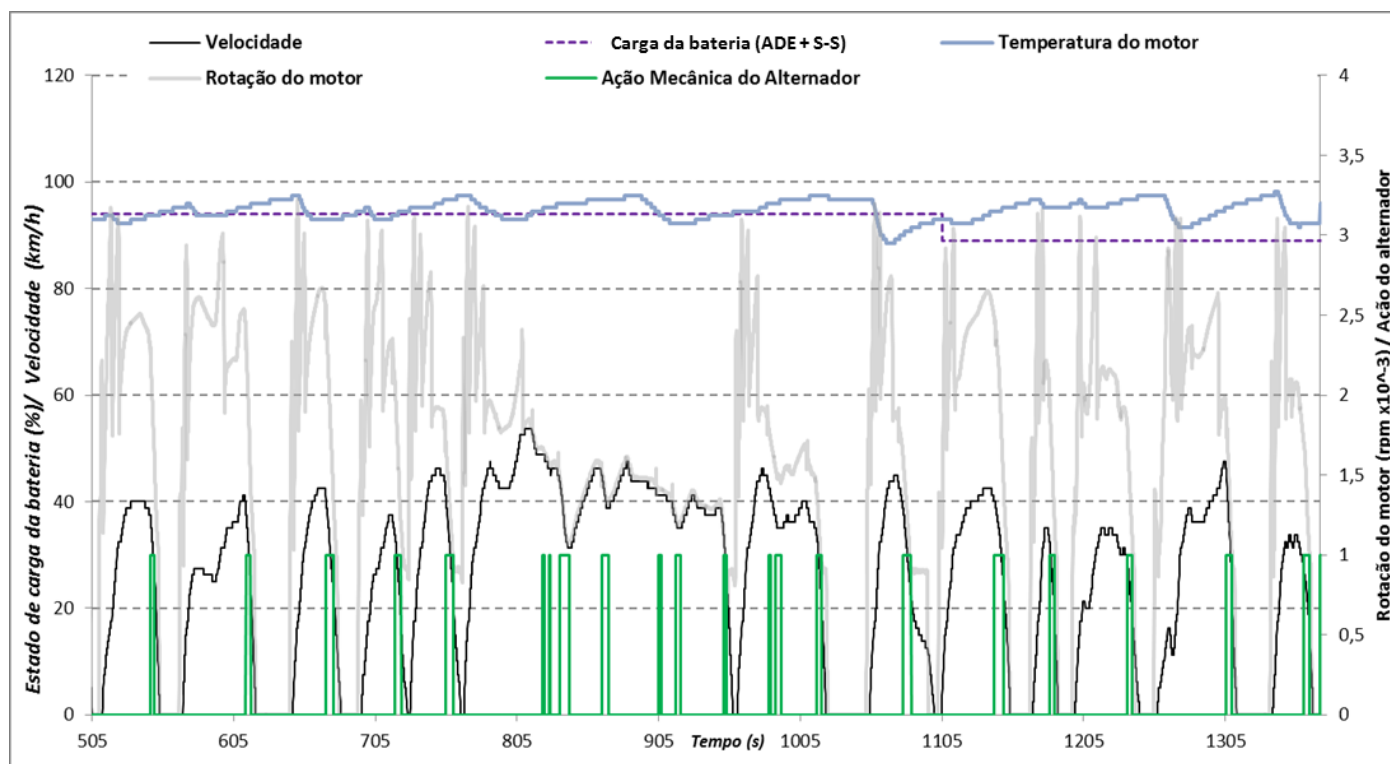
(a) 1ª fase do ciclo urbano

(b) 2ª fase do ciclo urbano

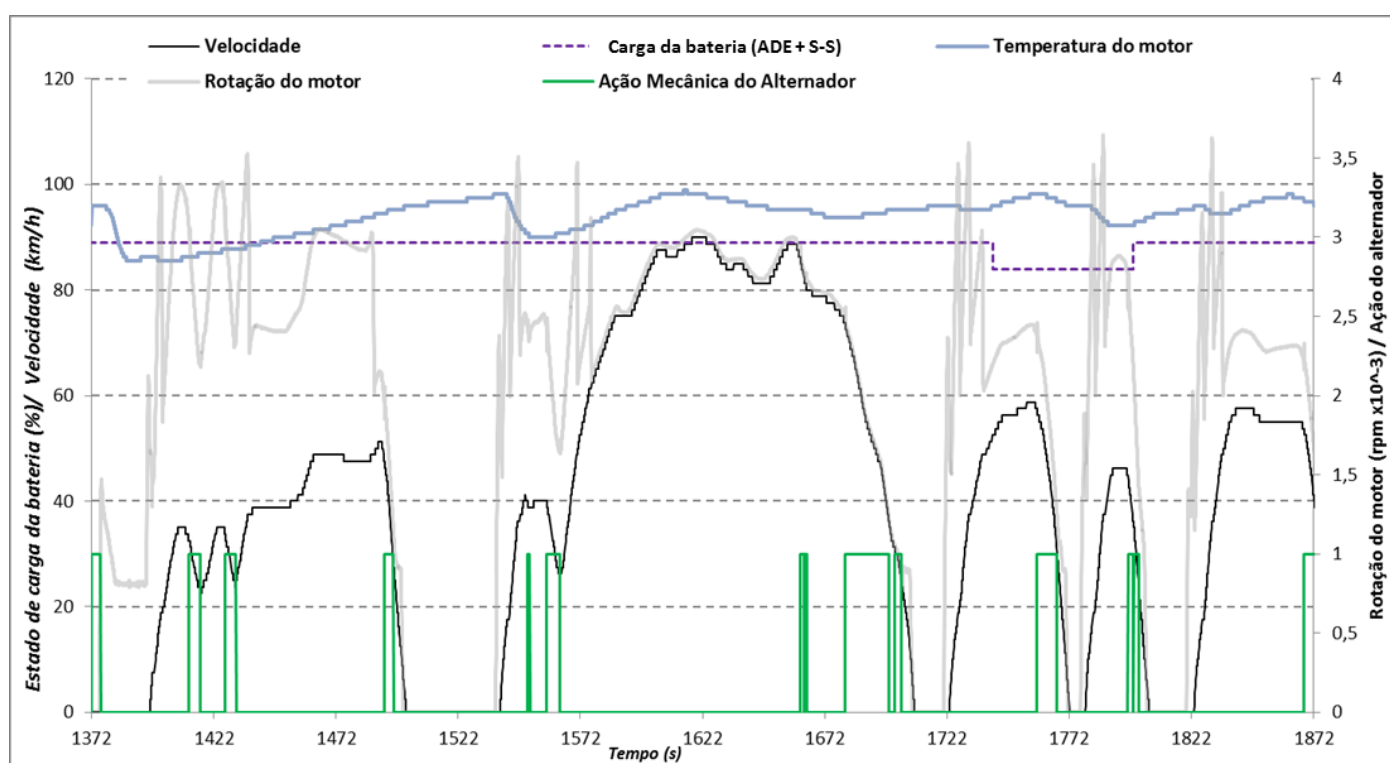
(c) 3ª fase do ciclo urbano



(a)



(b)



(c)

Fonte: Dados da pesquisa, 2020

A partir da análise da Figura 46, é possível observar que os desacoplamentos e acoplamentos do alternador protótipo (ADE) ocorreram conforme a estratégia estabelecida. Os desacoplamentos ocorreram com o estado de carga da bateria maior

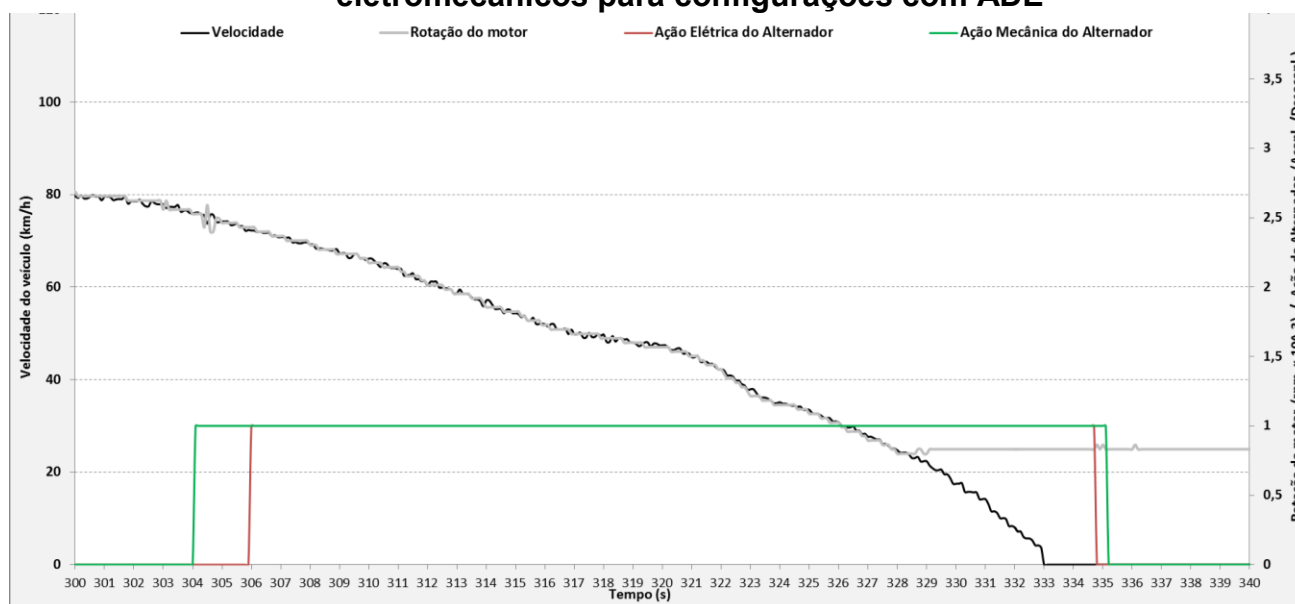
que 75% nas acelerações e também em regimes de rotações com variação mínima do pedal do acelerador. Nos períodos de parada do veículo (velocidade igual a zero), o motor a combustão interna era desligado de acordo com a estratégia do sistema Stop-Start, com consequentes desacoplamentos do alternador nestes momentos. Conforme já ilustrado anteriormente, a ativação de tal sistema é dependente da temperatura da água do motor, sendo habilitado após “*warm-up*” em torno de 90 °C – 100 °C, como visto na Figura 54.a (1ª fase do ciclo urbano). Durante todas as fases do ciclo urbano, nas desacelerações do veículo (de acordo com a inclinação da curva de rotação do motor e velocidade do veículo, além de análise do perfil de acionamento do pedal acelerador), houve ocorrências de acoplamentos do alternador, priorizando a regeneração elétrica com o carregamento da bateria conforme pré-estabelecido por estratégia.

Na representação da Figura 45, durante o ciclo estrada, também é possível observar que os desacoplamentos e acoplamentos do alternador protótipo ocorreram conforme a estratégia estabelecida. Entretanto, no ciclo estrada, fica mais evidente a permanência do estado de desacoplamento do alternador mesmo em desacelerações, uma vez que as variações de decaimento da rotação nesses momentos não foram suficientes para o comando de acoplamento do alternador para a regeneração de energia (por exemplo, entre o período de 1100 e 1300 segundos). É importante salientar que acoplamentos sucessivos e com mínima possibilidade de regeneração foram estrategicamente evitados para maximizar a vida útil da embreagem e reduzir efeitos sobre a dirigibilidade (como possíveis vibrações transmitidas ao habitáculo do veículo devido aos acoplamentos mecânicos). Novamente, conforme já explicitado, não há atuação do sistema Stop-Start no ciclo estrada, uma vez que nesse perfil de rodagem não há “oportunidades” de velocidade nula. Assim, não há contribuição desse sistema para o incremento da eficiência energética do veículo para o ciclo estrada, somente no ciclo urbano.

A Figura 47 ilustra o detalhamento do acoplamento e desacoplamento eletromecânicos em um instante de desaceleração do ciclo urbano para a configuração de ADE protótipo. Diante do intuito de minimizar o carregamento brusco e instantâneo do eixo virabrequim do motor a combustão interna (em função do acoplamento do alternador protótipo para geração de energia), o acoplamento elétrico ocorre após 2 segundos do acoplamento mecânico, junto ao consequente efeito da carga inercial do conjunto rotante do alternador. Pela mesma razão explicitada

anteriormente, o desacoplamento elétrico ocorre 0,5 segundo antes do mecânico. Com isso, constatou-se que a estratégia de tempos de “atrasos” de acoplamento e desacoplamento elétrico ocorreu conforme o pré-estabelecido e controlado pelo programa computacional utilizado nos testes, descrito pelo Tópico 3.1.2.1 (“Estratégia para desacoplamento e acoplamento do alternador protótipo”).

Figura 47 – Detalhamento dos acoplamentos e desacoplamentos eletromecânicos para configurações com ADE



Fonte: Dados da pesquisa, 2020

A Tabela 16 mostra os resultados médios dos ensaios experimentais para a configuração de alternador protótipo com embreagem eletromagnética ciclando (ADE) com o sistema Stop-Start ativado para o ciclo urbano. Explicitam-se nessa Tabela as médias dos tempos de acoplamento e desacoplamento do ADE operando com quantidade de acoplamentos, além de tempos relativos aos momentos que o motor a combustão interna permanece desligado devido à atuação do sistema Stop-Start e contagem de desligamentos resultantes para o ciclo urbano. A Tabela 17 expõe os mesmos tipos de resultados demonstrados anteriormente para o ciclo estrada.

Tabela 16 – Tempos de acoplamentos/desacoplamentos do alternador ciclando e tempos de desligamentos do motor pelo sistema Stop-Start no ciclo urbano

CICLO URBANO						
Fase/ Sistema	Alternador com Desacoplamento Eletromecânico (EDA)			Stop-Start		
1ª FASE	Condição Alternador	Tempo em segundos (s)	Porcentagem de tempo (%)	Condição Atuação S-S	Tempo em segundos (s)	Porcentagem de tempo (%)
	<i>Desacoplado</i>	446,0	88%	<i>Motor Desligado</i>	21,6	4%
	<i>Acoplado</i>	59,1	12%	<i>Motor ligado</i>	483,4	96%
	<i>Duração total da fase</i>	505,0	9 Acoplamentos	<i>Duração total da fase</i>	505,0	2 Desligamentos
2ª FASE	Condição Alternador	Tempo em segundos (s)	Porcentagem de tempo (%)	Condição Atuação S-S	Tempo em segundos (s)	Porcentagem de tempo (%)
	<i>Desacoplado</i>	785,8	91%	<i>Motor Desligado</i>	157,9	18%
	<i>Acoplado</i>	81,3	9%	<i>Motor ligado</i>	709,1	82%
	<i>Duração total da fase</i>	867,0	13 Acoplamentos	<i>Duração total da fase</i>	867,0	9 Desligamentos
3ª FASE	Condição Alternador	Tempo em segundos (s)	Porcentagem de tempo (%)	Condição Atuação S-S	Tempo em segundos (s)	Porcentagem de tempo (%)
	<i>Desacoplado</i>	439,3	87%	<i>Motor Desligado</i>	75,4	16%
	<i>Acoplado</i>	65,8	13%	<i>Motor ligado</i>	429,6	85%
	<i>Duração total da fase</i>	505,0	9 Acoplamentos	<i>Duração total da fase</i>	505,0	4 Desligamentos
TOTAL	Condição Alternador	Tempo em segundos (s)	Porcentagem de tempo (%)	Condição Atuação S-S	Tempo em segundos (s)	Porcentagem de tempo (%)
	<i>Desacoplado</i>	1671,0	89%	<i>Motor Desligado</i>	254,7	14%
	<i>Acoplado</i>	206,1	11%	<i>Motor ligado</i>	1622,3	86%
	<i>Duração total do ciclo</i>	1877,0	32 Acoplamentos	<i>Duração total do ciclo</i>	1877,0	15 Desligamentos
	<i>Tempo médio gasto por acoplamento</i>	6,4		<i>Tempo médio gasto por desligamento</i>	17,0	

Fonte: Dados da pesquisa, 2020

Tabela 17 - Tempos de acoplamentos/desacoplamentos do alternador ciclando e tempos de desligamentos do motor pelo sistema Stop-Start no ciclo estrada

CICLO ESTRADA						
Fase/ Sistema	Alternador com Desacoplamento Eletromecânico (EDA)			Stop-Start		
1ª FASE	Condição Alternador	Tempo em segundos (s)	Porcentagem de tempo (%)	Condição Atuação S-S	Tempo em segundos (s)	Porcentagem de tempo (%)
	<i>Desacoplado</i>	724,8	94%	<i>Motor Desligado</i>	0,0	0%
	<i>Acoplado</i>	42,3	6%	<i>Motor ligado</i>	767,0	100%
	<i>Duração total da fase</i>	767,0	7 Acoplamentos	<i>Duração total da fase</i>	767,0	0 Desligamentos
2ª FASE	Condição Alternador	Tempo em segundos (s)	Porcentagem de tempo (%)	Condição Atuação S-S	Tempo em segundos (s)	Porcentagem de tempo (%)
	<i>Desacoplado</i>	725,5	95%	<i>Motor Desligado</i>	0,0	0%
	<i>Acoplado</i>	41,6	5%	<i>Motor ligado</i>	767,0	100%
	<i>Duração total da fase</i>	767,0	7 Acoplamentos	<i>Duração total da fase</i>	767,0	0 Desligamentos
TOTAL	Condição Alternador	Tempo em segundos (s)	Porcentagem de tempo (%)	Condição Atuação S-S	Tempo em segundos (s)	Porcentagem de tempo (%)
	<i>Desacoplado</i>	1450,2	95%	<i>Motor Desligado</i>	0,0	0%
	<i>Acoplado</i>	83,9	5%	<i>Motor ligado</i>	1534,0	100%
	<i>Duração total do ciclo</i>	1534,0	14 Acoplamentos	<i>Duração total da fase</i>	1534,0	0 Desligamentos
	<i>Tempo médio gasto por acoplamento</i>	6,0		<i>Tempo médio gasto por desligamento</i>	0,0	

Fonte: Dados da pesquisa, 2020

A partir dos resultados das Tabelas 16 e 17, pode-se constatar que o alternador protótipo passa a maior parte do tempo dos testes desacoplado, tanto em ciclo urbano (89%) quanto em ciclo estrada (95%). A partir da análise do ciclo urbano, tem-se pela Figura 44 que além dos períodos de aceleração com rampa específica suficiente para desacoplamento do alternador, um grande contribuinte para o tempo elevado da condição desacoplada foram os períodos de marcha lenta, em que o motor a combustão interna era desligado pelo sistema Stop-Start (de acordo com suas condições de acionamento, principalmente estado de carga da bateria maior que 75% e temperatura do motor adequada para seu funcionamento), com desacoplamento do alternador do eixo do motor. Para o ciclo estrada, conforme visto na Figura 45, observa-se maior tendência tipicamente desse ciclo em promover acelerações e retomadas de velocidade, que aumentam a rotação do motor, e promovem o desacoplamento do alternador. Há ainda trechos em que as pequenas

desacelerações não possuem inclinação de velocidade e rotação suficientes para promover o acoplamento do alternador. Assim, o maior tempo considerável de condição desacoplada também é justificado para esse ciclo.

Analisando os resultados para cada fase do ciclo urbano, presentes na Tabela 16, tem-se que a segunda fase resultou em maior número de acoplamentos do ADE protótipo (13 acionamentos) em comparação com as outras fases do ciclo urbano, devido às próprias características do regime dessa fase. Apesar do maior número efetivo de acoplamentos, a porcentagem de tempo que o alternador permanece acoplado é o menor entre as fases (9%), justificado pelas características de regime mais transiente da segunda fase em relação à demais do ciclo urbano (acelerações e desacelerações “inconstantes e curtas”), ocasionando em maior tempo porcentual em que o alternador permanece desacoplado. Em relação ao sistema Stop-Start, a segunda fase também resultou em maior número de desligamentos do motor (9 desligamentos) em detrimento do maior número característico de “oportunidades” paradas do veículo (velocidade igual a 0 km/h) que ocasionariam em período de rotação de marcha lenta. Além disso, as paradas efetivas do veículo possuem, por característica do regime dessa fase, maior duração. Com isso, a porcentagem que o motor permaneceu desligado (18%) mostrou-se maior que as demais fases. Conforme observado na Figura 46, é interessante ressaltar que na primeira fase o motor desligou pelo sistema Stop-Start somente nas duas das quatro paradas do veículo: nas primeiras duas paradas o motor ainda não tinha atingido a temperatura ideal para atuação do sistema Stop-Start (período de “*warm-up*” previsto em estratégia para durabilidade e correto funcionamento do motor). Já na terceira fase, que possui perfil de condução e regime semelhantes à primeira fase do ciclo urbano, o motor desligou nas quatro paradas efetivas do veículo, visto que esse já tinha atingido a temperatura ideal para acionamento do sistema desse a primeira fase, permanecendo 15% do tempo desligado.

Para o ciclo estrada, os resultados obtidos entre as fases mostraram-se bastante similares, comprovando que a primeira fase de pré-condicionamento (em que não há coleta de dados de emissão) é semelhante à segunda fase quanto aos regimes de velocidade e rotação do motor. Diante disso, o número de acoplamentos entre ambas foi o mesmo (7 acionamentos), atingindo tempos de acoplamentos do alternador ao eixo do motor similares (42,3 segundos para a primeira fase e 41,6 segundos para a segunda fase do ciclo estrada). Em relação ao sistema Stop-Start,

conforme esperado, não houve atuação com desligamento do motor no ciclo estrada, visto que de acordo com o regime de condução neste ciclo não há momentos de parada do veículo (velocidade igual a 0 km/h), ou seja, o motor permaneceu 100% do tempo ligado neste ciclo. Assim, não há contribuição energética desse sistema para o ciclo estrada.

Realizando um comparativo entre os resultados do ciclo urbano e ciclo estrada, tem-se que o número de acoplamentos do alternador no ciclo urbano (32 acoplamentos) é 2,3 vezes maior que o obtido para o ciclo estrada (14 acoplamentos). Como o ciclo estrada oferece essencialmente menos “oportunidades” de acoplamento do alternador pelo menor número de desacelerações, esses resultados já eram esperados. Entretanto, o tempo médio gasto por acoplamento em segundos (obtido a partir da divisão entre o tempo total na condição acoplada pelo número de acoplamentos constatados) para o ciclo estrada e ciclo urbano são similares (6,0 segundos e 6,4 segundos, respectivamente). Apesar da expectativa inicial era de que o tempo médio de acoplamento fosse maior no ciclo estrada, a similaridade dos tempos de acoplamentos médios entre os dois ciclos pode ser explicada pela estratégia do alternador de “evitar” sequências sucessivas de acoplamentos e desacoplamentos por mínimas variações de velocidade e rotação em curto período de tempo. Assim, prioriza-se a dirigibilidade (pela análise das amostras dos parâmetros do motor), como pode ser visto nos períodos de 400 a 600 segundos e 1100 a 1300 segundos da Figura 53 que ilustra um teste significativo do ciclo estrada para a configuração ADE com Stop-Start.

Assim, a partir da análise desses resultados, comprova-se que a estratégia adotada para funcionamento e controle do alternador protótipo com embreagem eletromagnética prioriza o desacoplamento em detrimento da permanência do alternador acoplado. Além disso, percebe-se que os acoplamentos foram realizados em momentos estrategicamente marcados pela ausência de injeção de combustível (“*cutoff*”), minimizando impactos no consumo energético. Isso comprova que a maximização de aproveitamento de “oportunidades” para desacoplamento do componente, almejada pela estratégia de controle, foi alcançada em ambos os ciclos, de forma a promover ganhos energéticos e redução de emissão de gás carbônico pelo sistema.

Além disso, pelos resultados obtidos, também pode-se destacar a atuação do sistema Stop-Start no ciclo urbano conforme estratégia pré-definida. Durante as

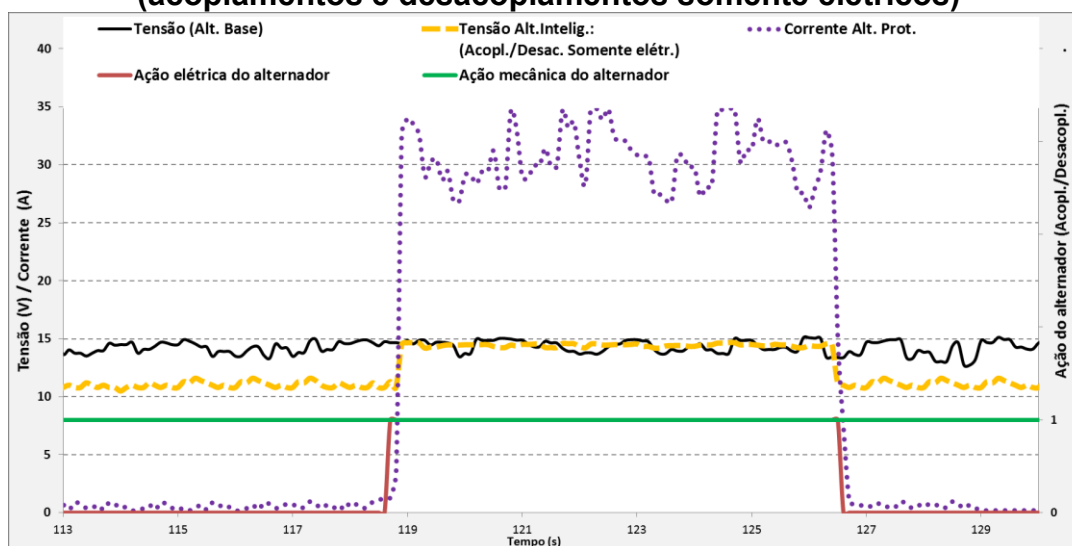
paradas do veículo, cumprindo-se os pré-requisitos descritos no Tópico 2.9, como cinto de segurança do motorista afivelado, portas do veículo fechadas, transmissão em ponto neutro, temperatura do motor e estado de carga da bateria acima de níveis mínimos pré-definidos, entre outros, o motor a combustão interna era desligado em situações tipicamente que seriam de rotação em marcha lenta. Assim, com o motor desligado, não há consumo de combustível e, conseqüentemente, emissão de gás carbônico. Logo, o funcionamento desse sistema, restrito ao ciclo urbano, também representou ganhos na eficiência energética do veículo de teste em relação à sua configuração de base.

4.4 Análise comparativa da tensão do alternador em configuração inteligente e com embreagem eletromagnética (ADE)

Para as configurações de teste em que se tem a atuação da estratégia de acoplamento e desacoplamento somente elétrico do alternador protótipo ("alternador inteligente"), observa-se o seguinte comportamento típico ilustrado na Figura 48 para os parâmetros de tensão, comparado ao comportamento da configuração base (alternador sempre acoplado elétrica e mecanicamente).

Pela análise da Figura 48, tem-se que o alternador inteligente se encontra sempre acoplado mecanicamente, de forma que sua tensão permanece usualmente com o valor próximo de 12V (com corrente elétrica quase nula). Assim, como encontra-se acoplado mecanicamente com tensão próxima à de bordo do sistema elétrico, há geração de campo magnético residual, além de esforços mecânicos no eixo do motor, impactando em sua eficiência energética. Durante os acoplamentos elétricos realizados segundo a sua estratégia de funcionamento (desacelerações), observa-se o aumento considerável da tensão na faixa de 13 a 15V, com geração de corrente elétrica, priorizando o carregamento da bateria. Após o desacoplamento elétrico, a tensão do alternador retoma ao seu estado usual de valor próximo a 12V, visto que esse permanece acoplado mecanicamente gerando tensão residual. Para a configuração base, observa-se níveis de tensão usualmente em torno de 14 V e, conseqüentemente, corrente considerável durante todo o ciclo, visto que o alternador nessa configuração permanece acoplado priorizando o carregamento da bateria.

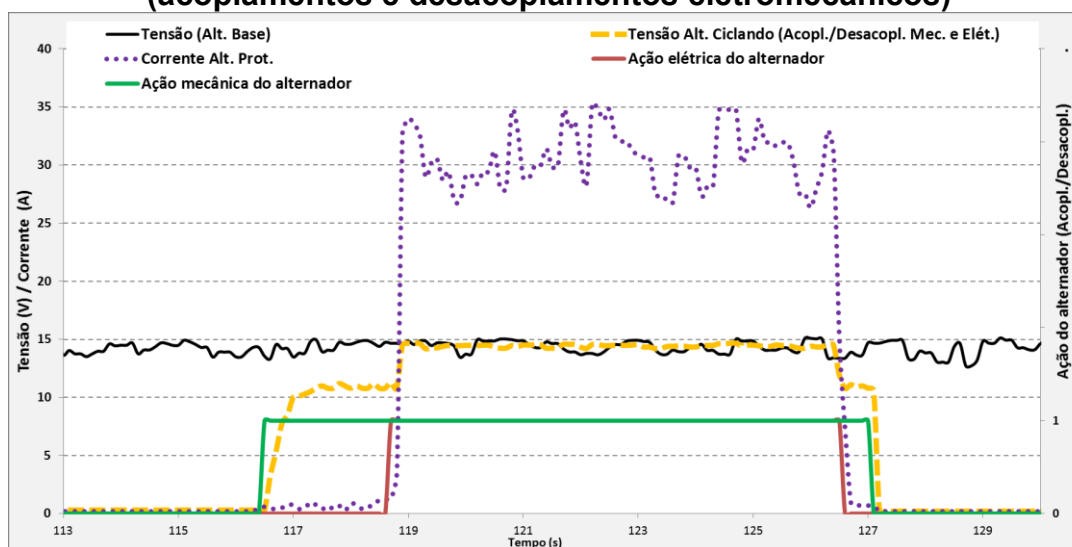
**Figura 48 - Tensão do alternador em configuração “inteligente”
(acoplamentos e desacoplamentos somente elétricos)**



Fonte: Dados da pesquisa, 2020

Para as configurações de teste em que se tem a atuação da estratégia de acoplamento e desacoplamento tanto elétrico como mecânico do alternador protótipo (ADE), observa-se o seguinte comportamento típico ilustrado na Figura 49 para os parâmetros de tensão, comparado ao comportamento da configuração base (alternador sempre acoplado elétrica e mecanicamente).

**Figura 49 - Tensão do alternador em configuração ADE
(acoplamentos e desacoplamentos eletromecânicos)**



Fonte: Dados da pesquisa, 2020

Analisando a Figura 49, pode-se observar que durante o acoplamento mecânico, há elevação da tensão do sistema elétrico para próximo de 12 V (tensão

de bordo), com corrente elétrica mínima. Em seguida, com o acoplamento elétrico do alternador, há aumento considerável da tensão do alternador protótipo, ocasionando em geração de corrente elétrica para o sistema elétrico do veículo. A tensão fica em torno de 13 e 15 V, similar à tensão obtida continuamente pelo alternador em sua configuração base ao longo de todo o ciclo, visto que esse último permanece acoplado durante todo o experimento gerando tensão e correntes consideráveis para carregamento da bateria. Constata-se que após o desacoplamento elétrico, o alternador em sua configuração protótipo ainda apresenta tensão residual devido a um campo eletromagnético residual pelo acoplamento mecânico. Com o desacoplamento mecânico (após 0,5 segundo do elétrico), a tensão é instantaneamente cessada, assim como a geração de potência elétrica pelo alternador, conseqüentemente, e campos eletromagnéticos residuais (além de esforços mecânicos do alternador no eixo do motor). É importante frisar que tal comportamento e características observados neste acoplamento eletromecânico são semelhantes aos obtidos durante os demais ciclos de teste do veículo, cujas configurações se caracterizam pelo “ADE” segundo estratégia de desacoplamento e acoplamento eletromecânico.

4.5 Análise comparativa do estado de carga da bateria

Conforme exposto no Tópico 2.8, o alternador é o componente automotivo responsável por promover o carregamento da bateria ao fornecê-la energia elétrica. Dessa forma, para as configurações com alternador inteligente, esse somente proporciona carregamento da bateria quando acoplado eletricamente ao circuito do veículo, gerando potência elétrica. Além disso, no caso das configurações com o alternador dotado com embreagem eletromagnética operando de forma “cíclica” mecanicamente, o alternador somente proporciona o possível carregamento da bateria quando acoplado eletromecanicamente ao eixo do motor, gerando também potência elétrica. Na configuração base, o alternador está sempre gerando energia elétrica.

Para todas as configurações estudadas quando a corrente demandada pelos consumidores elétricos é menor que a corrente gerada pelo alternador, o balanço elétrico é positivo e a diferença de carga é enviada para a bateria, carregando-a. Caso o balanço elétrico seja negativo, ou seja, a carga elétrica demandada pelos

consumidores elétricos é maior que a carga fornecida pelo alternador, não há energia elétrica restante que possa ser enviada para a bateria para promover o seu carregamento, de forma que essa também fornece energia para o funcionamento elétrico adequado dos consumidores (consumindo sua carga). (BOSCH, 2005)

Diante disso, os resultados experimentais das variações no estado de carga da bateria ao longo de ensaios representativos do ciclo urbano e estrada para as configurações em estudo estão dispostos na Tabela 18. Além disso, a partir da Figura 50 pode-se observar graficamente a variação do estado de carga da bateria do veículo ao longo dos ciclos em relação à velocidade do veículo, promovendo uma comparação desse parâmetro para as configurações analisados neste trabalho.

O sensor IBS é o responsável pela leitura e fornecimento das informações da bateria, bem como o seu estado de carga (%). No caso do sensor IBS utilizado no veículo de teste, a sua parametrização tem como característica a resolução de 5%, ou seja, o menor incremento ou decréscimo possível “coletado” para o estado de carga da bateria é de 5%.

Para as análises seguintes dos resultados, é importante reforçar que, segundo as normas NBR 6601 (2012) e NBR 7024 (2017), o ciclo estrada ocorre após o ciclo urbano sem ocorrência de recarga da bateria. Dessa forma, o estado de carga da bateria inicial do teste do ciclo estrada corresponde ao estado de carga final resultante do ciclo urbano.

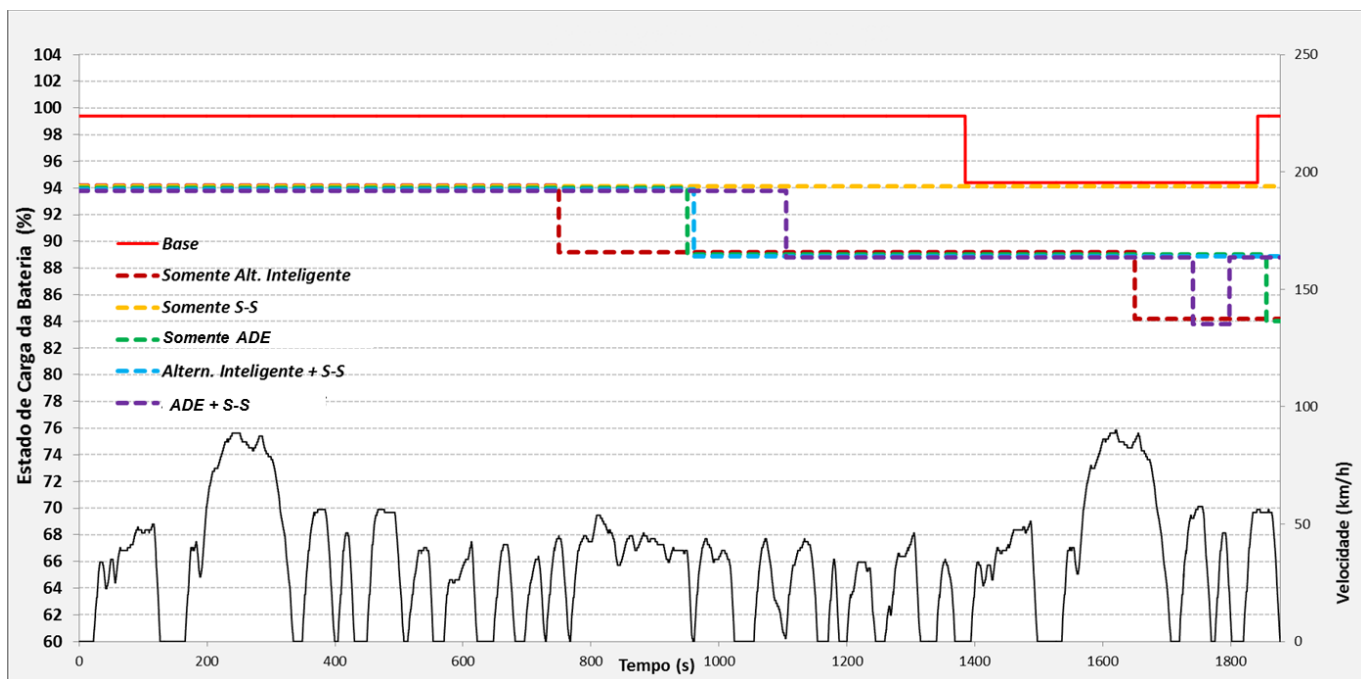
Tabela 18 - Variação do estado de carga da bateria no ciclo urbano e estrada

Configuração	CICLO URBANO			CICLO ESTRADA		
	Estado de Carga da Bateria			Estado de Carga da Bateria		
	Início do Ciclo	Final do Ciclo	Variação	Início do Ciclo	Final do Ciclo	Variação
<i>Base</i>	99%	99%	0%	99%	99%	0%
<i>Somente Alt. Inteligente</i>	94%	84%	-10%	84%	74%	-10%
<i>Somente S-S</i>	94%	94%	0%	94%	94%	0%
<i>Somente ADE</i>	94%	84%	-10%	84%	79%	-5%
<i>Altern. Inteligente + S-S</i>	94%	89%	-5%	89%	74%	-15%
<i>ADE + S-S</i>	94%	89%	-5%	89%	79%	-10%

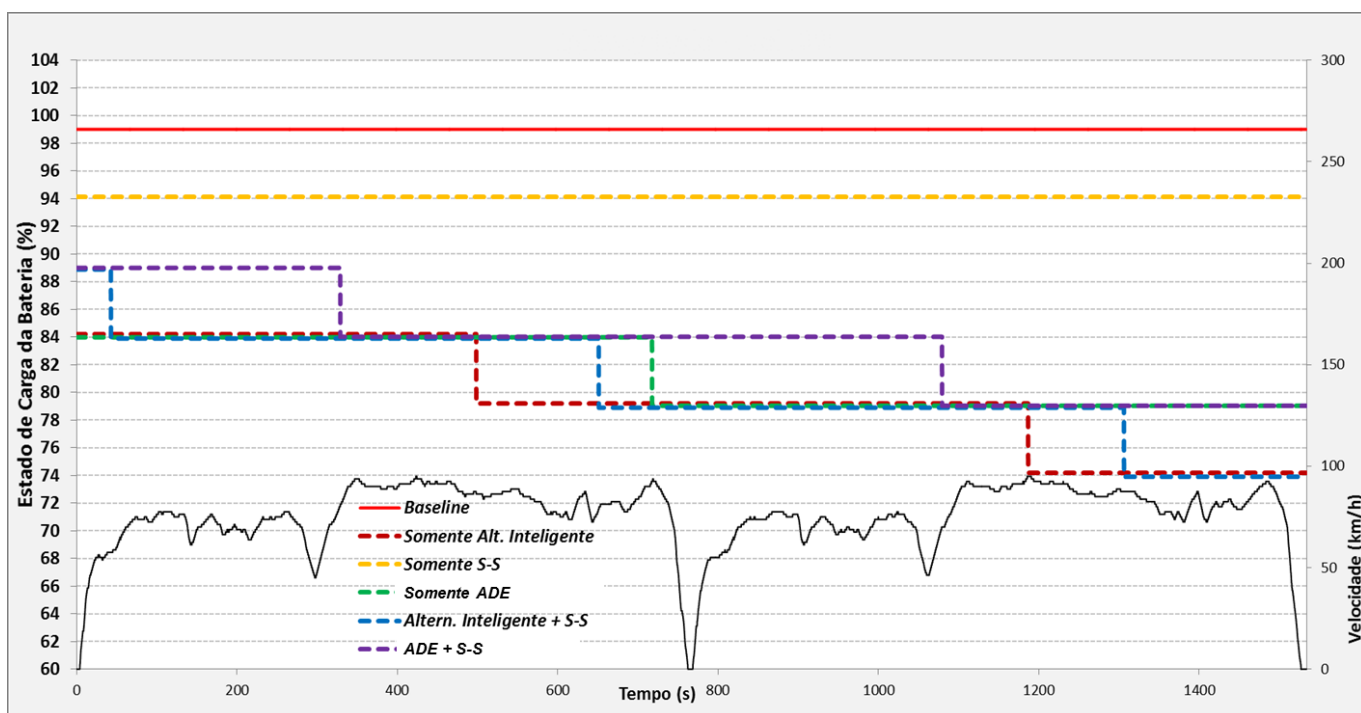
Fonte: Dados da pesquisa, 2020

Figura 50 – Variação dos estados de carga da bateria para as configurações estudadas

(a) Ciclo urbano
(b) Ciclo estrada



(a)



(b)

Fonte: Dados da pesquisa, 2020

De acordo com a análise da Tabela 18 e a Figura 50, percebe-se que a configuração base do alternador inicia o teste em ciclo urbano com 99% de estado de carga da bateria, com pequena variação por um decréscimo para 94% e posterior recuperação de carga para 99% ao fim do ciclo urbano (devido à maior solicitação elétrica dos componentes nessa fase com regime de condução mais “intenso” do ciclo urbano). Em seguida, a bateria inicia e termina o ciclo estrada com 99% de carga, não havendo variações ao longo desse ciclo. Logo, conforme já esperado, não há variação do estado de carga da bateria do início ao fim dos ciclos laboratoriais, visto que o alternador em sua configuração base permanece na totalidade do tempo de teste conectado ao eixo do motor, fornecendo máxima potência elétrica para o sistema elétrico do veículo integralmente.

Para as demais configurações, em que se há alguma tecnologia energética embarcada, todos os testes se iniciaram de forma que a bateria estivesse com 94% de estado de carga com o intuito de se ter isonomia nos comparativos dos resultados obtidos para esse quesito.

Para a configuração “somente alternador inteligente”, tem-se o alternador acoplado em regime de frenagens e desacelerações com “*cut-off*”, priorizando o carregamento da bateria; e desacoplado em situações de acelerações e retomadas de velocidades, conforme estratégia, deixando de carregar a bateria nestes momentos. Conforme pôde se observar, para o ciclo urbano houve decréscimo resultante de 10% no estado de carga da bateria (94% para 84%), devido ao regime transiente com solicitações de aceleração do ciclo urbano. Em seguida, para o ciclo estrada, também houve decréscimo de 10% do estado de carga da bateria (84% para 74%), visto que apesar do ciclo estrada possuir perfil mais permanente e constante, ainda assim o alternador permanece mais tempo desacoplado que acoplado. Apesar disso, a bateria nesta configuração não atingiu o estado crítico de baixa carga. Caso o atingisse, o alternador permaneceria acoplado em modo de carga rápida (“*quick charge*”), conforme estratégia explicitada no Tópico 2.13, segundo Montalto (2012).

Em relação à configuração de teste “somente Stop-Start”, pode-se destacar a presença do “alternador base”, o qual está a todo momento conectado ao eixo do motor promovendo o carregamento da bateria em sua potência elétrica máxima ao longo dos dois ciclos de condução. No ciclo urbano, com a atuação do sistema Stop-Start que desliga o motor nas paradas do veículo, o alternador é conseqüentemente desativado. Para esses momentos, portanto, não há carregamento da bateria e o

sistema elétrico do veículo com seus respectivos componentes permanece ligado, sendo alimentado integralmente pela bateria. Apesar disso, tais momentos não foram suficientes para promover o decréscimo resultante do estado de carga da bateria nesta configuração de teste, de forma que a bateria iniciou os testes no ciclo urbano com 94%, terminando o ciclo estrada também com 94%.

Para a configuração “alternador inteligente com Stop-Start”, em que há a junção das duas tecnologias, percebe-se resultados de estado de carga da bateria similares aos obtidos para a configuração de somente “alternador inteligente”. Entretanto, para a junção das tecnologias no ciclo urbano, houve redução resultante de carga menor (5% contra 10%), contrariando a expectativa inicial, visto que seria esperado maior gasto energético com a introdução do sistema Stop-Start devido às repartidas do motor após as paradas do veículo que demandariam maior gasto energético da bateria. Para o ciclo estrada, houve maior decréscimo da carga da bateria nesta configuração (15%), resultando em 74% da carga da bateria ao final dos testes. Novamente, isso pode ser explicado pelo maior tempo resultante que o alternador permanece desacoplado eletricamente, sem gerar energia elétrica para carga da bateria. Tal nível de carga resultante para essa configuração também não se mostra crítico para a bateria em si. Entretanto, caso tal resultado fosse obtido para configurações com alternador com desacoplamento mecânico, por estratégia, o alternador deixaria de desacoplar mecanicamente, permanecendo acoplado até atingir no mínimo bateria com estado de carga igual a 75%. Para o alternador inteligente com desacoplamento somente elétrico, o estado de carga mínimo que garante o desacoplamento também é 75%.

Para as configurações em que o alternador protótipo com embreagem eletromagnética se faz presente (“somente ADE” e “ADE + Stop-Start”), tem-se que a estratégia de carregamento da bateria sempre que essa embreagem for acionada, promove-se o acionamento do alternador pelo acoplamento de seu sistema de polia/correia ao eixo do motor a combustão interna. Tais acoplamentos, conforme previsto em estratégia, ocorrem essencialmente em situações de desacelerações com transmissão engrenada do veículo (gerando ocorrências de “*cut-off*” de combustível). Já os desacoplamentos eletromecânicos ocorrem em situações essencialmente de acelerações do veículo, respeitando-se os demais parâmetros estratégicos de funcionamento, como o estado de carga mínimo da bateria de 75%. Nos momentos

de desacoplamento, conseqüentemente, não há geração de potência elétrica para carregamento da bateria.

Para a configuração “somente ADE”, no ciclo urbano houve decréscimo de 10% do estado de carga da bateria, enquanto que no ciclo estrada houve decréscimo adicional de 5%, resultando em decréscimo total de 15%. Para a configuração “ADE + Stop-Start”, houve decréscimo de 5% do estado de carga da bateria no ciclo urbano e decréscimo adicional de 10% no ciclo estrada, completando 15% de decréscimo resultante. Para essa configuração com a junção do sistema Stop-Start, a maior descarga da bateria no ciclo estrada em comparação ao ciclo urbano pode ser explicada pela maior porcentagem de tempo que o alternador permanece desacoplado no ciclo rodoviário (95% do tempo) em relação ao ciclo urbano (89% do tempo), conforme Tópico 4.3 (Tabelas 16 e 17), de forma que nos momentos que esse encontra-se desacoplado eletromecanicamente, não há geração de energia elétrica para carregamento da bateria.

Dessa forma, para ambas as configurações em que se tinha a presença do ADE protótipo com embreagem eletromagnética seguindo a sua estratégia de operação, a carga da bateria passou de 94% do início dos testes para 79% ao fim dos testes. Tal porcentagem de estado de carga não é crítica para a bateria em si ou para o sistema Stop-Start ou mesmo para o funcionamento da estratégia de operação da embreagem eletromagnética (visto que a carga mínima de 75% para ocorrência de desacoplamentos não foi atingida durante e após o fim dos testes).

Comparando os resultados obtidos de estado de carga da bateria entre as configurações com alternador inteligente (acoplamento e desacoplamento elétrico) e alternador com embreagem eletromagnética (acoplamento e desacoplamento eletromecânico), pode-se observar que, no geral, ao final dos testes o decréscimo do estado de carga resultante para as configurações com ADE foi menor (ou seja, ao final dos testes a bateria possuía mais porcentagem de estado de carga: 79% em relação a 74% para configurações com o alternador inteligente). Tendo em vista que as estratégias de operação entre os dois tipos de alternadores são similares, uma hipótese que explica tal diferença nos níveis de carga resultantes refere-se ao fato que o ADE possui maior massa total (devido à interconexão com a embreagem eletromagnética que compõe o seu sistema total), conforme abordado no Tópico 2.8.4 (“Grau de eficiência do alternador”). De acordo com Bosch (2005), os alternadores maiores e mais pesados em massa possuem maior eficiência de geração de energia

elétrica para mesma carga de trabalho, em comparação a outros alternadores com menor massa (o maior peso destes alternadores é compensado pelo ganho em eficiência, mesmo com maior torque de inércia da massa). Logo, durante os acoplamentos do alternador com embreagem eletromagnética, há maior eficiência de geração da energia elétrica, ocasionando em ganhos maiores à bateria em relação ao alternador inteligente. Portanto, de acordo com essa hipótese, justificar-se-ia o maior estado de carga da bateria atingido ao final dos testes para a configuração com o alternador protótipo com desacoplamento eletromecânico (ADE).

4.6 Análise comparativa do consumo de combustível (consumo energético)

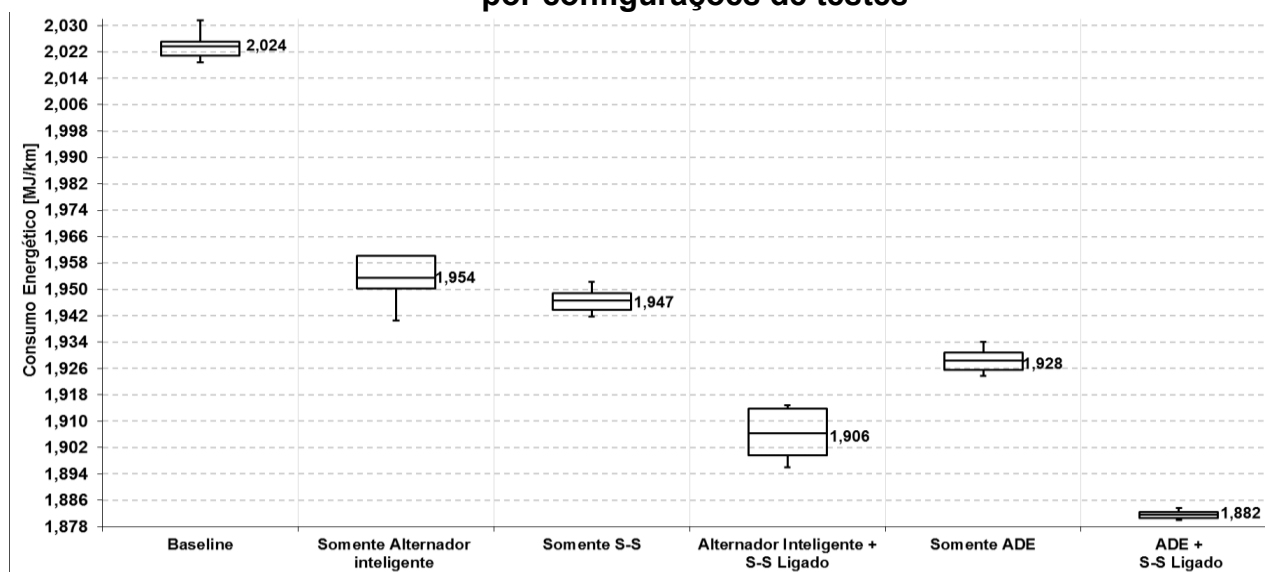
Conforme exposto no Tópico 3.2.4, o consumo de combustível é determinado a partir do método de balanço de carbono, que considera inicialmente as massas de gases de exaustão emitidas pelo veículo, em gramas por quilômetro (conforme visto na Equação 11). Assim, para o ciclo urbano, têm-se o consumo de combustível para cada fase e para o ciclo estrada já se obtém o consumo resultante (ambos em litros por 100 quilômetros). De forma a se obter o consumo resultante (em litros por 100 quilômetros) para o ciclo urbano, realiza-se a média ponderada de acordo com a Equação 12. Em seguida, têm-se a autonomia combinada entre o ciclo urbano e estrada, em quilômetros por litro, a partir da Equação 13. Entretanto, usualmente as comparações acerca de consumo são realizadas considerando a energia (poder calorífico inferior) do combustível utilizado. Assim, de acordo com o Tópico 3.2.5, obtém-se o consumo energético (em Megajoules por quilômetro) tanto para as fases e média total do ciclo urbano, tanto para o ciclo estrada e para a combinação de ambos.

Os resultados de autonomia foram obtidos para cada configuração após no mínimo três ensaios no Laboratório de Emissões com ciclo urbano e estrada, até que se tenha repetitividade máxima de 0,005 para o consumo energético combinado (considerando-se para o cálculo da incerteza expandida infinitos graus de liberdade e nível de confiança de 95%), conforme explicitado no Tópico 3.2.

As Figuras 51, 53 e 54 ilustram a partir de diagramas de blocos os resultados de consumo energético (MJ/km) para cada configuração de testes, respectivamente, no ciclo urbano, estrada e resultados de autonomies combinadas após médias harmônicas entre os ciclos urbano e estrada. Observa-se, também, que o rótulo de

dados numérico ao lado de cada bloco explicita o valor da média de consumo em Megajoules por quilômetro calculado pelos ensaios para cada configuração. É importante ressaltar que quanto maior a autonomia obtida nos resultados (em km/l), conseqüentemente menor o consumo energético calculado (em MJ/km). Assim, quanto menor o consumo energético combinado de determinada configuração, maior a sua eficiência energética.

Figura 51 – Consumo energético resultante das fases do ciclo urbano (MJ/km) por configurações de testes



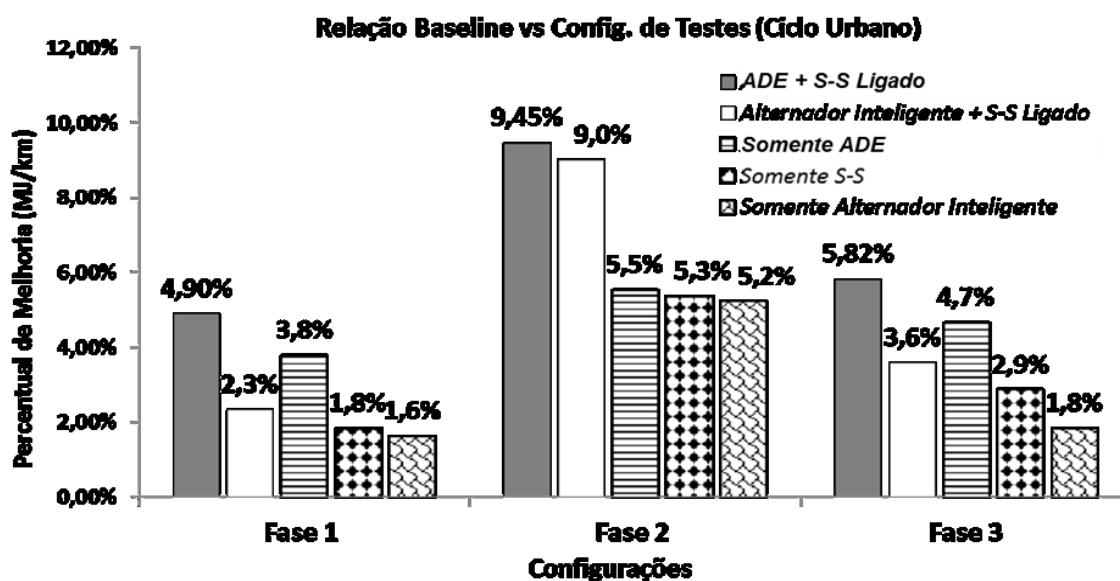
Fonte: Dados da pesquisa, 2020

Conforme pode ser observado na Figura 51, em média todas as configurações de testes obtiveram consumo energético menor que o obtido na configuração base, em que o alternador “normal produção” permanece acoplado ao eixo do motor gerando e fornecendo energia elétrica integralmente ao sistema elétrico do veículo de teste. Assim como esperado e já destacado anteriormente nos Resultados, o ciclo urbano proporciona maiores oportunidades para atuação das tecnologias embarcadas nas configurações de alternador inteligente, Stop-Start e alternador com desacoplamento mecânico. Com isso, nota-se que as configurações com combinação de tecnologias (Stop-Start com alternador inteligente e Stop-Start com ADE) ocasionaram em menor consumo energético em relação às configurações caracteristicamente com a utilização singular de uma dessas tecnologias. Considerando a mesma escala para as caixas do diagrama desses resultados, a configuração “ADE com Stop-Start ligado” demonstrou menor variabilidade (valor

numérico baixo de repetitividade) em relação às outras configurações. Isso pode ser comprovado visualmente pela menor dimensão da caixa (distância interquartil IQR) referente aos resultados do ciclo urbano para essa configuração em relação às outras caixas que representam os resultados das demais configurações. Entretanto, as outras configurações não extrapolaram o limite mínimo de valor de repetitividade imposto como objetivo/critério metodológico, legitimando os resultados.

Conforme explicitado anteriormente, todas as configurações resultaram em diminuição de consumo energético no ciclo urbano, considerando a ponderação das três fases deste ciclo. Dessa forma, a partir da Figura 52, é possível destacar o percentual de redução de consumo energético para cada configuração de teste, em relação à configuração base, por fase do ciclo urbano.

Figura 52 – Reduções percentuais do consumo energético para fases do ciclo urbano por configurações de testes

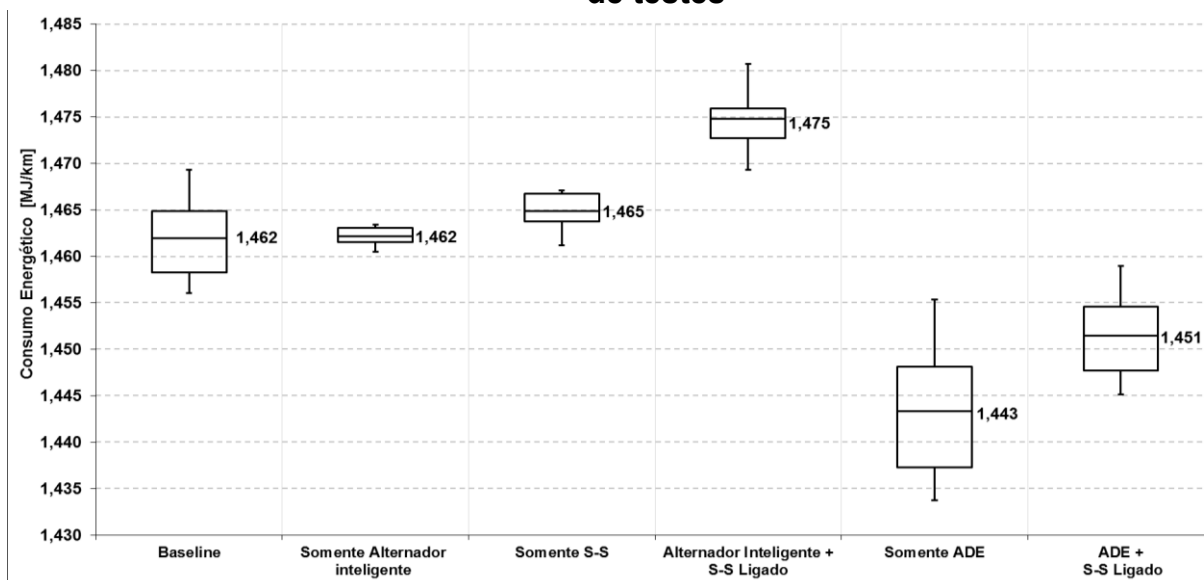


Fonte: Dados da pesquisa, 2020

É interessante destacar que para todas as fases, as maiores reduções foram observadas para a configuração mais completa energeticamente (ADE com embreagem eletromagnética ciclando aliado ao Stop-Start ligado). Para as configurações com Stop-Start ativado, observa-se que há maiores contribuições do sistema para redução do consumo energético na 2ª fase, seguida da 3ª e 1ª fase. Isso pode ser justificado pelo maior número de paradas do veículo na segunda fase (9 paradas efetivas com desligamentos do motor), além de que na 1ª fase o sistema

ainda se encontra inibido para as primeiras paradas do veículo (devido ao não atingimento da temperatura de 90°C de “*warm-up*” do motor até aproximadamente 280 segundos do ciclo, conforme explicitado no Tópico 4.1). Para os resultados referentes às configurações com alternador ciclando mecanicamente e inteligente (desacoplamentos elétricos), também há maiores contribuições de tais sistemas para redução do consumo energético na 2ª fase, seguida da 3ª e 1ª fase, respectivamente. Observa-se, da mesma forma, que há maiores oportunidades de atuação desses sistemas na 2ª fase. Conforme visto no Tópico 4.3 (Tabela 16), essa fase ocasionou 13 desacoplamentos mecânicos, com maior porcentagem do tempo em que o alternador com embreagem eletromagnética permaneceu desacoplado, ocasionando em menor gasto energético por menor inércia no eixo do motor. É importante ressaltar que, apesar de estratégia de desacoplamentos e acoplamentos semelhantes entre as configurações com ADE com embreagem eletromagnética e configurações com o alternador inteligente (desacoplamentos somente elétricos), a maior contribuição porcentual em cada fase de redução do consumo energético para o ADE deve-se essencialmente à retirada de esforço inercial mecânico e atrito do eixo do motor.

Figura 53 – Consumo energético para ciclo estrada (MJ/km) por configurações de testes

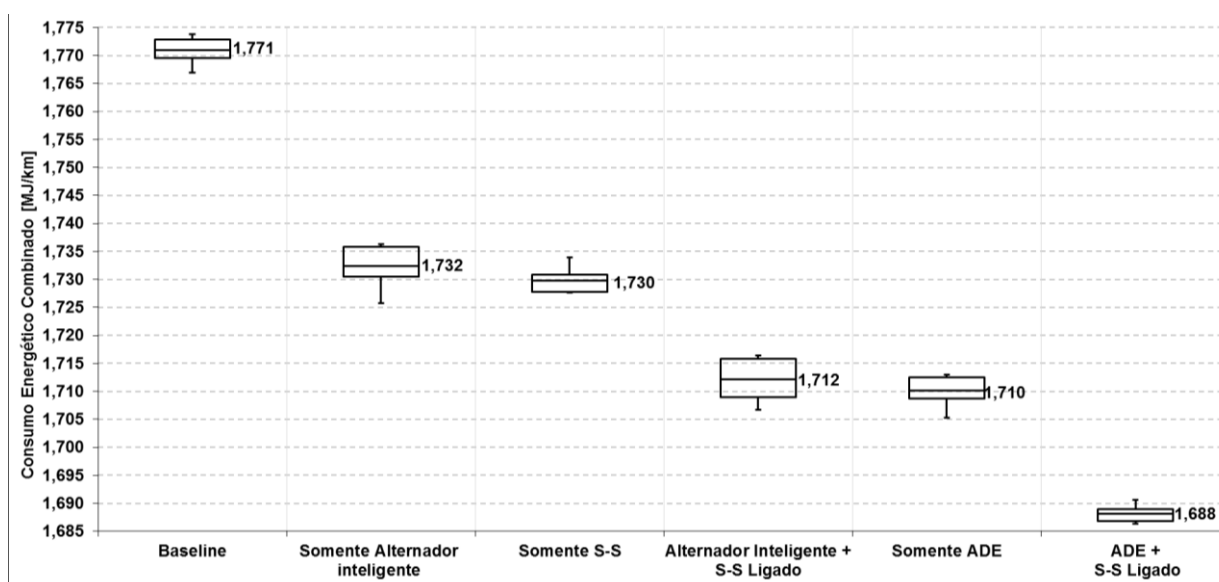


Fonte: Dados da pesquisa, 2020

A partir da Figura 53, tem-se os resultados relativos ao consumo energético (em MJ/km) para ensaios relativos ao ciclo estrada, por configurações de testes. Observa-se que em comparação com o consumo médio obtido para a configuração

baseline, somente as configurações que possuíam o ADE ciclando eletromecanicamente geraram consumos energéticos, em média, menores para o ciclo estrada. As demais configurações resultaram em consumo similar ou até no máximo 0,88% maior (configuração com alternador inteligente aliado ao sistema Stop-Start ligado). Diante disso, se constata que o ciclo estrada, por possuir caracteristicamente regime com maiores velocidades e rotações do motor, “beneficia” a retirada de inércia do eixo do motor proporcionada pelos desacoplamentos mecânicos do alternador segundo a sua estratégia (em momentos de aceleração). Logo, justifica-se as reduções significativas de consumo energético nesse ciclo somente para as configurações com o ADE com embreagem eletromagnética com operação “cíclica” (com estratégia de desacoplamento e acoplamento eletromecânicos), promovendo retirada considerável de inercial ao eixo do motor em situações de alta solicitação de torque e potência do motor (retomadas de aceleração), favorecendo o melhor cenário de eficiência energética. Além disso, de forma que não ocorra atuação do sistema Stop-Start no ciclo estrada (devido a inexistência de momentos de velocidade igual a zero do veículo de teste), tal sistema não contribui efetivamente para menor consumo neste cenário e regime de teste.

Figura 54 - Consumo energético combinado (MJ/km) por configurações de testes



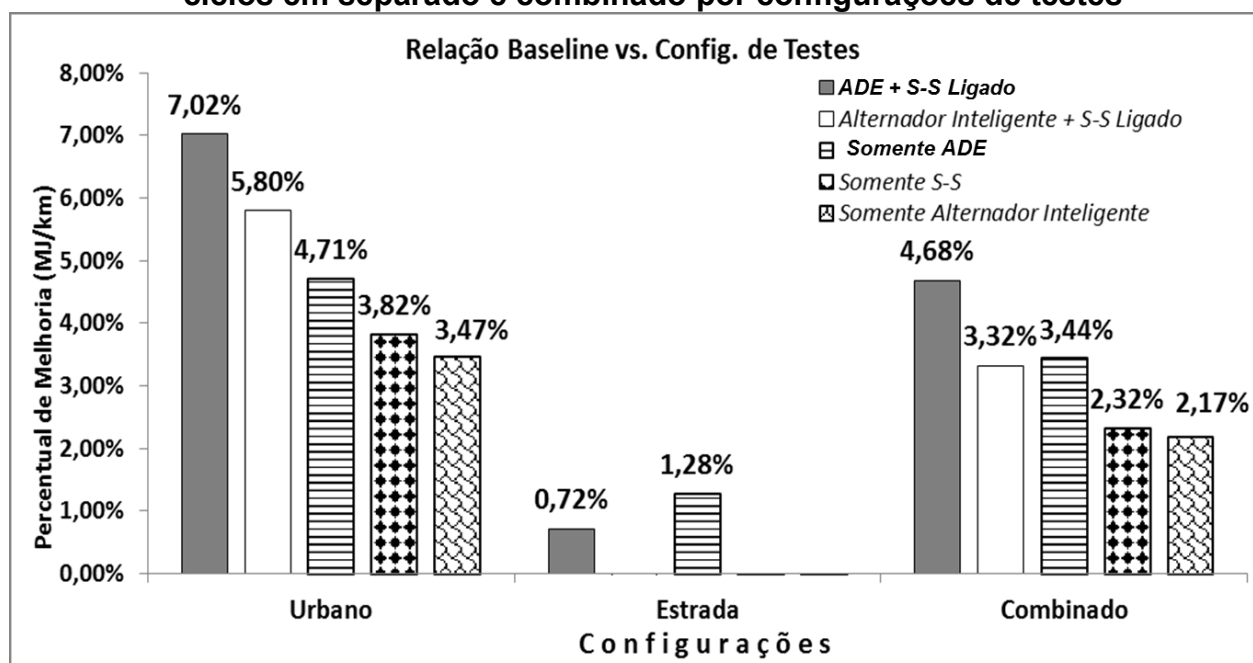
Fonte: Dados da pesquisa, 2020

Com isso, a Figura 54 mostra os resultados de consumo energético combinado de cada configuração após os ensaios experimentais, ou seja, calculada pela média

ponderada das autonomias em ciclo urbano e estrada (considerando fatores 0,55 e 0,45, respectivamente). Nota-se que, após a combinação ponderada dos resultados por ciclos anteriores, todas as configurações resultaram em melhorias de consumo energético em relação à configuração base. Conforme esperado inicialmente, a configuração com o menor consumo energético combinado resultante foi a que aliou o alternador com embreagem eletromagnética com desacoplamentos eletromecânicos com o sistema Stop-Start. Além disso, os testes para essa configuração apresentaram alta repetitividade, comprovada visualmente pela dimensão interquartil significativamente menor em relação às demais “caixas” do diagrama de resultados das outras configurações. Entretanto, é válido ressaltar que todas as configurações atingiram o objetivo metodológico de valor de repetitividade mínimo limite de 0,005, legitimando todos os resultados obtidos segundo metodologia e normativa do Laboratório de Emissões em que os ensaios experimentais foram realizados.

A Figura 55 ilustra um sumário com as reduções percentuais com melhorias no consumo energético para cada configuração de teste nos ciclos urbano, estrada e na combinação ponderada de ambos.

Figura 55 - Reduções percentuais resultantes do consumo energético para ciclos em separado e combinado por configurações de testes



Fonte: Dados da pesquisa, 2020

A utilização do alternador inteligente, com desacoplamentos elétricos, ocasiona em interrupção parcial do campo eletromagnético criado normalmente durante a geração de energia elétrica e, conseqüentemente, o carregamento mecânico sobre o eixo do motor é minimizado parcialmente, uma vez que parte desse carregamento mecânico ainda permanece em função da massa inercial rotativa presente no eixo do alternador. Dessa forma, a utilização somente dessa tecnologia ocasionou uma redução de 3,47% do consumo somente no ciclo urbano (não havendo redução significativa no ciclo estrada) e resultando em redução combinada de 2,17% no consumo energético. Assim, tais resultados excedem as reduções obtidas com a utilização desse sistema no estudo de Tatur *et al.* (2018), com 0,57% de redução de consumo no ciclo urbano FTP-75; 3,0% para o ciclo urbano europeu (NEDC) no estudo de Athani *et al.* (2016) e pelo estudo de Shin *et al.* (2019), que atingiu 2,1% de redução do consumo por utilização de um novo algoritmo para o alternador inteligente. Aliando-se ao sistema Stop-Start, houve incremento de 2,33% na redução obtida no ciclo urbano, devido aos desligamentos do motor em paradas do veículo, interrompendo a injeção de combustível em situações que seriam de marcha lenta da rotação do motor a combustão interna. Novamente, sem ganhos expressivos na eficiência energética para o ciclo estrada, houve redução resultante para essa configuração alternador inteligente com sistema Stop-Start ligado de 3,32% no consumo de combustível.

A utilização do alternador com desacoplamento eletromecânico (ADE) com embreagem eletromagnética ocasionou uma redução do consumo nos ciclos urbano e estrada (4,71% e 1,28%, respectivamente), resultando em redução combinada de 3,44%. A partir dos resultados obtidos anteriormente pela utilização isolada do primeiro protótipo deste alternador com embreagem eletromagnética, pode-se constatar que as reduções de consumo obtidas neste trabalho foram maiores que as anteriores atingidas por Sales *et al.* (2017): 3,09% para o ciclo urbano, 2,33% para ciclo estrada e 2,81% para combinação de ambos os ciclos. Isso pode ser explicado pelas evoluções estruturais e na estratégia deste novo protótipo para os testes realizados nestes experimentos. Além disso, com a adição do sistema Stop-Start ligado em funcionamento conjunto com este alternador, há redução ainda mais significativa do consumo energético no ciclo urbano (7,02%) e ciclo estrada (0,72%), gerando a maior redução combinada entre as configurações (4,68%). Somente as configurações com desacoplamento eletromecânico geraram diminuições no

consumo do ciclo estrada (além de expressivas reduções no ciclo urbano), visto que em relação ao alternador inteligente (conforme já explicitado anteriormente), há maior ganho energético devido à eliminação total da carga inercial mecânica rotacional e atrito do alternador no eixo do motor. Logo, a “quantidade de combustível” necessária para injeção torna-se “menor” devido aos menores esforços necessários para funcionamento e rotação do motor.

Analisando os resultados de melhoria energética proporcionados pelo sistema Stop-Start, conclui-se que para todas as configurações de alternador em que esteve aliado, promoveu incremento da redução do consumo de combustível, mostrando-se um expressivo complemento a tais tecnologias. Isoladamente, gerou redução de 3,82%, sendo 0,35% maior no consumo para o ciclo urbano em relação ao uso isolado do alternador inteligente e 0,89% menos redução que o ADE no ciclo urbano. Entretanto, para o ciclo estrada, conforme também já demonstrado antes, não contribuiu com redução energética, visto que não há oportunidades de velocidade igual a zero do veículo nesse regime de ciclo para sua atuação. Comparado com estudos anteriores, o sistema Stop-Start utilizado neste trabalho proporcionou redução ligeiramente maior em relação a nova calibração desenvolvida e testada por Wang *et al.* (2013), com redução de 3,5% no consumo energético em ciclo FTP-75, assim como redução na mesma ordem de grandeza no consumo em relação à utilização do sistema com combustível alternativo Ibu12 em ciclo FTP-75 (3,57%), conforme abordado por Storey *et al.* (2019). É importante destacar o potencial maior de aplicação do sistema Stop-Start para ciclos reais de condução em redução de consumo energético, assim como frisado pelo estudo de Athani *et al.* (2018), em que se obteve 13% de redução de consumo com um algoritmo que promove a otimização da estratégia do sistema pela aprendizagem da condução do motorista (redução no consumo 3,4 vezes maior que a redução obtida em ciclo urbano de laboratório neste trabalho). Além disso, assim como mostrado nos resultados deste trabalho, o sistema Stop-Start mostra-se como uma tecnologia que pode ser efetivamente combinada com outras para incrementar reduções no consumo energético veicular, bem como também expressado pelo estudo de Martins (2016) pela redução combinada dos ciclos laboratoriais FTP-75 e estrada de 4,63% no consumo de combustível pela associação do Stop-Start com um gerador fotovoltaico.

De forma geral, conforme observado nos resultados presentes na Figura 55, é importante ressaltar e destacar que a junção de duas tecnologias/sistemas diferentes

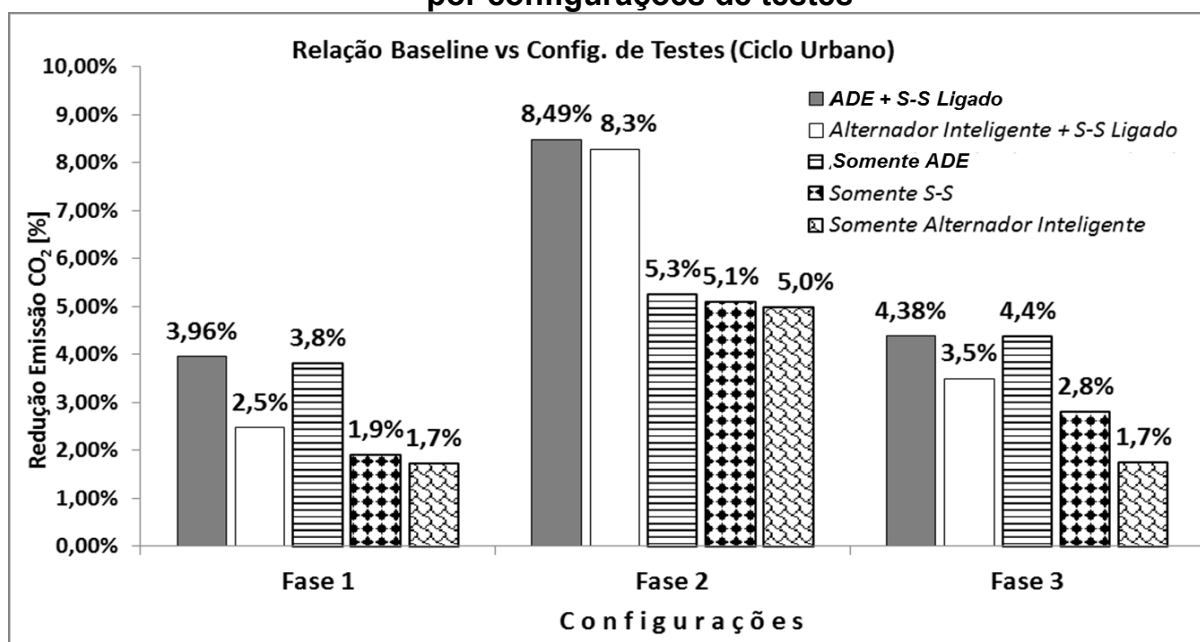
não ocasiona diretamente em uma redução de consumo energético resultante diretamente da soma exata das reduções obtidas por cada um desses de forma isolada, mas sim de um valor menor percentual. Uma hipótese que poderia explicar isso refere-se aos efeitos parcialmente “concorrentes” entre as tecnologias quando aliadas, como na configuração de sistema Stop-Start junto ao alternador inteligente. Nessa configuração, por exemplo, devido às repartidas do motor ocasionadas pelos consecutivos desligamentos promovidos pelo sistema Stop-Start, há maior gasto energético do sistema elétrico do veículo, principalmente da bateria e de seu estado de carga. Dessa forma, faz-se necessário maiores períodos de acoplamento elétricos do alternador inteligente (inclusive em alguns dos períodos de aceleração, o quais originalmente por estratégia gerariam desacoplamentos elétricos) para garantir níveis resultantes de estado de carga da bateria aceitáveis para contínuo acionamento do sistema Stop-Start e funcionamento dos demais componentes eletrônicos do veículo.

4.7 Análise comparativa dos níveis de emissões de CO₂

Conforme visto no Tópico 3.2.3, as emissões de gases em gramas por quilômetros para o ciclo urbano são definidas pela Equação 10, a partir dos dados obtidos de emissões dos gases em gramas para cada fase do ciclo. Para o ciclo estrada, as emissões são obtidas diretamente pelas medições realizadas nos 767 segundos após o pré-condicionamento do veículo que ocorre após a 3ª fase do ciclo urbano. Com isso, pode-se determinar as emissões de CO₂ por fases e as resultantes para cada ciclo.

A Figura 56 mostra as reduções percentuais obtidas de emissão de gás dióxido de carbono (CO₂) dentre as configurações de testes (em relação à configuração base) para as três fases do ciclo urbano.

Figura 56 - Reduções percentuais de emissão de CO₂ por fases do ciclo urbano por configurações de testes

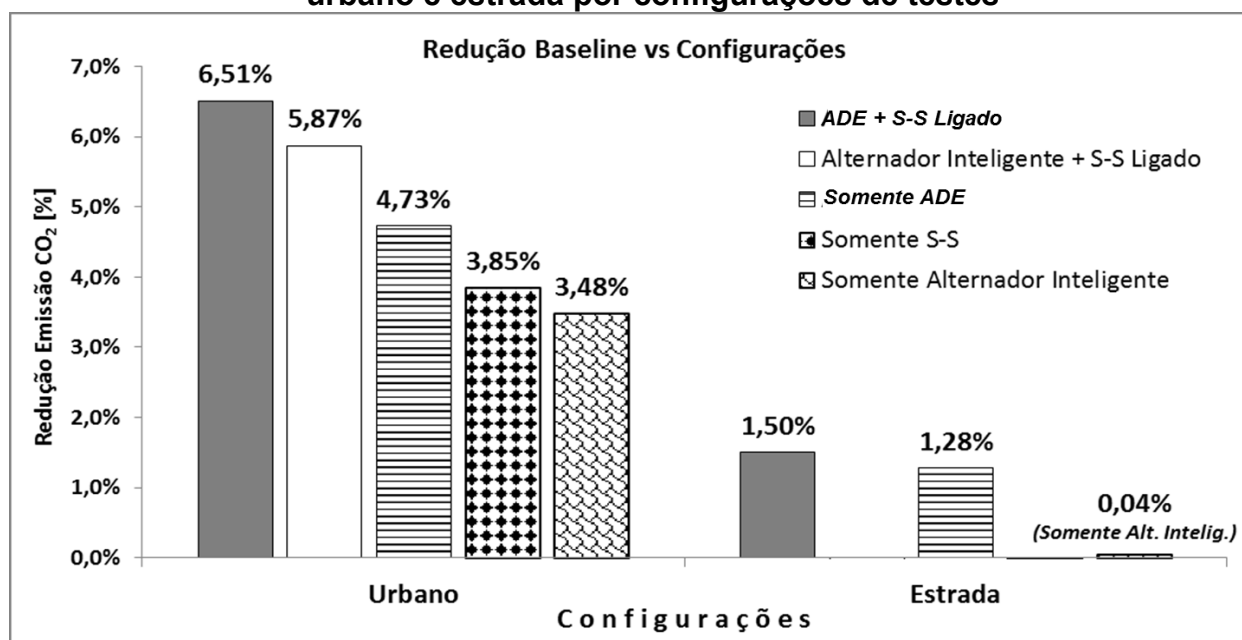


Fonte: Dados da pesquisa, 2020

Conforme visto na Figura anterior, as reduções de emissão de CO₂ para as configurações de teste no ciclo urbano mostraram-se alinhadas com as melhorias energéticas percentuais no consumo, conforme explicitado anteriormente. Isso já era esperado, visto que o cálculo do consumo energético é diretamente relacionado às emissões de gases para o veículo de teste nos ensaios laboratoriais, principalmente o gás dióxido de carbono, como já mostrado no Tópico de Metodologia. Destaca-se, portanto, que a configuração com maior redução de emissão de CO₂ é referente ao ADE com embreagem eletromagnética “ciclado” aliado ao sistema Stop-Start em todas as fases do ciclo urbano. Para todas as configurações, a 2ª fase representou as maiores reduções em resultados, seguida pela 3ª e 1ª fase, conforme já explicitado no Tópico anterior.

A Figura 57 apresenta os resultados gerais de redução de emissão de gás dióxido de carbono a partir das configurações de testes para o ciclo urbano e estrada. Conforme pode-se observar, assim como o esperado, as reduções obtidas são alinhadas às reduções no consumo energético para cada configuração nos testes para ciclo urbano e estrada, como já explicitado no Tópico anterior.

Figura 57 - Reduções percentuais resultantes de emissão de CO₂ para ciclo urbano e estrada por configurações de testes



Fonte: Dados da pesquisa, 2020

Destaca-se, também, que a configuração mais “completa energeticamente” representada pelo uso do ADE “ciclado” eletromecanicamente aliado ao Sistema Stop-Start ligado e atuante alcançou maiores reduções de emissões de CO₂ para o ciclo urbano (6,51%) e ciclo estrada 1,50%. De forma resultante, somente as configurações que possuíam alternador com embreagem eletromagnética apresentaram reduções significativas de redução de emissão de dióxido de carbono no ciclo estrada (1,28% para a configuração de “somente ADE”, em comparação com a redução quase imperceptível de 0,04% para a configuração de “somente alternador inteligente”), beneficiando-se da retirada de inércia no funcionamento do motor a combustão interna pelo regime com rotações elevadas do ciclo estrada, conforme já explicado anteriormente.

Com os resultados obtidos, pode-se estabelecer comparativos com resultados da Literatura expostos no Tópico de Estado da Arte deste trabalho. Diante do alternador com embreagem eletromagnética com operação “cíclica”, pode-se observar que as diferenças estruturais e aperfeiçoamentos de estratégia em relação ao estudado por Sales *et al.* (2017) foram bastante eficientes, promovendo aumento considerável da redução de CO₂ para o ciclo urbano (FTP-75) nesta configuração de 2,95% para 4,73%. Para o ciclo estrada, a redução obtida neste trabalho está alinhada em grandeza com a obtida por Sales *et al.* (2017), sendo 1,28% em comparação à

1,84%. Em relação ao uso do alternador inteligente neste trabalho, pode-se destacar que uma redução de 3,48% em emissões no ciclo FTP-75 foi maior do que a obtida por Montalto *et al.* (2012) com a utilização de sistema similar (redução de 2,10% emissão CO₂), porém submetido ao ciclo laboratorial europeu (NEDC). Assim, tais diferenças podem ser explicadas pela evolução tecnológica das estratégias e sistema do alternador inteligente utilizado neste trabalho em detrimento ao utilizado por Montalto *et al.* (2012) em sua publicação, além de possíveis diferenças no ciclo urbano testado neste trabalho, privilegiando a atuação em maior parte do tempo (maior quantidade de desacelerações e “*cut-offs*”, por exemplo).

Com isso, é importante ressaltar que a formação de dióxido de carbono é diretamente relacionada à quantidade de combustível presente em sua combustão, conforme ilustrado no Tópico 2.10.2. Assim, quanto maior a redução do consumo de combustível, maior a redução da emissão de CO₂.

5 CONCLUSÕES

A partir dos testes experimentais e das análises dos resultados obtidos foi possível concluir que a utilização das tecnologias e sistemas das configurações de testes proporcionaram ganhos energéticos em relação à configuração base (alternador normal produção), além de melhorias ambientais e de sustentabilidade pela redução de emissão de gás dióxido de carbono (CO₂).

De acordo com os resultados, a configuração de teste mais completa energeticamente com maior redução no consumo de combustível foi a do alternador dotado de embreagem eletromagnética com desacoplamentos eletromecânicos (ADE) em conjunto com o sistema Stop-Start funcionando. Tal configuração atingiu redução do consumo energético de 7,02% no ciclo urbano, 0,72% no ciclo estrada e 4,68% na combinação resultante de ambos os ciclos. Para a configuração de somente ADE com embreagem eletromagnética, sem o funcionamento do Stop-Start, houve redução combinada dos ciclos de 3,44% no consumo (com redução de 4,71% para ciclo urbano e 1,28% para ciclo estrada), de forma que pôde-se constatar a contribuição energética resultante do sistema Stop-Start para este alternador (1,24% de redução no consumo para combinação de ciclos). Em relação ao alternador inteligente, em que há somente desacoplamentos elétricos, aliado ao sistema Stop-Start houve redução combinada energética de 3,32% (5,80% para ciclo urbano). Para utilização do alternador inteligente, sem sistema Stop-Start, houve redução no consumo energético combinado de 2,17% (sendo 3,47% para o ciclo urbano e 0% para ciclo estrada). Neste caso, o funcionamento do sistema Stop-Start contribuiu com 1,15% como parcela de redução combinada no consumo de combustível. De forma isolada, para a configuração com somente o sistema Stop-Start funcionando, houve redução combinada entre os ciclos de 2,32% no consumo energético, sendo que a contribuição no ciclo urbano correspondeu a 3,82% e 0% para o ciclo estrada, conforme já explicitado.

Em relação às emissões de dióxido de carbono, as reduções obtidas para as configurações de teste seguem em alinhamento às reduções calculadas para o consumo energético, devido ao balanço de carbono para reações de combustão. Diante disso, a configuração com maior contribuição ambiental com maiores reduções em emissões de gás dióxido de carbono é a que utilizou o alternador com embreagem eletromagnética aliado ao sistema Stop-Start, com redução de 6,51% para o ciclo

urbano e 1,50% para o ciclo estrada. Em seguida, há a configuração com a utilização do alternador inteligente também aliado ao sistema Stop-Start, com redução de 5,87% para ciclo urbano e sem redução significativa para ciclo estrada. Abordando a configuração em que há somente o ADE com embreagem ciclando, observou-se redução de 4,73% de emissão de CO₂ no ciclo urbano e 1,28% para ciclo estrada. Por conseguinte, há a configuração com utilização somente do sistema Stop-Start com redução de 3,85% e, por último, há a configuração com utilização somente do alternador inteligente com redução de CO₂ em 3,48% para o ciclo urbano e 0,04% para o ciclo estrada.

Pelos resultados também se pôde concluir que a utilização de cada configuração de teste proposta não ocasionou em prejuízos para o balanço elétrico do veículo, promovendo o carregamento da bateria veicular e fornecendo a energia elétrica necessária para o funcionamento correto dos consumidores. Assim, ao final dos testes com maior representatividade do ciclo urbano e estrada variou de 74% a 99%, de acordo com cada configuração proposta. Destacam-se os resultados obtidos para as configurações que possuíam o alternador protótipo com embreagem eletromagnética realizando desacoplamentos mecânicos, em que o estado de carga da bateria ao final dos testes no ciclo estrada atingiu 79%, sendo maior que o limite crítico determinado por estratégia para que o alternador fique sempre acoplado carregando a bateria (75% de estado de carga). Logo, os resultados obtidos mostram que ao final dos testes a bateria ainda possuía uma margem considerável para esse limite.

Dessa forma, os resultados comprovam a efetividade de todas as configurações de testes experimentadas neste trabalho para aumento da melhoria da eficiência energética veicular. Dentre as possibilidades de aplicação das tecnologias estudadas, mesmo utilizando-se os sistemas Stop-Start, alternador inteligente ou alternador com embreagem eletromagnética (ADE) de forma isolada, há contribuições energéticas expressivas, conforme explorado nesta Dissertação. Além disso, pode-se utilizar os sistemas de forma combinada (sistema Stop-Start aliado aos tipos de alternadores estudados), de forma a obter efeitos maiores de redução de consumo energético e, conseqüentemente, redução na emissão de CO₂. Destaca-se, portanto, que a combinação do sistema Stop-Start com o alternador com desacoplamento eletromecânico com embreagem eletromagnética operando de forma estratégica mostrou-se como a configuração mais completa energeticamente para promover

melhorias na eficiência energética do veículo de teste. Além disso, tal alternador com embreagem eletromagnética representa avanços consideráveis estruturais e estratégicos em relação ao primeiro protótipo estudado por Sales *et al.* (2017), de forma a refletir em maiores reduções energéticas e de emissão de gás dióxido de carbono alcançados neste trabalho.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Há várias possibilidades para pesquisas futuras que podem ser desenvolvidas acerca do tema abordado neste trabalho. Dentre essas, seria interessante coletar dados e obter resultados para as configurações de tecnologias abordadas em testes com ciclos reais de estrada e urbano (ruas/avenidas), fora do Laboratório de Emissões. Com isso, variáveis reais experimentais e não controladas poderiam influenciar nos testes, como o trânsito, percurso, topografia do terreno, resistência real do ar e de rolamento, temperatura externa, umidade do ar e perfil de rodagem do condutor no urbano e estrada. Assim, os resultados experimentais controlados em Laboratório de Emissões obtidos neste trabalho poderiam ser comparados com os resultados em ciclos reais.

O acoplamento mecânico no alternador com embreagem eletromagnética representa um estado “crítico” da condição de operação do alternador devido a sua inércia rotacional. Dessa forma, poder-se-ia também estudar e analisar de forma aprofundada o impacto do seu acoplamento em sua durabilidade e na dirigibilidade do veículo, sendo essa uma linha de pesquisa que se mostra promissora. Alinhando a isso, sugere-se também a determinação quantitativa da potência consumida do conjunto motopropulsor especificamente devido à inércia rotacional do alternador.

Além disso, também há a possibilidade do estudo das emissões dos demais gases regulamentados, além do CO₂ (CO, HC, NO_x, aldeídos e NMHC), estabelecendo uma comparação entre as configurações de teste experimentadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, I. S. **Análise da influência do sincronismo da injeção de combustível com a válvula de admissão no consumo e emissões de um motor de ignição por centelha**. 2014. Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte.

ALI, I., YANG, K., KIM, S. **E3 System - A Two speed Accessory Belt Drive System for Reduced Fuel Consumption**. SAE Technical Paper N° 2008-01-1521. 2008

ALMER, C., WINKLER, R. **Analyzing the effectiveness of international environmental policies: The case of the Kyoto Protocol**. *Journal Of Environmental Economics And Management*, vol 82, 2017

ANDRIOTTI, J.L.S. **Técnicas estatísticas aplicáveis a tratamento de informações oriundas de procedimentos laboratoriais**. Porto Alegre: CPRM – Superintendencia Regional de Porto Alegre. 2005

ACORDO DE PARIS. **Adoption of the Paris Agreement**. In: Conference of the Parties. 2015. Disponível em: <http://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/eng/l09r01.pdf>. Acesso em 06 out. 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR ISO 1585: **Veículos rodoviários - Código de ensaio de motores - Potência líquida efetiva**. Rio de Janeiro. 1996.

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 escapamento**. Rio de Janeiro. 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 7024: **Veículos Rodoviários Automotores Leves – Medição do Consumo de Combustível - Método de Ensaio**. Rio de Janeiro. 2017.

ATHANI, G., DONGARE, K., GAVARRAJU, S. R., KULKARNI, S., YERRAGUNTLA, P. **A Method for Estimating the Improvement in Fuel Economy, for a Vehicle with Intelligent Alternator Control, and Application in Connected Car Systems**. SAE Technical Paper N° 2016-01-0010. 2016

ATHANI, G., GAVARRAJU, S. R., JAIN, P., ADDALA, S., SATISHKUMAR, P. **An Engine Stop Start System with Driver Behavior Learning and Adaption for Improving the User Experience**. SAE Technical Paper N° 2018-01-0609. 2018

AVL. **AVL ROADSIM Chassis Dynamometer**. Disponível em: <https://www.avl.com/-/avl-roadsim-chassis-dynamometer>. Acesso em 25 Set. 2019.

AZUMA, K. **Systems Modeling of Automotive Eletrical and Eletronic Architecture**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Sistemas Eletrônicos). Universidade Keio. Tóquio, Japão. 2014

BAO, C., CHEN, C., KUI, H., WANG, X. **SSVisual: Intelligent Start-Stop System**. 20th IEEE International Conference on Mobile Data Management (MDM). 2019

BOSCH, R. **Manual de tecnologia automotiva**. São Paulo: EdgardBlücher. 2005.

BOSCH, R. **Sistema start/stop**. 2019. Disponível em: < http://br.bosch-automotive.com/pt/internet/parts/parts_and_accessories_2/motor_and_sytems/start_stop_system/overview_start_stop_sytem_1.html>. Acesso em 24 Out. 2019.

BOSCH, R. **Electronic Battery Sensor**. 2019. Disponível em: < <https://www.bosch-mobility-solutions.com/en/products-and-services/passenger-cars-and-light-commercial-vehicles/interior-and-body-systems/body-electronics/electronic-battery-sensor/>>. Acesso em 23 Ago. 2019

BOSCH, R. **Alternadores, Motores de Partida e Principais Componentes – Catálogo**. 2019. Disponível em: <http://br.bosch-automotive.com/media/parts/download_2/eletrica/2018_Catalogo_Eletrica.pdf> Acesso em 07 Jul. 2019

BRASIL. **Decreto Legislativo nº 144, de 20 de junho de 2002**. Aprova o texto do Protocolo de Kyoto à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima, aberto a assinaturas na cidade de Kyoto, Japão, em 14 de dezembro de 1997, por ocasião da Terceira Conferência das Partes da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima. Diário Oficial, Brasília, DF, 20 jun. 2002. Disponível em: <https://www2.camara.leg.br/legin/fed/decleg/2002/decretolegislativo-144-20-junho-2002-458772-protocolo-1-pl.html>. Acesso em 02 Set. 2019

BRASIL. **Decreto nº 7.819, de 3 de out. 2012**. Regulamenta os arts. 40 a 44 da Lei nº 12.715, de 17 de setembro de 2012, que dispõe sobre o Programa de Incentivo à Inovação Tecnológica e Adensamento da Cadeia Produtiva de Veículos Automotores - INOVAR-AUTO, e os arts. 5º e 6º da Lei nº 12.546, de 14 de dezembro de 2011, que dispõe sobre redução do Imposto sobre Produtos Industrializados. **Diário Oficial da União**, Brasília, 3 out. 2012. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/Decreto/D7819.htm>. Acesso em 25 Out. 2019

BRASIL. **Decreto Nº 9.557, de 8 de Novembro de 2018**. Regulamenta a Medida Provisória nº 843, de 5 de julho de 2018, que estabelece requisitos obrigatórios para a comercialização de veículos no País, institui o Programa Rota 2030 - Mobilidade e Logística e dispõe sobre o regime tributário de autopeças não produzidas. **Diário Oficial da União**, Brasília, 9 nov. 2018. Disponível em: < http://www.in.gov.br/materia/-/asset_publisher/Kujrw0TZC2Mb/content/id/49480369>. Acesso em 27 Out. 2019

BRASIL. **Lei Nº 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. **Diário Oficial da União**, Brasília, 21 jun. 2019. Disponível em: <<http://www.in.gov.br/web/dou/-/lei-n-13.755-de-10-de-dezembro-de-2018-167070058>>. Acesso em 27 Out. 2019

BRITANNICA ACADEMIC. **Alphonse Beau de Rochas**. 1998. Disponível em: <academic-eb-britannica.ez27.periodicos.capes.gov.br/levels/collegiate/article/Alphonse-Beau-de-Rochas/13973>. Acesso em 14 Ago. 2020.

BRITANNICA ACADEMIC. **Diesel engine**. 2019. Disponível em: <academic-eb-britannica.ez27.periodicos.capes.gov.br/levels/collegiate/article/diesel-engine/106037>. Acesso em 21 Ago. 2020.

CARREÑO A. R. **A Comprehensive Methodology To Analyse The Global Energy Balance In Reciprocating Internal Combustion Engines**. 2016. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universitat Politecnica De Valencia, Espanha.

CEPA/USP - Centro de Ensino e Pesquisa Aplicada/Universidade de São Paulo. **Eletromagnetismo – Indução Eletromagnética**. 2007. Disponível em: <http://www.cepa.if.usp.br/e-fisica/eletricidade/basico/cap16/cap16_04.php>. Acesso em 04 Set. 2019.

CHO, J. M., YOON, Y. D., LEE, J. S., KIM, H. C. **Hyundai's New Generation 1.8L Gasoline Engine**. SAE Technical Paper Nº 2011-01-0417. 2011

CIMA - Conselho Interministerial do Açúcar e do Alcool. **Resolução nº 1 de 28 de fevereiro de 2013**. Dispõe sobre a adição de álcool etílico anidro combustível à gasolina. Diário Oficial, Brasília, DF, 1 Mar. 2013.

CONTINENTAL. **Intelligent Battery Sensor (IBS)**. 2019. Disponível em: <https://www.continental-automotive.com/en-gl/Passenger-Cars/Chassis-Safety/Integrated-Safety/Intelligent-Battery-Sensor>. Acesso em 21 Out. 2019.

DAL POGGETO, G. **Critérios para seleção da arquitetura elétrica veicular em mercados emergentes**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo.

DIAS, A. **Funcionamento dos Alternadores para Motores de Automóveis**. 2015. Disponível em: <<http://carrosinfoco.com.br/2015/05/funcionamento-e-detahes-do-alternador-do-sistema-eletrico-dos-automoveis-com-motor-de-combustao-interna/>>. Acesso em 15 Set. 2019

DIAS, B. M. A. **Unidade microcontroladora para gerenciamento eletrônico de um motor de combustão interna ciclo Otto**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Sistemas Eletrônicos). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo. 2015.

FERREIRA, A. L. F., BERTO, L. F., MICHELOTTI, A. C., PASTORELLI, P. P., TAKEMORI, C. K. **Experimental Evaluation of Multiple FEAD Layouts and Potential Contribution for Fuel Consumption and Emissions Reduction in Downsized Internal Combustion Engines**. SAE Technical Paper nº 2018-36-0050. 2018

FIAT. **Manual do seu Fiat**. 2019. Disponível em: https://servicos.fiat.com.br/como_cuidar_do_seu_fiat/manual_do_veiculo.html Acesso em 13 de Set. 2019.

FIGLIOLA, R. S., BEASLEY D. E. **Theory and Design for Mechanical Measurements**. 5ª edição. John Wiley & Sons. 2011.

FIGUEIREDO E. F. **Contribuição para melhoria da correlação entre dados simulados e reais de autonomia de um veículo flex fuel**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, Minas Gerais.

FLEMMING, F. **The Basics of Electromagnetic Clutches and Brakes**. *Machine Design Journal*, pp-55-58. Jul. 2009.

GALARNYK, M. **Understanding Boxplots**. 2018. Disponível em: <https://towardsdatascience.com/understanding-boxplots-5e2df7bcbd51>. Acesso em 12 Nov. 2019

GLOBE NEWSWIRE. **Increasing Investment in Integration of Modern Concepts in Automobiles Will Aid Growth, says Fortune Business Insights**. Disponível em: <https://www.globenewswire.com/news-release/2020/04/17/2017785/0/en/Automotive-Start-Stop-System-Market-to-Rise-at-12-4-CAGR-till-2026-Increasing-Investment-in-Integration-of-Modern-Concepts-in-Automobiles-Will-Aid-Growth-says-Fortune-Business-Insights.html>. Acesso em 14 Agosto 2020.

GONÇALVES, E. B., ALVES, A. P. G., MARTINS, P. A. **Questões críticas em validação de métodos analíticos**. Brasília, DF : Embrapa Informação Tecnológica, 2011.

HEYWOOD, J. B. **Internal combustion engine fundamentals**. 1. ed. Singapore: McGraw-Hill, 1988.

ICCT - *The International Council on Clean Transportation* (Conselho Internacional de Transportes Limpos). **2017 Global update: Light-duty vehicle greenhouse gas and fuel economy standards**. 2017. Disponível em: <https://theicct.org/publications/2017-global-update-LDV-GHG-FE-standards>. Acesso em 04 de Set. 2019

INCROPERA, F. P., DEWITT, P. D. **Fundamentos de Transferência de Calor e Massa**. Ed. LTC, 5ª edição, 2003.

INDC – Intended Nationally Determined Contribution – **Pretendida Contribuição Nacionalmente Determinada**. Governo da República Federativa do Brasil pelo Ministério do Meio Ambiente. 2015. Disponível em: <http://www.itamaraty.gov.br/images/ed_desenvsust/BRASIL-iNDC-portugues.pdf>. Acesso em 8 Ago. 2019

INFOMONEY. **ANP prevê Brasil autossuficiente em petróleo no início da próxima década**. 12/01/2017. Disponível em: <<http://www.infomoney.com.br/petrobras/noticia/6013431/anp-preve-brasil-autossuficiente-petroleo-inicio-proxima-decada>>. Acesso em 11 Out. 2019.

INMETRO. **PBE Veicular chega ao oitavo ciclo com adesão de todas as montadoras**. 2016. Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/imprensa/releases/pbe-veicular-adesao-montadoras.pdf>. Acesso em 22 Out. 2019.

INMETRO. **Portaria n.º 377, de 29 de setembro de 2011**. Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/legislacao/rtac/pdf/RTAC001739.pdf>. Acesso em 14 Set. 2019.

INMETRO. **Portaria n.º 285, de 19 de junho de 2015**. Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/legislacao/rtac/pdf/RTAC002264.pdf>. Acesso em 14 Set. 2019.

INMETRO. **Portaria n.º 15, de 14 de janeiro de 2016**. Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/legislacao/rtac/pdf/RTAC002358.pdf> Acesso em 14 Set. 2019.

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. **Global Warming of 1.5°C - An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty**. 2018. Disponível em: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/05/SR15_SPM_version_report_LR.pdf. Acesso em 08 set. 2019

JANSEN, C., ANTCHAK, J. **New Technology to Improve the Performance of Front End Accessory Drive System**. SAE Technical Paper n° 2004-01-3017. 2004.

JANSEN, C., ANTCHAK, J. **Patente N° US2004011818**, Litens Automotive. **Spring Travel Limiter For Overrunning Alternator Decoupler**. 2004.

JANSEN, C., ANTCHAK, J. **Patente N° US20090176608**, Litens Automotive. **Overrunning Alternator Decoupler Pulley with Bare Wire Spring and Grease Lubrication**. 2009.

JÚNIOR, O. S., SOUZA, M. T. S. **Regulation as inductor of environmental technologies for the reduction of toxic emissions from light vehicles in Brazil**. Cad. EBAPE.BR, Rio de Janeiro , v. 16, n. 4, p. 748-760. 2018

KATIRTZIDIS, A. **Start/Stop engines come of age**. Ingenia article, issue N° 47. 2011

KRAIL, M., SHADE, W. **Technologies and Incentives to Reduce CO₂ Emission from Passenger Cars**. Berlin Seminar in Energy and Climate (BSEC). Berlin. 2010

KOHL, W., SCHLEUPEN, R., KOSS, T., JAKOBI, L., NASSWETTER, G., SUELZLE, H. **Patente N° DE 19638872**, Bosch GmbH Robert. **Vorrichtung und Verfahren zur Datenübertragung** 1998.

KURTNEY, P. **Indústria automotiva toma o rumo da Rota 2030**. Automotive Business. Abril 2019. Disponível em <<http://www.automotivebusiness.com.br/noticia/29055/industria-automotiva-toma-o-rumo-da-rota-2030>>. Acesso em 08 Nov. 2019

KUYPER, J., SCHROEDER, H., LINNER, B. **The Evolution Of The UNFCCC**. Annual Review Of Environment And Resources, vol 43, no. 1. 2018.

LAKSHMINARASIMHAN, V., ATHANI, G. **An Intelligent Alternator Control Mechanism for Energy Recuperation and Fuel Efficiency Improvement**. SAE Technical Paper N° 2013-01-1750. 2013

LOPES, R. S. **Estudo das tecnologias de eficiência energética para redução de consumo de combustível automotivo com ênfase nas interações entre tecnologias com aplicação de metodologia DoE**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, Minas Gerais.

LOURENÇO, F. **Estudo de Confiabilidade de baterias de chumbo-ácido e o impacto do tempo de pátio na sua confiabilidade**. 2010. Trabalho de Conclusão de Curso – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

MALZONI, M. **Perspectivas para a demanda brasileira por combustíveis em 2021**. 2021. Disponível em: <https://www.mercadosagricolas.com.br/acucar-e-etanol/perspectivas-para-a-demanda-brasileira-por-combustiveis-em-2021/>. Acesso em 02 Mar. 2021.

MANAVELLA, H. J. **Análise de Emissões no Escape**. 2006

MARTINS, A. **Análise da eficiência energética dos sistemas Stop-Start e gerador solar fotovoltaico em um veículo leve**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. Belo Horizonte, Minas Gerais.

MDIC – Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior. **Debate Automóvel e Consumo; Eficiência energética veicular: políticas governamentais, seus avanços e perspectivas; As metas de eficiência energética no regime automotivo**. 2014. Disponível em: <https://pt.slideshare.net/IDECDefesaDoConsumidor/debate-automvel-e-consumo-paulo-bedran>. Acesso em 04 Set. 2019.

MELO, T. C. C. **Incerteza de medição em ensaios de emissões veiculares – Proposta de metodologia de cálculo**. 2013. Paper apresentado a SAE. São Paulo. Brasil.

MIALHE, L.G. **Máquinas motoras na agricultura**. São Paulo: EPU/EDUSP. 1980.

MILHOR, Carlos Eduardo. **Sistema de desenvolvimento para controle eletrônico dos motores de combustão interna ciclo Otto**. 2002. 127f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos.

MMA – Ministério do Meio Ambiente, Governo do Brasil. **Protocolo de Kyoto**. 2016. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/clima/convencao-das-nacoes-unidas/protocolo-de-kioto>>. Acesso em 21 Ago. 2019.

MMA – Ministério do Meio Ambiente, Governo do Brasil. **Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC)**. 2017. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/clima/convencao-das-nacoes-unidas>>. Acesso em 14 Ago. 2019.

MMA – Ministério do Meio Ambiente, Governo do Brasil. **PROCONVE: PROGRAMA DE CONTROLE DE POLUIÇÃO DO AR POR VEÍCULOS AUTOMOTORES**. 2019. Disponível em: <https://www.mma.gov.br/estruturas/163/_arquivos/proconve_163.pdf>. Acesso em 10 Out. 2019.

MONTALTO, I., TAVELLA, D., CASAVOLA, A., DE CRISTOFARO, F. **Intelligent Alternator Employment To Reduce CO₂ Emission and to Improve Engine Performance**. SAE Technical Paper N° 2011-01-2444. 2012.

MURAMATSU, J., KOJIMA, T., TANAKA, H., HATTORI, Y., OKADA, H., KEINO, H., NAKANISHI, T. AND FUJISAKI, K. **Non-Linear Numerical Expression Of Surge Voltage For Electromagnetic Clutch**. IEEE Transactions On Magnetics, vol 51, no. 3, pp. 1-4. Institute Of Electrical And Electronics Engineers (IEEE). 2015.

OGURA. **Eletromagnetic Clutch**. 2016. Disponível em: http://ogura-clutch.com/electromagnetic_clutch.php. Acesso em 12 Nov. 2019.

OLIVEIRA, Jr., A. A. M. **Apostila de Capacitação em Engenharia Automotiva**. FIAT & UFSC, Departamento de Engenharia Mecânica, UFSC – Florianópolis-SC, Versão: 28/05/2007.

ONU – Organizações das Nações Unidas. **Conferência das Nações Unidas sobre Mudança Climática**. 2015. Disponível em: <<https://nacoesunidas.org/cop21/>>. Acesso em 04 Set. 2019.

OSHIMA, K. **Patente N° US 7816893**, Denso Corporation. **Control apparatus for automotive alternator with function of initialization state detection**. 2010.

PEREIRA, M. L. **Análise de Gases: Apostila técnica. Centro de Desenvolvimento de Tecnologia Mecânica – CDTM.** Treinamento Técnico Automotivo. 2001.

PORTAL SÃO FRANCISCO. **Sistema Elétrico.** 2016. Disponível em: <http://www.portalsaofrancisco.com.br/mecanica/sistema-eletrico>. Acesso em 17 Set. 2019.

PUJATTI, F. J. P. **Desenvolvimento de um Sistema de Gerenciamento Eletrônico para Motores de Ignição por Centelha.** 2007. 221f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

RIPOLI, R., PASQUINI, J., LIEBISCH, J., FERREIRA, F., SCHELP, M. X. **Fuel saving intelligence – Low fuel consumption components and their benefits running together in an integrated system.** SAE Technical Paper N° 2010-36-0362. 2010.

SALES, L. C. M. **Otimização do sistema de partida a frio de veículos a álcool para redução das emissões na exaustão.** 2001. 86f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte.

SALES, L. C. M. **Sistema de partida a frio para motores flex fuel com aquecimento do ar de admissão e do etanol injetado.** 2010. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte.

SALES, L. C. M. **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, L. C. M. **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, L. C. M. **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.

SHAPIRO, H. N., MORAN, M. J. **Princípios de termodinâmica para Engenharia.** 6ª ed. Ed. LTC. 2002.

SHIN, J., KIM, H., BAEK, S., SUNWOO, M. HAN, M. **Rule-Based Alternator Control Using Predicted Velocity for Energy Management Strategy.** ASME. J. Dyn. Sys., Meas., Control. 2019.

SILVA, C., ROSS, M., FARIAS, T. **Analysis and simulation of “low-cost” strategies to reduce fuel consumption and emissions in conventional gasoline light-duty vehicles.** Energy Conversion And Management, vol 50, no. 2. 2009.

SINDIREPA. **Veículos com sistema start-stop usam baterias com tecnologia AGM.**2013. Disponível em: <http://www.portaldareparacao.com.br/wp-content/uploads/2015/08/Abril-2013.pdf>. Acesso em 24 Out. 2019.

SODRÉ, J. R., COSTA, R. C. **Hydrous ethanol vs. gasoline-ethanol blend: Engine performance and emissions.** *FUEL Paper*. n. 89: (2010) 287-293, 2010.

SOHN, J., HONG, S., SUNWOO, M. **Alternator Torque Model Based On Equivalent Circuit Of Synchronous Generator For Electric Power Management.** *IEEE Transactions On Vehicular Technology*, vol 62, no. 8, pp. 3593-3602. Institute Of Electrical And Electronics Engineers (IEEE). 2013.

STOREY, J. M., MOSES-DEBUSK, M., HUFF, S., THOMAS, J., EIBL, M., LI, F. **Characterization of GDI PM during Vehicle Start-Stop Operation.** *SAE Technical Paper N° 2019-01-0050*. 2019.

TATUR, M., TOMAZIC, D., GOVINDSWAMY, K., TRAMPERT, S. **Reduction of Parasitic Losses in Front-End Accessory Drive Systems: Part 2.** *SAE Technical Paper N° 2018-01-0326*. 2018.

TILMANN, C. A. C. **Motores de Combustão Interna e seus Sistemas.** Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia, Santa Maria, Rio Grande do Sul. 2013.

TORMOS, B., MARTÍN, J., CARREÑO, R., RAMÍREZ, L. **A General Model To Evaluate Mechanical Losses And Auxiliary Energy Consumption In Reciprocating Internal Combustion Engines;** Elsevier. *Tribology International*, vol 123. 2018.

WALDMAN, C., GURUSUBRAMANIAN, S., FIORENTINI, L., CANOVVA, M. **A model-based supervisory energy management strategy for a 12 V vehicle electrical system.** *Control Engineering Practice*, vol 44, pp. 20-30, Elsevier BV. 2015.

WANG, X., MCGEE, R., KUANG, M. **Vehicle System Control for Start-Stop Powertrains with Automatic Transmissions.** *SAE Technical Paper N° 2013-01-0347*. 2013.

YANG, Z., MOCK, P., GERMAN, J., BANDIVADEKAR, A., LAH, O. **On a pathway to de-carbonization – A comparison of new passenger car CO2 emission standards and taxation measures in the G20 countries.** *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 2018.

YOUNG, H. D., FREEDMAN, R. A. **FISICA IV - ÓTICA E FÍSICA MODERNA**, 12a ed. São Paulo, Addison Wesley. 2008.

APÊNDICE A – ANÁLISE DE INCERTEZAS DAS MEDIÇÕES

Figliola e Beasley (2011) expõe em seu trabalho que para conjunto finito de medições de certa variável, pode-se representar um valor único com melhor caracterização da média do conjunto de dados que foram coletados. Assim, para determinado sinal discreto ou digital, se pode estimar a média aritmética pela Equação 1.1:

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n x_i \quad \therefore \quad \bar{x} = \frac{x_1+x_2+x_3+\dots+x_n}{N} \quad (1.1)$$

Sendo,

N: Número total de amostras

x_i : cada número discreto do conjunto de dados

Tem-se que a dispersão de dados em relação a média é denominada de variância (σ^2) e o desvio padrão (σ) é a raiz quadrada da variância, conforme visto na Equação 1.2.

$$\sigma^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad \sigma = \sqrt{\sigma^2} \quad (1.2)$$

Expandindo os conceitos, a incerteza da medição é um parâmetro relacionado ao resultado de uma medição, caracteristicamente com a dispersão dos valores atribuídos a um mensurando. Está distribuída da seguinte forma (MELO,2013):

- (a) Incerteza do tipo A: Incerteza atribuída à repetitividade dos resultados de medições sucessivas nas mesmas condições. Para este trabalho, conforme já exposto no Tópico de Metodologia, os testes experimentais foram realizados com o mesmo veículo, mesmo condutor, mesmos equipamentos de medição e coleta de dados. A incerteza do tipo A, comumente chamada de incerteza padrão ou repetitividade padrão, é calculada a partir da Equação 1.3.

$$u = \frac{\sigma}{\sqrt{N}} \quad (1.3)$$

Sendo N: número de amostras para determinada configuração de teste.

- (b) Incerteza do tipo B: Incerteza relacionada a fatores como certificado de calibração dos instrumentos de medição, materiais de referência, resolução de equipamentos, dentre outros. Para este trabalho, todos os testes foram realizados em Laboratório de Emissões certificado pelo INMETRO, com equipamentos calibrados regularmente para atender a critérios homologativos.
- (c) Incerteza Combinada (u_c): Representado por valor de incerteza por desvio padrão estimado obtido pela raiz quadrada da variância total para determinada variável. Para grandezas de entrada não correlacionadas, obtém-se a incerteza combinada pela combinação das incertezas padrão das estimativas de entrada.
- (d) Incerteza Expandida (U_y): Também conhecida como “Repetitividade expandida”, representa o valor final de incerteza para determinada variável, de acordo com um intervalo de confiança o qual há a maior probabilidade de se encontrar valores que poderão ser atribuídos ao valor verdadeiro. Diante disso, conforme Equação 1.4, a incerteza expandida é resultante da multiplicação da incerteza combinada (ou, no caso deste trabalho, repetitividade padrão) pelo fator de abrangência (K) que é escolhido pelo nível de confiança requerido para tal intervalo. O valor de “K” geralmente é escolhido entre 2 e 3 pela distribuição normal ou *t-Student*

$$U_y = u \cdot K \quad (1.4)$$

- **Estimativa de incerteza de medição para consumo energético combinado**

Dessa forma, demonstram-se a seguir os passos para estimativa de incerteza de medição para o consumo energético combinado após cálculo ponderado de

autonomia combinada em MJ/km para ciclo urbano e ciclo estrada para cada configuração de teste.

- 1) *Média aritmética*: Aplicando-se a Equação I.1 tem-se a média aritmética do consumo energético combinado pelo número de amostras de ensaios para cada configuração;

$$\overline{C_x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n C_{x_i} \quad \therefore \quad \overline{C_x} = \frac{C_{x_1} + C_{x_2} + C_{x_3} + \dots + C_{x_n}}{N}$$

Sendo,

C_{x_i} : Consumo energético combinado para ensaio “i” de configuração “x” de testes [MJ/km]

N: Número de amostras coletadas nos ensaios por configuração de teste

- 2) *Variância e Desvio padrão*: Aplicando-se a Equação I.2, calcula-se a variância e em seguida o desvio padrão considerando os dados de consumo energético combinado obtidos em cada ensaio experimental por configuração de teste:

$$\sigma_x^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (C_{x_i} - \overline{C_x})^2 \quad \sigma_x = \sqrt{\sigma_x^2}$$

Sendo,

C_{x_i} : Consumo energético combinado para ensaio “i” de configuração “x” de testes [MJ/km];

$\overline{C_x}$: Média aritmética para o consumo energético combinado da configuração “x” de teste;

N: número de amostras coletadas nos ensaios por configuração de teste;

σ_x^2 : Variância para configuração “x” de teste;

σ_x : Desvio padrão para configuração “x” de teste;

- 3) *Repetitividade padrão*: Aplicando-se a Equação I.3, calcula-se a incerteza padrão relacionada ao consumo energético para cada

configuração de teste experimentada. Conforme instrutivo do Laboratório de Emissões em que os testes foram realizados, no mínimo três ensaios foram realizados para cada configuração de teste, com o objetivo de se obter repetitividade de no máximo 0,005 para consumo energético (MJ/km) entre os testes, sendo esse um parâmetro fundamental para validação das incertezas dos resultados de consumo energético:

$$u_x = \frac{\sigma_x}{\sqrt{N}}$$

Sendo,

u_x : Repetitividade padrão para configuração “x” de testes;

σ_x : Desvio padrão para configuração “x” de teste;

N: número de ensaios total para configuração “x” de testes

- 4) *Incerteza Expandida (U_y)*: A partir da Equação 1.4, calcula-se a “repetitividade expandida”. Neste trabalho, foram considerados infinitos graus de liberdade e nível de confiança de 95%. Logo, o fator de abrangência K da distribuição t-Student foi adotado como igual a 2:

$$U_{y_x} = u_x \cdot K = u_x \cdot 2$$

Sendo,

U_{y_x} : Incerteza expandida para configuração “x” de testes

u_x : Repetitividade padrão para configuração “x” de testes;

K: Fator de t-Student igual a 2.

- 5) *Erro porcentual (E)*: O porcentual de erro para o consumo energético para cada configuração é calculado pela relação entre a incerteza expandida e a média aritmética de consumo por configuração, conforme a seguir:

$$E_x [\%] = \frac{U_{y_x}}{\bar{c}_x} \cdot 100$$

Sendo,

U_{y_x} : Incerteza expandida para configuração “x” de testes

\bar{C}_x : Média aritmética para o consumo energético combinado da configuração “x” de testes

Com isso, a Tabela 19 dispõe os resultados de consumo energético (em MJ/km) para cada ensaio realizado para as configurações de teste, além dos parâmetros calculados para a análise de incertezas para essa grandeza, também explicitando resultados por configurações de teste experimentados neste estudo.

Tabela 19 – Resultados de consumo energético combinado [MJ/km] por configuração de teste e respectivos parâmetros de análise de incertezas

Resultados de Consumo Energético Combinado [MJ/km] por Ensaio das Configurações de Teste	Baseline	Somente Alternador inteligente	Somente S&S	Alternador Inteligente + S&S Ligado	Somente ADE	ADE + S-S Ligado
Ensaio 1	1,767	1,726	1,734	1,716	1,713	1,686
Ensaio 2	1,773	1,736	1,728	1,710	1,712	1,691
Ensaio 3	1,770	1,735	1,728	1,716	1,705	1,687
Ensaio 4	1,774			1,707		
Parâmetros para análise de Incertezas por Configurações de Teste	Baseline	Somente Alternador inteligente	Somente S&S	Alternador Inteligente + S&S Ligado	Somente ADE	ADE + S-S Ligado
Média Aritmética [MJ/km]	1,771	1,732	1,730	1,712	1,710	1,688
Desvio Padrão [MJ/km]	0,003	0,006	0,004	0,005	0,004	0,002
Repetitividade Padrão [MJ/km]	0,002	0,003	0,002	0,002	0,002	0,001
Repetitividade Expandida K=2 [MJ/km]	0,003	0,007	0,004	0,005	0,005	0,003
Erro [%]	0,17%	0,38%	0,23%	0,26%	0,27%	0,14%

Fonte: Dados da pesquisa, 2020

ANEXO A – PROCESSO DE PATENTE INPI N° BR102015001454-6



República Federativa do Brasil
Ministério da Indústria, Comércio Exterior
e Serviços
Instituto Nacional da Propriedade Industrial

(21) BR 102015001454-6 A2

(22) Data do Depósito: 22/01/2015

(43) Data da Publicação: 02/08/2016



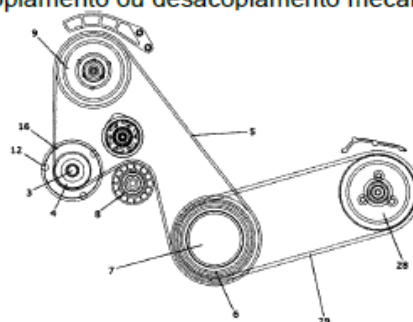
(54) Título: SISTEMA E MÉTODO PARA O ACOPLAMENTO E/OU O DESACOPLAMENTO ELETROMECAÂNICO SELETIVOS DE ALTERNADOR AUTOMOTIVO

(51) Int. Cl.: F16D 3/00

(73) Titular(es): FIAT AUTOMÓVEIS LTDA

(72) Inventor(es): LUÍS CARLOS MONTEIRO SALES

(57) 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.



Petições ?

Pgo	Protocolo	Data	Imagens	Serviço	Cliente	Delivery	Data
✓	800160136122	18/05/2016	- - -	203	FCA FIAT CHRYSLER AUTOMOVEIS BRASIL LTDA		-
✓	87016000087	05/01/2016	- - -	206	FCA FIAT CHRYSLER AUTOMOVEIS BRASIL LTDA		-
✓	018150007160	22/06/2015	- - -	253	FCA FIAT CHRYSLER AUTOMOVEIS BRASIL LTDA		-
✓	018150005844	15/05/2015	- - -	248	FCA FIAT CHRYSLER AUTOMOVEIS BRASIL LTDA		-
✓	018150000883	22/01/2015	- - -	200	FCA FIAT CHRYSLER AUTOMOVEIS BRASIL LTDA		-

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

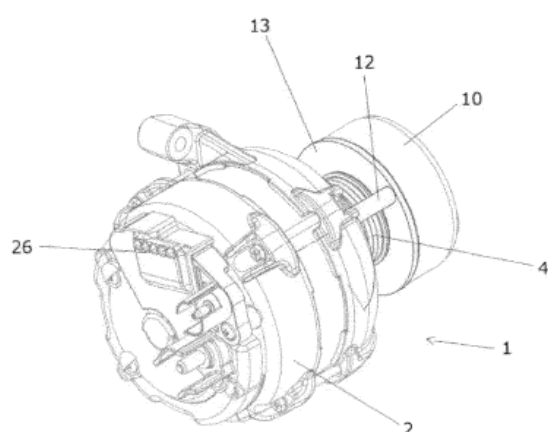
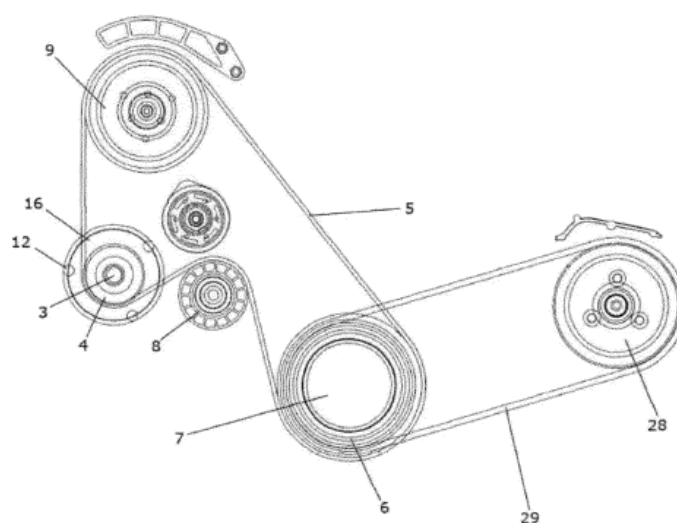


Fig 02

Fig 03

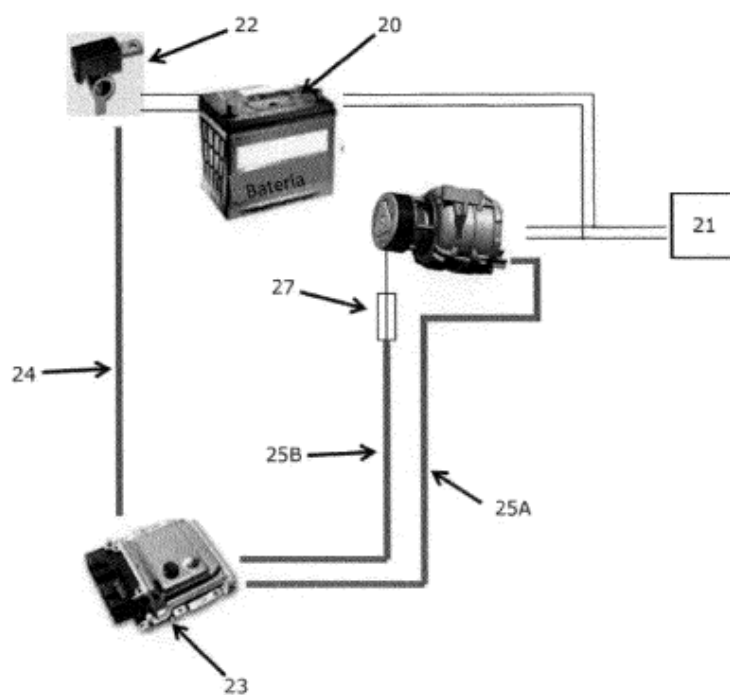
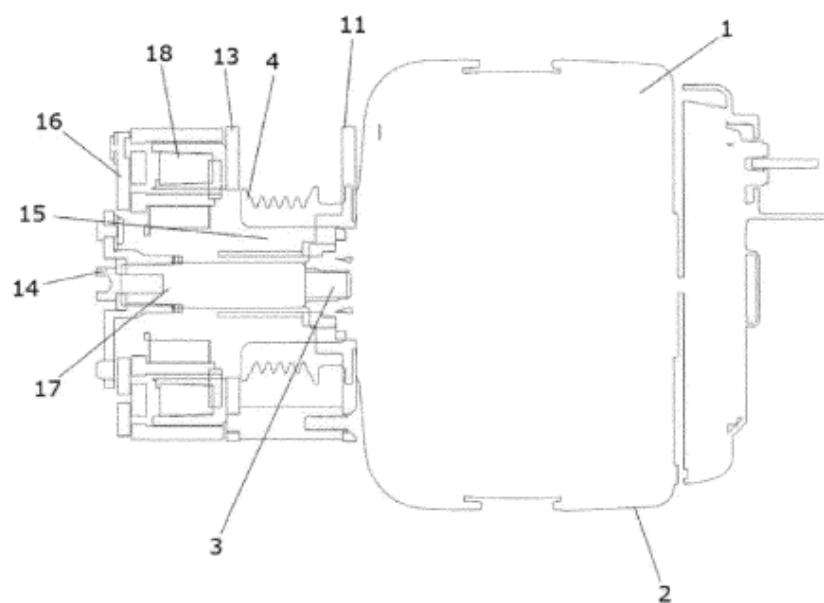


Fig 04

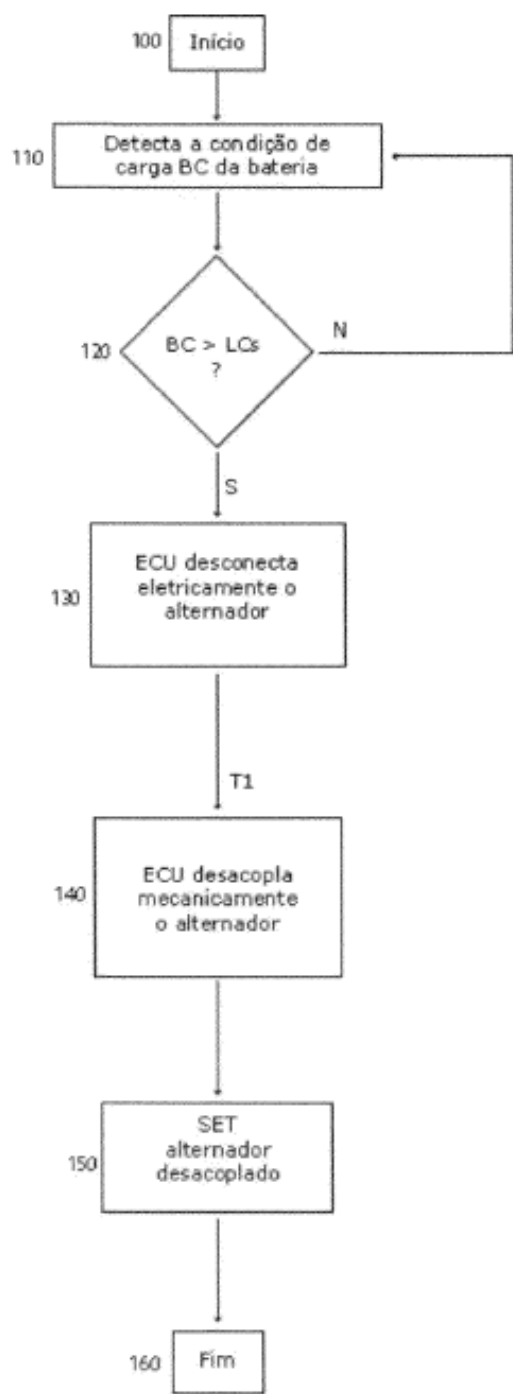


Fig 5A

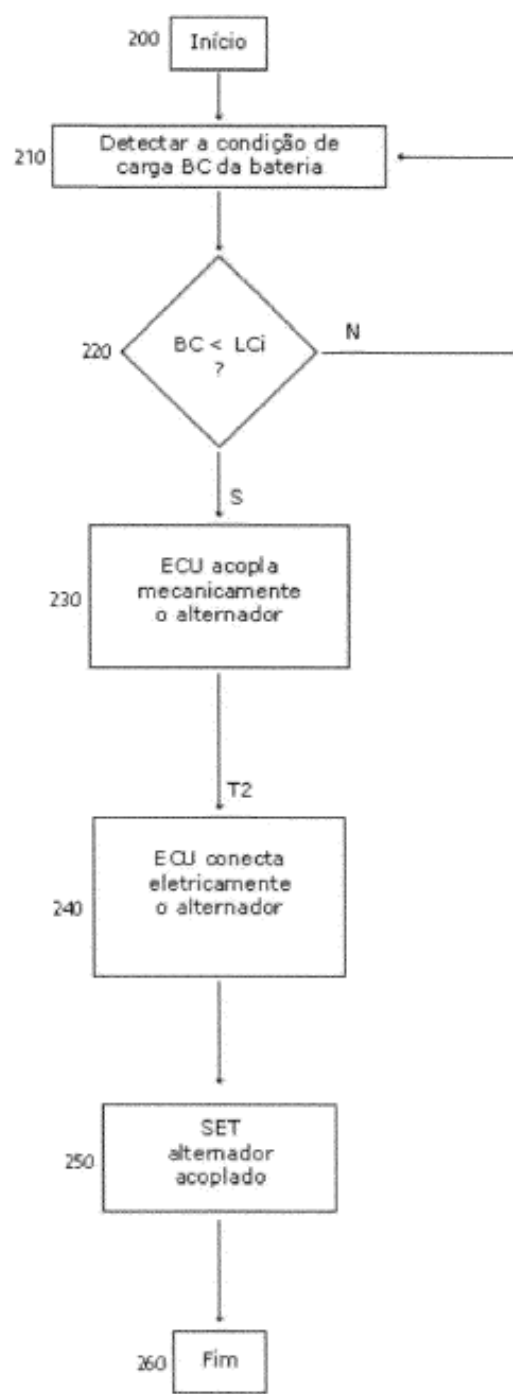


Fig 5B