



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

ESTUDO DAS TECNOLOGIAS DE EFICIÊNCIA
ENERGÉTICA PARA REDUÇÃO DE CONSUMO DE
COMBUSTÍVEL AUTOMOTIVO COM ÊNFASE NAS
INTERAÇÕES ENTRE TECNOLOGIAS COM APLICAÇÃO
DA METODOLOGIA DOE

ROSIANA DA SILVA LOPES

Belo Horizonte, 27 de Julho de 2018

ROSIANA DA SILVA LOPES

**ESTUDO DAS TECNOLOGIAS DE EFICIÊNCIA
ENERGÉTICA PARA REDUÇÃO DE CONSUMO DE
COMBUSTÍVEL AUTOMOTIVO COM ÊNFASE NAS
INTERAÇÕES ENTRE TECNOLOGIAS COM APLICAÇÃO
DA METODOLOGIA DOE**

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: Projetos e Sistemas

Orientador: Prof. Fabrício José Pacheco Pujatti

Universidade Federal de Minas Gerais

Belo Horizonte

Escola de Engenharia da UFMG

2018

L864e

Lopes, Rosiana da Silva.

Estudo das tecnologias de eficiência energética para redução de consumo de combustível automotivo com ênfase nas interações entre tecnologias com aplicação da metodologia DoE [manuscrito] / Rosiana da Silva Lopes. – 2018. 108 f., enc.: il.

Orientador: Fabrício José Pacheco Puajtti.

Dissertação (mestrado) Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Anexo : f. 108 - 120.

Bibliografia: f.101 - 107.

1. Engenharia mecânica - Teses. 2. Veículos a motor - Teses. 3. Consumo de combustível - Teses. 4. Consumo de energia - Teses. 5. Tecnologia mecânica - Teses. 6. Planejamento experimental - Teses. I. Puajtti, Fabrício José Pacheco. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 621(043)



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

Av. Antônio Carlos, 6627 - Campus Universitário
31270-901 - Belo Horizonte - MG
Tel.: +55 31 3409.5145
E-mail: cpgmec@demec.ufmg.br

**"ESTUDO DAS TECNOLOGIAS DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA
PARA REDUÇÃO DE CONSUMO DE COMBUSTÍVEL AUTOMOTIVO
COM ÊNFASE NAS INTERAÇÕES ENTRE TECNOLOGIAS COM
APLICAÇÃO DA METODOLOGIA DOE"**

ROSIANA DA SILVA LOPES

Dissertação submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de **"Mestre em Engenharia Mecânica"**, na área de concentração de **"Projeto e Sistemas"**.

Dissertação aprovada no dia 27 de julho de 2018.

Por:

Prof. Fabrício José Pacheco Pujatti
Orientador - Departamento de Engenharia Mecânica/UFMG

Prof. Leonardo Vinicius Mendes Pereira
Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais/PUC-Minas

Prof. Jose Guilherme Coelho Baeta
Departamento de Engenharia Mecânica/UFMG

À minha querida avó Antonia Lopes da Silva (In memoriam)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço à Deus por permitir trilhar esta jornada, me concedendo saúde física e mental para superar cada dificuldade, especialmente a distância da família.

À minha família pelo apoio incondicional em todos os momentos, minha querida mãe e pai Francisca e Agenor, aos meus queridos irmãos Francisco e Silvana. Apesar da distância estiveram sempre presentes na minha vida, com total apoio e companheirismo.

Ao Prof. Danilo Azevedo da UFPI orientador na graduação, pela motivação e apoio durante a graduação e no mestrado também.

À Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) por propiciar a oportunidade de realizar o mestrado em Engenharia Mecânica e fornecer os meios necessários para conclusão desta jornada.

À Fiat Chrysler Automobiles (FCA) por fomentar o tema da pesquisa deste trabalho, financiar a bolsa de mestrado, além de fornecer suporte material e profissional, sem o qual esse trabalho não teria sido viável.

Ao Programa INOVAR FCA – Universidades - Residência Tecnológica, ao qual faz parte o trabalho desenvolvido, em especial ao Prof. Alexandre Bracarense coordenador do Programa na UFMG e ao Gilmar Laignier coordenador do Programa na FCA, também ao Luíz Brant e Gustavo Bicalho, que auxiliaram nas questões internas dentro da FCA.

Aos colaboradores e amigos da FCA, em especial ao Sergio Bicalho, que foi de extrema importância para desenvolvimento deste trabalho, com suas inúmeras sugestões, correções e críticas e aos demais colegas Alex Amorim, Marcela Vianna, Marcelo Clemente, Heyder Cardoso, Lucymara Alvarenga, Diego Antunes, aos meus supervisores Paulo Araújo e Bruno Martins por todo suporte fornecido durante o trabalho. Ao meu gerente Sandro Soares que sempre nos apoiou e mesmo com todas as suas ocupações conseguiu tempo para nos auxiliar quando precisamos. E a todos do time FCA que diretamente ou indiretamente colaboraram com o trabalho realizado.

Ao SENAI FIEMG, Campus CETEC, onde foram realizados os ensaios experimentais, em especial a Iolanda Dias, por sua inestimável paciência, atenção e pela disponibilidade em

fornecer informações dos testes e sanar dúvidas ao longo de 1 ano de testes tornando-se uma amiga, ao Leandro que executou os testes e a todos os demais colaboradores do Laboratório;

Aos meus amigos e companheiros de Mestrado pela parceria ao longo desta jornada, especialmente ao Filipe Cota, que foi um grande companheiro nas disciplinas e nas correções de texto que gentilmente fez, se tornando um grande amigo, à Fernanda Saad por sua incrível parceria e amizade, ao Arthur Braga companheiro de projeto, ao amigo desde a graduação Ihago Backes, à Thaylane Marques e todos que de alguma forma contribuíram com o Mestrado.

Ao colegiado, professores e funcionários do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – PPGMEC - da UFMG por sua colaboração com a minha formação.

Ao meu orientador Prof. Fabrício Pujatti, por sua grande contribuição, com suas críticas e sugestões durante o mestrado e na elaboração da dissertação.

E a todos os amigos que de alguma forma contribuíram com a conclusão do mestrado,

Meus sinceros agradecimentos

“A percepção do desconhecido é a mais fascinante das experiências. O homem que não tem os olhos abertos para o misterioso passará pela vida sem ver nada.”

(Albert Einstein)

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo de tecnologias de eficiência energética aplicadas em veículos automotores considerando as interações entre tecnologias. O consumo de combustível dos veículos automotores é um fator importante no cenário atual, pois do ponto de vista ambiental o consumo de combustíveis fósseis por parte dos veículos convencionais (gasolina e óleo diesel) provoca aumento da poluição urbana e agravamento do efeito estufa, além de contribuir com a escassez das reservas de petróleo. Com o objetivo de melhorar a eficiência energética dos veículos o setor automotivo tem investido em desenvolvimento de tecnologias que auxiliem a redução de consumo veicular, razão pela qual podem ser chamadas de tecnologias de eficiência energética, como o sistema de partida e parada automático (Start stop), pneus de baixa resistência ao rolamento, apêndices aerodinâmicos, entre outros. Contudo, quando várias tecnologias de eficiência energética são aplicadas simultaneamente, observa-se que o efeito combinado nem sempre é igual ao esperado considerando cada tecnologia individualmente. Este trabalho tem o objetivo de avaliar as interações entre tecnologias de eficiência energética aplicadas em um veículo de passeio de forma a mostrar como as interações podem afetar o efeito das tecnologias no produto final. A metodologia abordada utiliza ferramenta da estatística experimental DoE (Design of Experiments) para determinar o efeito de cada tecnologia e as interações existentes entre elas. Os resultados apontam que as maiores interações tendem a reduzir o efeito das tecnologias. As maiores interações foram observadas em tecnologias aplicadas no trem de forças do veículo, principalmente motor, transmissão e alternador, enquanto as tecnologias que reduzem as forças de resistência ao deslocamento (aerodinâmica, inércia, óleo de câmbio e pneu) não apresentam interação significativa. Também foi observado que não incluir as interações na previsão de consumo de combustível com aplicação das tecnologias de eficiência energética apresenta erros elevados, no caso de estudo deste trabalho em torno de 2,5% quando as interações são significativas. Por fim conclui-se que as interações não devem ser ignoradas no projeto automotivo, a menos que se tenha conhecimento prévio de que o nível de interação não é relevante.

Palavras chaves: Veículos automotores; Consumo de combustível; Consumo energético; Tecnologias de Eficiência Energética; Efeitos Principais; Interações.

ABSTRACT

This work presents a study of energy efficiency technologies applied in automotive vehicles considering the interactions between technologies. The fuel consumption of automotive vehicles is an important factor in current scenario, because in environment point of view the fossil fuels of conventional vehicles (gasoline and diesel oil) increase urban pollution worsening the greenhouse effect, in addition to contributing to the scarcity of oil reserves. With the aim to improve energy efficiency of vehicles, the automotive sector has invested on developing technologies that help decrease vehicle's fuel consumption such the start stop system, low rolling resistance tire, between others called energy efficient technologies. However, when several energy efficiency technologies are applied simultaneously, the combined effect is smaller than expected when compared to each technology individually. This paper aims to evaluate the interactions between energy efficiency technologies applied in a vehicle in order to show how the interactions can reduce the technologies effect in the final product. The used methodology applies the experimental statistics tool DOE (Design of Experiments) to estimate the effect of each technology and the interactions between them. The results indicate that interactions are observed in technologies applied in powertrain and electric load system, while the technologies that reduce movement resistance forces (tire, aerodynamics and inertia) do not presented significant interactions. It was also observed that not including the interactions in the prediction of fuel consumption with application of energy efficiency technologies presents high errors, in the case of study of this work around 2.5% when the interactions are significant. It conclusion, the interactions of improvements on powertrain system need to be considered, using statistical tools while, improvements on movement resistance forces can be analyzed individually because the interactions related to these items can be despised.

Key words: Automotive vehicles; Fuel Consumption; Energy Efficiency Technologies; Main effects; Interactions.

SUMÁRIO

RESUMO.....	9
ABSTRACT	10
LISTA DE FIGURAS.....	13
LISTA DE TABELAS.....	15
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	16
LISTA DE SÍMBOLOS	18
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	21
1.1 Objetivos	22
2 CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	24
2.1 Políticas de incentivo à eficiência energética do setor automotivo Brasileiro.....	24
2.1.1 CONPET	24
2.1.2 PBEV	25
2.1.3 INOVAR-AUTO	25
2.1.4 Rota 2030	25
2.2 Veículos automotores.....	26
2.2.1 Forças de resistência ao deslocamento do veículo	27
2.2.2 Medição das forças resistivas do veículo	30
2.2.3 Trem de forças	32
2.3 Consumo de combustível e eficiência energética	37
2.3.1 Consumo de combustível e procedimento de medição	37
2.3.2 Eficiência energética	40
2.4 Tecnologias de Eficiência energéticas	42
2.4.1 Tecnologias de eficiência energética automotivas	42
2.4.2 Tecnologias que atuam nas forças de resistência ao deslocamento	43
2.4.3 Tecnologias que atuam no trem de forças	48
2.5 Estado da Arte	57
CAPÍTULO 3 – METODOLOGIA.....	60
3.1 Ferramentas estatísticas de análise de interações entre fatores	61
3.1.1 Planejamento de experimentos	61
3.1.2 Experimento fatorial completo	62
3.1.3 Efeito principal	64
3.1.4 Efeito das Interações	67
3.2 Delimitação do escopo de análise	70

3.2.1 Fatores e níveis	70
3.2.2 Planejamento experimental (DoE)	71
3.3 Simulação computacional	72
3.4 Metodologia de análise de efeitos – “combinada”	72
3.4.1 Estratificação da redução de consumo	73
3.4.2 Análise das interações	74
3.5 Comparações entre metodologias	75
3.6 Validação experimental.....	76
3.6.1 Ensaio de consumo de combustível.....	77
3.6.2 Análise de incertezas	79
CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO	83
4.1 Estratificação da redução de consumo	83
4.2 Análise das interações	88
4.3 Comparação entre metodologias	93
4.4 Interações nos Efeitos principais.....	95
4.5 Validação experimental.....	96
CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES	98
SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	100
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	101
ANEXO I - MÉTODO PARA DETERMINAÇÃO DA INCERTEZA.....	108

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Forças atuando em um veículo em aceleração	27
Figura 2: Forças resistivas ao deslocamento de um veículo automotor	31
Figura 3: Distribuição da força resistiva entre as suas componentes – resultado do <i>Coast down</i> fracionado	31
Figura 4: Sistema de forças (<i>powertrain</i>) de um veículo com tração traseira.....	32
Figura 5: Curvas características de motor de combustão interna	34
Figura 6: Curvas de tração disponíveis pelo motor de combustão interna.....	34
Figura 7: Curvas de tração do motor com escalonamento de marchas	35
Figura 8: Fluxo de carga elétrica em um veículo automotor	36
Figura 9: Alternador automotivo	37
Figura 10: Componentes do alternador automotivo	37
Figura 11: Ciclo de condução de ensaio de consumo no Brasil	39
Figura 12: Fluxograma de energia típico de um veículo automotor.....	41
Figura 13: (a) Aerofólio dianteiro (spoiler); (b) Convergedor de ar do radiador	44
Figura 14: Revestimentos aerodinâmicos (asfalto)	44
Figura 15: Câmeras substituindo espelhos retrovisores externos em veículos automotores	45
Figura 16: Mapa de consumo específico do motor com as relações de marcha.....	49
Figura 17: Relação de marcha $\times$ consumo de combustível	49
Figura 18: Formato do pulso (onda quadrada) típica do PWM.....	54
Figura 19: Sistema de alimentação de combustível.....	55
Figura 20: Eletro-ventilador automotivo: (a) hélices retas; (b) hélice otimizada.....	56
Figura 21: Fluxograma da metodologia.....	60
Figura 22: Fluxo entre entrada e saída de um sistema.....	61
Figura 23: Fluxo entre entrada e saída de um sistema com 1 fator e 2 níveis.....	62
Figura 24: Efeito da resposta com interação	65

Figura 25: Efeitos principais.....	69
Figura 26: Efeitos das interações de 2ª ordem.....	69
Figura 27: Efeitos da interação de 3ª ordem.....	69
Figura 28: Fluxo dos procedimentos de ensaio de consumo de combustível veicular.....	78
Figura 29: Estratificação da redução de consumo energético	86
Figura 30: Estratificação da redução de consumo energético - Escala ampliada.....	86
Figura 31: Estratificação da redução de consumo - Efeitos principais e interações.....	87
Figura 32: Efeitos principais.....	88
Figura 33: Interações de 2ª ordem mais significativas	88
Figura 34: Interação positiva significativa (2ª ordem)	89
Figura 35: Interação negativa significativa (2ª ordem)	89
Figura 36: Escala adotada para classificar as interações significativas.....	90
Figura 37: Distribuição das tecnologias em interações Positivas, desprezíveis e positivas – 2ª ordem.....	92
Figura 38: Distribuição das tecnologias em interações negativas, desprezíveis e positivas - 3ª ordem.....	92
Figura 39: Comparação das metodologias – Grupo 1: Interação significativas – (a) Metodologia Combinada; (b) Metodologia Individualizada.....	94
Figura 40: Comparação das metodologias – Grupo 2: Interação não significativas – (a) Metodologia Combinada; (b) Metodologia Individualizada	94
Figura 41: Efeito das interações nos efeitos principais – interação significativa.....	95
Figura 42: Efeito das interações nos efeitos principais – Sem interação significativa.....	96
Figura 43: validação experimental – Consumo combinado	96

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Créditos de consumo para tecnologias de eficiência energética concedidos pelo MDIC	42
Tabela 2: Matriz de planejamento de um fatorial completo com 2 fatores	63
Tabela 3: Matriz de planejamento - 2k	64
Tabela 4: Matriz de coeficiente de contrastes	67
Tabela 5: Matriz de coeficientes de contrastes - 23	68
Tabela 6: Fatores e níveis dos fatores (tecnologias)	70
Tabela 7: Seções da Matriz de Planejamento	71
Tabela 8: Efeitos calculados	73
Tabela 9: Tratamentos 1 e 1024 da matriz de planejamento – condições de referência	74
Tabela 10: Matriz de planejamento – 3 fatores	75
Tabela 11: Tratamentos que foram testados em laboratório	77
Tabela 12: Consumo energético inicial e final	83
Tabela 13: Efeitos totais – Principais e interações	84
Tabela 14: Matriz de coeficientes de contrastes (3 fatores)	85
Tabela 15: Parte da matriz de coeficientes de contraste – interações de 2ª ordem	85
Tabela 16: Matriz de interações de 2ª ordem – Consumo combinado	91
Tabela 17: Tecnologias agrupadas conforme o grau de interação	93

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AGS	Active Grill Shutter
AT	Transmissão automática
CE	Consumo energético
CIT	Centro de Inovação Tecnológica
CO	Monóxido de carbono
CO ₂	Dióxido de carbono
CONPET	Programa nacional da racionalização do uso dos derivados do Petróleo e do Gás natural
CVT	Transmissão continuamente variável
DoE	Design of Experimente (Planejamento de experimentos)
FTP	Federal Test Procedure
GSI	Gear Shift Indicator - Indicador de troca de marcha
THC	Hidrocarbonetos totais
IBS	Intelligent Battery Sensor
INOVAR-AUTO	Programa de Incentivo à Inovação Tecnológica e Adensamento da Cadeia Produtiva de Veículos Automotores
LIN	Local Interconnect Network
MDIC	Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior
MT	Transmissão manual
MTA	Transmissão automatizada
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
PBEV	Programa Brasileiro de engenharia mecânica
PWM	Pulse Width Modulation
SAE	Society of Automotive Engineers

SOC	Stade of charged
SUV	Veículos utilitários esportivos
TPMS	Tire-pressure monitoring system - Sistema de monitoramento de pressão do pneu

LISTA DE SÍMBOLOS

(F_T)	Força trativa
F_D	Força de resistência ao deslocamento
F_{RR}	Forças de resistência ao rolamento dos pneus
F_{Aero}	Força de resistência aerodinâmica
F_{Active}	Força de resistência à inclinação da via
$F_{Inércia}$	Força de resistência inercial
f_{rr}	Coefficiente de resistência ao rolamento
W	Carga vertical ou força peso
ρ	Massa específica do ar
V	Velocidade do escoamento do ar
A	Área projetada da vista frontal do veículo
C_x	Coefficiente de arrasto aerodinâmico ou coeficiente de penetração aerodinâmica
θ	Ângulo de inclinação da via
m_{eq}	Massa equivalente do veículo
a	Aceleração do veículo
V_i	Velocidade do veículo
F_{CD}	Força resistiva do veículo medida no teste de <i>coast down</i>
F_0	Termo de ordem zero da equação de força resistiva F_{CD}
F_2	Termo de 2ª ordem da equação de força resistiva F_{CD}
C	Consumo de combustível automotivo
C_i	Consumo de combustível em cada fase i do ciclo FTP
C_{urb}	Consumo de combustível urbano
C_{est}	Consumo de combustível em estrada
C_{comb}	Consumo de combustível combinado (55% consumo urbano + 45% consumo estrada)

A_{comb}	Autonomia de combustível combinada
D	Distância percorrida pelo veículo
D_i	Distância percorrida pelo veículo em cada fase i do ciclo FTP
v	Volume de combustível consumido pelo veículo durante teste em laboratório
CE	Consumo energético
δ_e	Densidade energética de um combustível
E_{mot}	Energia mecânica gerada pelo motor
E_{Alt}	Energia absorvida pelo alternador para gerar energia elétrica
η_{Trs}	Eficiência da transmissão
τ	Período de uma pulso ou onda
t_T	Duty cycle
$V_{M\acute{a}x}$	Tensão elétrica máxima
E	Efeito de um fator ou interação
X	Variável de entrada de um sistema
Y_i	Variável de resposta ou saída de um sistema
k	Quantidade de fatores de um planejamento experimental
Re	Repetitividade
k_{eq}	Coeficiente de abrangência (parâmetro estatístico)
s	Desvio padrão amostral
n	Tamanho da amostra (repetições de testes)
n_T	Número de tratamentos de um planejamento experimental
$F1$	Variável de entrada de um Sistema qualquer
R_i	Variável de saída de um sistema qualquer
m_{THC}	Massa de hidrocarbonetos totais
m_{CO}	Massa de monóxido de carbono
m_{CO_2}	Massa de dióxido de carbono

$\%V_{gás}$ Porcentagem, em volume de gasolina no combustível utilizado

$\%V_{ETOH}$ Porcentagem, em volume de etanol no combustível utilizado

$u_i(x)$ Incerteza padrão

U_{ex} Incerteza expandida

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

Desde a sua criação no século XVIII até os dias atuais os veículos automotores passaram por diversas evoluções, tornando-se essenciais para a sociedade moderna. Entretanto, o transporte rodoviário é um dos maiores consumidores de energia de origem fóssil e responsável por gerar poluição atmosférica. O dióxido de carbono, famoso gás carbônico (CO_2), é o principal gás emitido pelos veículos movidos à motores de combustão interna, mesmo não sendo um gás tóxico, ele é alvo de preocupação devido ser um gás atribuído ao efeito estufa. O uso excessivo de energia fóssil pela frota automotiva, provoca aumento da concentração de CO_2 , atingindo valores superiores ao normal na atmosfera, tornando-o, assim, um importante agente nas mudanças climáticas. Além da poluição, a energia fóssil é um recurso limitado, finito, que em certo momento pode vir a se tornar tão escasso a ponto de não atender a demanda de energia cada vez mais crescente (SMITH, 2010), (VICENTE, 2011) e (SILVA, 2011).

Neste cenário existem dois caminhos principais a serem trilhados na busca de amenizar os problemas relacionados a poluição atmosférica e à escassez de reservas petrolíferas. Uma das alternativas é o incentivo à inserção dos combustíveis renováveis na matriz energética mundial, outra abordagem é investir na melhoria da eficiência energética dos veículos automotores, que se traduz na redução da demanda de energia. O Brasil tem evoluído no setor de combustíveis renováveis com a produção e uso do etanol, porém os combustíveis fósseis, derivados do petróleo como a gasolina e óleo diesel ainda predominam na matriz energética Nacional. Em se tratando de eficiência energética, motivados por uma política de eficiência energética, que teve como marco a Lei de Eficiência energética de 2001 (Lei 10.295 de 2001), ocorreram nos últimos anos investimentos importantes no setor, que contribuíram para o estabelecimento de sistemas mais eficientes e menos poluentes.

Mais recentemente os avanços tecnológicos no setor automotivo no Brasil foram alavancados pelo Programa de Incentivo à Inovação Tecnológica e Adensamento da Cadeia Produtiva de Veículos Automotores (INOVAR-AUTO, 2012 – 2017), o Programa teve como objetivo elevar a eficiência energética dos veículos produzidos e comercializados no país através de incentivos fiscais. Tal cenário de incentivo à eficiência energética fomentou o surgimento de soluções no setor automotivo com foco na redução de consumo de combustível. Algumas dessas soluções são conhecidas como tecnologias de eficiência energéticas, a exemplo cita-se o sistema de parada e partida automático do motor *Start stop* (LOPES, *et al.* 2017c).

Cada recurso ou tecnologia de eficiência energética desenvolvida apresenta suas particularidades e aplicações específicas, contudo um veículo automotor possui vários subsistemas que trabalham de forma dinâmica, sendo possível que tecnologias de eficiência energética aplicadas simultaneamente em um veículo interajam entre si. Portanto, se faz necessário analisar como as tecnologias se comportam de forma combinada, pois interações podem amplificar ou reduzir o efeito das mesmas no consumo de combustível do veículo (BARROS NETO, SCARMINIO e BRUNS, 2001).

Uma das formas de analisar as interações entre variáveis é lançando mão de ferramentas estatísticas, como as técnicas de Planejamento experimental, conhecido também por DoE (do inglês *Design of Experiments*), que permite avaliar os efeitos das combinações possíveis em um sistema de interesse. A aplicação da estatística experimental se mostra expressivamente útil quando o número de tecnologias é elevado, como é o caso de vários veículos automotores com tecnologias embarcadas com foco em redução de consumo de combustível (BARROS NETO, SCARMINIO e BRUNS, 2001).

1.1 Objetivos

O objetivo deste trabalho é analisar os efeitos de tecnologias de eficiência energéticas implementadas em veículos automotores considerando interações existentes entre as tecnologias por meio de ferramentas estatísticas. Este trabalho mostra-se relevante para a sociedade, pois contribui de forma positiva com o desenvolvimento de veículos mais eficientes, aproveitando melhor a energia disponível no combustível, reduzindo seu consumo e as emissões de poluição atmosférica. As variáveis que compõem o escopo do trabalho são: motor, alternador, controle de alimentação da bomba de combustível, óleo de câmbio, indicador de troca de marcha, start stop, relação de marcha, pneu, aerodinâmica e inércia, tendo as mesmas sido analisadas individualmente e de maneira combinada.

Especificamente os objetivos são:

1. Aplicar metodologia DoE no estudo de interações para avaliar a variação de consumo de combustível de um veículo automotor (metodologia combinada);
2. Estratificar a variação de consumo de combustível devido aplicação de tecnologias de eficiência energética considerando as interações entre as tecnologias;

3. Analisar as interações entre as tecnologias de eficiência energética, destacando as mais relevantes;
4. Comparar a metodologias aplicada (combinada) com a metodologia que não considera as interações (chamada de individualizada).

CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo é dividido em 5 seções, inicialmente discorre-se sobre o contexto de políticas de eficiência energética adotadas no Brasil que motivaram desenvolvimento tecnológico no setor automotivo. Na sequência são tratados aspectos acerca dos veículos automotores relevantes para o estudo em questão. A terceira seção traz conceitos sobre consumo de combustível e eficiência energética. A seção 4 é dedicada à apresentação de algumas tecnologias de eficiência energética automotiva. Por último é apresentado o estado da arte.

2.1 Políticas de incentivo à eficiência energética do setor automotivo Brasileiro

O Brasil segue a tendência de vários países na tentativa de controlar o nível de poluição urbana advinda do setor de transporte automotivo fomentando o desenvolvimento tecnológico para promover uma frota de veículos mais eficientes energeticamente. Em razão disso foram criados nas últimas décadas decretos, leis e programas que corroboram com uma política de eficiência energética, como o Programa nacional da racionalização do uso dos derivados do Petróleo e do Gás natural (CONPET), o Programa Brasileiro de Etiquetagem veicular (PBEV), o Programa de Incentivo à Inovação Tecnológica e Adensamento da Cadeia Produtiva de Veículos Automotores (INOVAR-AUTO) e a Rota 2030, lançado recentemente.

2.1.1 CONPET

O Programa nacional da racionalização do uso dos derivados do Petróleo e do Gás natural foi criado em 1991 com objetivo de motivar o uso consciente dos derivados do petróleo e do gás natural, evitando o desperdício de energia não renovável como a gasolina e o óleo diesel, que são os combustíveis mais utilizados pelo setor automotivo (CONPET, 2012b) e (LOPES, *et al.* 2017c).

O CONPET tem papel fundamental no Brasil, pois ele atua na regulamentação da Lei de Eficiência Energética criada em 2001 (Lei 10.295/2001- Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia) no que diz respeito aos níveis de rendimento energético de diversos equipamentos, entre eles os veículos automotores, sendo também responsável por coordenar os Programas Brasileiros de Etiquetagem Veicular, de pneus e equipamentos de linha branca (CONPET, 2012a).

2.1.2 PBEV

O Programa Brasileiro de Etiquetagem Veicular foi implementado em 2009 com o objetivo de divulgar os níveis de consumo e emissões de veículos automotores leves por meio de etiquetas fixadas nos veículos. O PBEV é coordenado pelo INMETRO com assistência do CONPET, portanto os valores de consumo e eficiência energética declarados pelas montadoras de veículos são disponibilizados no site do CONPET e INMETRO. (CONPET, 2016).

Para classificação energética informada ao PBEV os veículos são avaliados em consumo e emissões por meio de ensaio padronizados em laboratório, no qual o veículo é operado sobre um dinamômetro de chassi seguindo ciclo de condução, urbano e estrada, estabelecido por norma. Os ciclos utilizados no Brasil foram criados nos Estados Unidos, sendo popularmente conhecidos por FTP-75 (ciclo urbano) e *Highway* (ciclo estrada). De acordo com os resultados dos testes realizados cada veículo recebe uma etiqueta com classificação que varia de **A** (mais eficiente) até **E** (menos eficiente) (CONPET, 2016).

2.1.3 INOVAR-AUTO

No último ano (2017) foi concluído no Brasil o Programa de Incentivo à Inovação Tecnológica e Adensamento da Cadeia Produtiva de Veículos Automotores, que teve início em 2012. O INOVAR-AUTO foi criado pela Lei n. 12.715/2012 e regulamentado pelo Decreto n. 7.819, com objetivo de elevar a eficiência energética da frota de veículos automotores e motivar o desenvolvimento tecnológico no setor automotivo, por meio de incentivos fiscais concedidos as empresas, montadoras e sistemistas que comercializam veículos no Brasil. O Programa estabeleceu metas de aumento de eficiência energética que foram atendidas até 2017. Com a conclusão do Programa e o cumprimento das metas observa-se o sucesso do INOVAR-AUTO evidenciando que o setor automotivo atualmente dispõe de tecnologias e recursos que outrora não dispunha (BRASIL, 2012) e (IPEA, 2017).

2.1.4 Rota 2030

Desde 2017 estão ocorrendo discussões para elaborar um programa que dê continuidade aos resultados do INOVAR-AUTO promovendo o incentivo à eficiência energética no Brasil. Apesar de ter sido esperado para substituir o INOVAR-AUTO no início de 2018, o lançamento do Programado foi realizado em meados do presente ano. A Rota 2030 foi lançado em caráter de Medida Provisória, com a proposta de fomentar a indústria automobilística no Brasil,

promovendo competitividade no mercado, além do desenvolvimento de tecnologias sustentáveis. Esta nova política aponta as direções que devem ser percorridas nos próximos 15 anos. Assim como o Inovar-Auto a Rota 2030 continua com políticas de benefícios fiscais por meio do Governo e metas de aumento de eficiência energética por parte da indústria automotiva, com destaque para participação de veículos híbridos e elétricos. Além da eficiência energética a Rota 2030 também propõe aumento dos itens de segurança e que auxiliem na condução do veículo (PLANALTO, 2018) e (AUTO ESPORTE, 2018).

2.2 Veículos automotores

A história dos veículos automotores indica que o seu surgimento foi resultado de adaptações tecnológicas gradativas feita a partir de carruagens equipadas com motores a vapor, no século XVIII. Porém é considerado como marco da criação do automóvel, o veículo construído pelo alemão Karl Benz em 1885, um triciclo com motor de combustão interna de quatro tempos movido à gasolina, em razão disso Karl Benz é considerado o pai do automóvel (SILVA, 2011).

Apesar do Alemão Benz receber o título de pai do automóvel, no mesmo período, o cientista Alemão Gottlieb Daimler construiu um modelo com motor de dois tempos, que posteriormente foi comercializado pela empresa francesa *Parhard et Levassor*, que adotou configurações utilizadas até os dias atuais, como posicionamento dianteiro do motor e tração no eixo traseiro (SILVA, 2011).

No que tange a produção industrial automotiva, o pontapé inicial foi marcado pela criação do sistema de produção em série, desenvolvido pelo engenheiro norte-americano Henry Ford, no início do século XX. Desde então, os avanços tecnológicos no setor automotivo têm surgido de forma consideravelmente rápida em todos os sistemas envolvidos nos veículos (PENTEADO, 2009) e (PEREIRA, 2011).

Um veículo automotor é composto por um conjunto de sistemas, cuja a função básica é o deslocamento, para deslocar-se é necessário vencer as forças que atuam de forma resistiva ao deslocamento do veículo, isso é possível pelo fornecimento de energia proveniente do trem de forças ou trem de potência (em inglês, “*powertrain*”). A seguir são apresentados os principais conceitos relacionados às forças de resistência ao deslocamento e ao trem de forças do veículo para compreensão das tecnologias de eficiência energética que serão abordadas posteriormente.

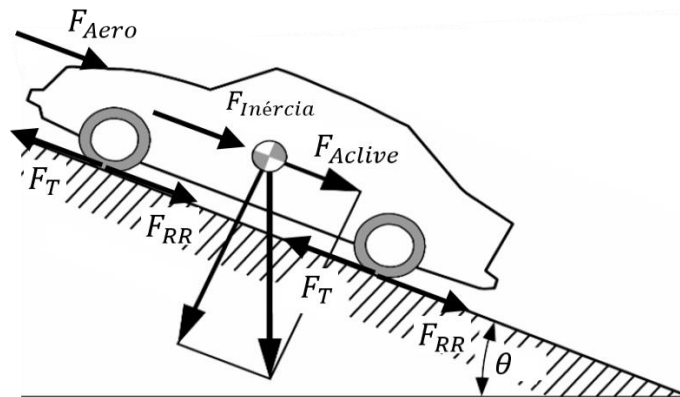
2.2.1 Forças de resistência ao deslocamento do veículo

O estudo das forças e movimentos de veículos automotores são descritos pela dinâmica veicular, que é geralmente dividida em três subáreas, dinâmica longitudinal, lateral e vertical. No estudo em questão apenas a dinâmica longitudinal tem relevância significativa, portanto somente ela será abordada neste trabalho.

As principais forças que atuam em um veículo automotor é a força trativa (F_T), que promove o deslocamento e as forças de resistência ao deslocamento (F_D), F_D é o resultado da soma das forças de resistência ao rolamento dos pneus (F_{RR}), resistência aerodinâmica (F_{Aero}), resistência a inclinação da via (F_{Active}) e resistência inercial ($F_{Inércia}$), conforme a Equação (1), como pode ser observado na Figura 1 (GILLESPIE, 1992).

$$F_D = F_{RR} + F_{Aero} + F_{Active} + F_{Inércia} \quad (1)$$

Figura 1: Forças atuando em um veículo em aceleração



Fonte: Adaptada de (NAUNHEIMER, *et al.* 2011)

Para acelerar um veículo é necessário que o trem de forças do veículo forneça energia suficiente para vencer a força de resistência ao deslocamento F_D . A energia entregue as rodas, em forma de torque é convertida em força trativa F_T na área de contato entre o pneu e o solo sob a condição de aderência entre pneu e pista. De tal modo, que o veículo acelera toda vez que a força trativa F_T for maior que a força de resistência ao deslocamento F_D . Logo quanto menor a força de resistência ao deslocamento, menos energia é requerida do motor para deslocar o veículo, ou seja, menor força trativa é necessária para promover uma mesma aceleração. Quanto mais eficiente o trem de forças menor quantidade de combustível precisa ser queimada, conseqüentemente, o consumo de combustível também deve ser menor (GILLESPIE, 1992).

Para entender melhor as forças de resistência ao deslocamento, serão apresentadas na sequência cada uma delas:

I. Força de resistência ao rolamento

O rolamento é o movimento do pneu caracterizado pelo contato instantâneo do pneu com a via, de forma que não haja movimento relativo (escorregamento) entre a superfície de contato do pneu e a via. Esse movimento é necessário para a transmissão de força entre o pneu e o solo, ocorrendo geralmente um escorregamento parcial devido a interação que ocorre na área de contato do pneu com a pista. A força de resistência ao rolamento, F_{RR} , atua nos pneus opondo-se ao movimento do pneu reduzindo o desempenho do veículo e aumentando o consumo de combustível (CANALE, 1989).

Os pneus automotivos são constituídos em maior parte por borracha. Em funcionamento, os pneus são deformados ciclicamente e devido à histerese da borracha, uma parcela de energia gasta na deformação do pneu é dissipada em forma de calor. Essa perda de energia é chamada de força de resistência ao rolamento (LOPES, *et al.* 2017a) e (ALMEIDA, SOARES e REIS, 2010).

Segundo a Norma SAE J2452 a resistência ao rolamento é a perda de energia consumida por unidade distância, sendo equivalente à soma escalar de todas as forças de contato tangente à superfície de teste paralela ao plano do pneu durante o teste em laboratório. F_{RR} pode ser calculada pela Equação (2), tendo como unidade $N/1000N$ (SAE J2452, 1999).

$$F_{RR} = f_{rr} \cdot W \quad (2)$$

Onde f_{rr} é o coeficiente de resistência ao rolamento e W é a carga aplicada ao pneu, geralmente W é a força peso em condições de pista, mas em ensaios de laboratório é uma carga específica imposta. Ensaios para determinar o coeficiente de resistência ao rolamento são regulamentados pela Norma ISO 28.580 e pela SAE J2452 (GALI, 2015) e (SAE J2452, 1999).

A força de resistência ao rolamento é afetada por fatores como pressão interna do pneu, as condições da via como dureza e rugosidade, temperatura do solo, desgaste do pneu, entre outros. Dentre os fatores citados a pressão do pneu é um dos mais significativos (GALI, 2015).

Com relação aos parâmetros construtivos, o aspecto mais relevante é o material da borracha que compõem o pneu, em maior parte da banda de rodagem, que efetivamente entra em contato com a pista (GALI, 2015).

Em veículos de passageiros o consumo de combustível devido à resistência ao rolamento é estimado entre 5 a 15 %. Mas estes percentuais variam de acordo com as características do pneu e da via, podendo assumir valores maiores. Reduções da resistência ao rolamento em torno de 10 % pode proporcionar economia de consumo entre 1,5 e 3,0 % em veículos de carga, para veículos de passageiros a economia é geralmente menor, entre 0,5 e 1,5 %. (BARBOSA, 2013).

No Brasil os fabricantes de pneus devem etiquetar seus pneus com o valor de eficiência energética dentro do Programa Brasileiro de Etiquetagem de Pneus, com índices que variam de **A** (mais eficiente) à **G** (menos eficiente) de acordo com o valor do coeficiente de resistência ao rolamento medido em laboratório (LOPES, *et al.* 2017a).

II. Força de resistência aerodinâmica

A força de resistência aerodinâmica ou arrasto, F_{Aero} , é a componente na direção de deslocamento do veículo da força aerodinâmica resultante do escoamento de ar sobre o veículo, que se opõe ao seu movimento longitudinal. Apesar da força aerodinâmica ser aplicada em todo o corpo do veículo, pode-se considerá-la como uma força concentrada aplicada no centro de pressão, Figura 1, esta força é calculada pela Equação (3) (GILLESPIE, 1992) e (FOX, PRITCHARD e MCDONALD, 2013).

$$F_{Aero} = \frac{1}{2} \rho \cdot V^2 \cdot A \cdot C_x \quad (3)$$

Onde $\left\{ \frac{1}{2} \rho \cdot V^2 \right\}$ é a pressão dinâmica do escoamento, ρ é a massa específica do ar, V é a velocidade do escoamento em relação ao veículo, A é a projetada da vista frontal e C_x é o coeficiente de arrasto aerodinâmico ou coeficiente de penetração aerodinâmica. Este coeficiente muda de acordo com o formato do veículo, quanto mais aerodinâmico for a sua forma, menor é o C_x . Uma vez que a resistência aerodinâmica varia com o quadrado da velocidade, o seu efeito se torna mais relevante em altas velocidades (SOUSA e GONÇALVES, 2013) e (FOX, PRITCHARD e MCDONALD, 2013).

III. Força de resistência à inclinação da via - ativa

Esta força é a componente da força peso no sentido de deslocamento da pista, presente quando a via é inclinada, conforme a Figura 1, podendo ser calculada pela Equação (4), em que W é a força peso e θ é a inclinação da via em relação à horizontal (GILLESPIE, 1992).

$$F_{active} = W \cdot \sin \theta \quad (4)$$

A força de resistência ao aclave depende da inclinação da via, que não é um parâmetro controlado pela indústria automotiva, contudo ela é afetada pela massa do veículo, logo quanto mais leve o veículo menor é o efeito da resistência ao aclave.

IV. Força de resistência inercial

Todo corpo que sofre aceleração é submetido a ação da força inercial atuando no centro de gravidade do corpo, contrário ao sentido da aceleração, que pode ser calculada pela Equação (5) (GILLESPIE, 1992).

$$F_{Inércia} = m_{eq} \cdot a \quad (5)$$

Em que m_{eq} é a massa equivalente do veículo e a é a aceleração do veículo. Para promover a aceleração sofrida pelo corpo é necessário vencer a inércia devido a massa do veículo e também a inércia rotativa dos diversos componentes rotativos que um veículo automotor possui, de forma que m_{eq} é a soma da massa do veículo (inércia de translação) e da massa correspondente a inércia rotativa dos componentes rotativos (BASTOS, 2013).

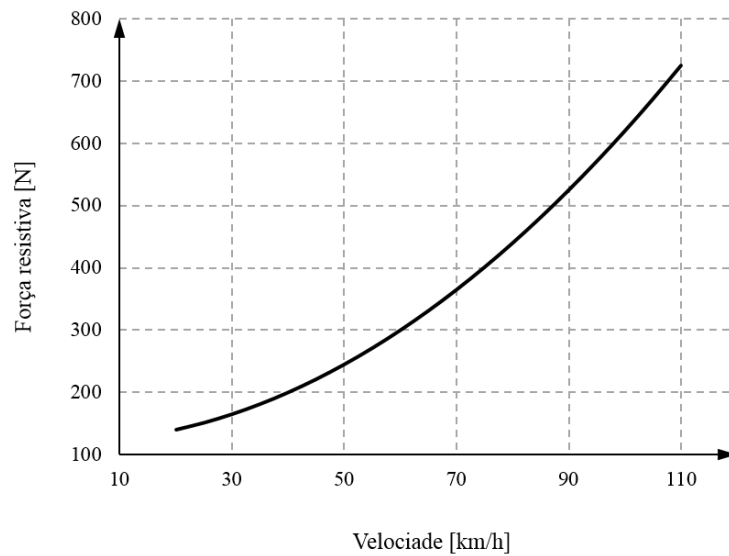
2.2.2 Medição das forças resistivas do veículo

As forças de resistência ao deslocamento, com exceção da resistência ao aclave, podem ser medidas em um teste de desaceleração livre em pista reta e plana, também conhecido como teste de *coast down*. No Brasil a ABNT NBR 10312 estabelece o procedimento de ensaio, no qual o veículo é posto sob desaceleração livre de 100 km/h até 30 km/h, em uma pista reta sem inclinação significativa. Durante a desaceleração são medidos os tempos entre intervalos de velocidade constante, máximos de 10 km/h, a partir dos quais é calculada a curva de força resistiva do veículo em função da velocidade do veículo (V_i). A Figura 2 mostra uma curva típica das forças resistivas de um veículo automotor. O resultado do ensaio de *coast down* são os coeficientes (F_0 e F_2) da curva de força resistiva, Equação (6) (ABNT NBR 10312, 2014).

$$F_{CD} = F_0 + F_2 \cdot V_i^2 \quad (6)$$

F_{CD} é a força resistiva do veículo (N), F_0 é o termo de ordem zero da equação de força resistiva (N) e F_2 é o termo de 2ª ordem (N/(m/s)²). Os coeficientes podem ser calculados pelo método dos Mínimos quadrados (ABNT NBR 10312).

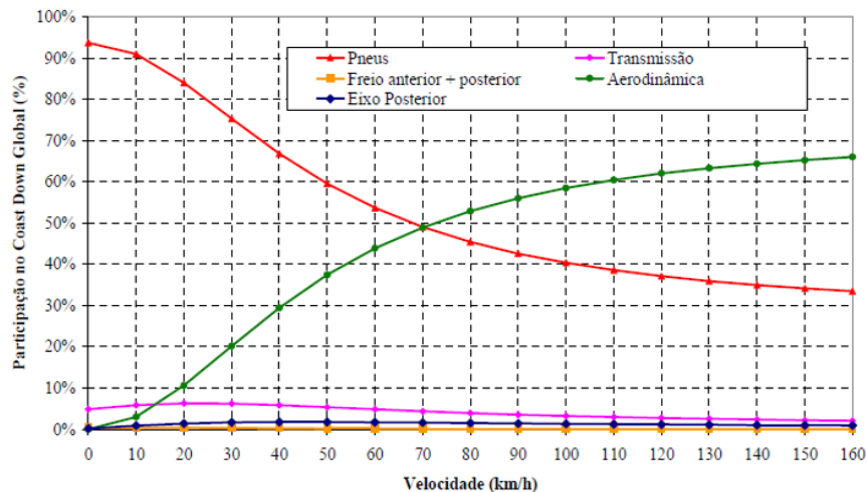
Figura 2: Forças resistivas ao deslocamento de um veículo automotor



Fonte: Elaborado pela Autora

Na Figura 3 é apresentado os resultados de um estudo feito por (ALMEIDA, SOARES e REIS, 2010), em que mostra a participação de cada uma das forças resistivas captadas no *coast down* por meio de um teste chamado *coast down* fracionado, que além das forças consideradas até aqui também inclui a resistência da transmissão e freios.

Figura 3: Distribuição da força resistiva entre as suas componentes – resultado do *Coast down* fracionado



Fonte: (ALMEIDA, SOARES e REIS, 2010)

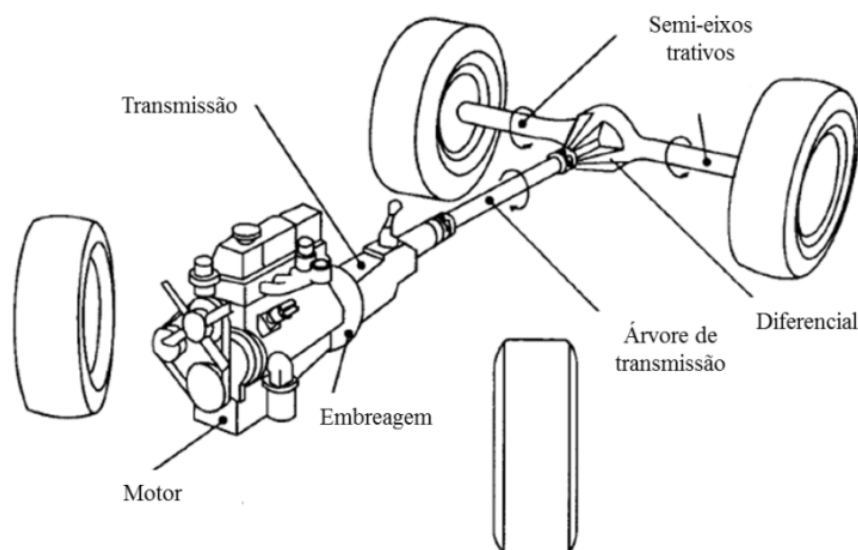
De acordo com a Figura 3 é possível perceber que as maiores influências nas forças resistivas se devem aos pneus (resistência ao rolamento) e aerodinâmica. No teste de *coast down* fracionado também são consideradas as perdas de energia por atrito da transmissão, eixos, e residual de freios, mas como pode ser observado estes valores são pequenos em comparação com as perdas nos pneus e arrasto aerodinâmico (ALMEIDA, SOARES e REIS, 2010).

Um aspecto importante de se observar na Figura 3 é o fato da resistência ao rolamento e aerodinâmica mudarem a sua participação da resistência total em função da velocidade, isso se deve principalmente porque a força aerodinâmica aumenta com o quadrado da velocidade, então, a medida que a velocidade cresce a resistência aerodinâmica torna-se consideravelmente mais significativa.

2.2.3 Trem de forças

O sistema responsável pelo deslocamento efetivo do veículo é o trem de forças, que fornece tração, potência ou energia ao veículo. O trem de força é composto basicamente pelo motor e sistema de transmissão. A Figura 4 ilustra um trem de forças genérico típico de veículos com transmissão manual (GILLESPIE, 1992).

Figura 4: Sistema de forças (*powertrain*) de um veículo com tração traseira



Fonte: Adaptada de (GILLESPIE, 1992)

A Figura 4 mostra apenas uma das configurações de posicionamento do motor e sistema de transmissão, mas outras possibilidades podem ser usadas. Além do motor e sistema de transmissão pode-se considerar também como *powertrain* o sistema elétrico, pois a energia elétrica utilizada pelo veículo é produzida a partir da energia fornecida pelo motor, logo a energia efetiva entregue ao sistema de transmissão é menor que a fornecida pelo motor, pois uma parte é convertida em energia elétrica por meio do alternador. A seguir será abordado o motor, o sistema de transmissão e um pouco sobre a alimentação do sistema elétrico.

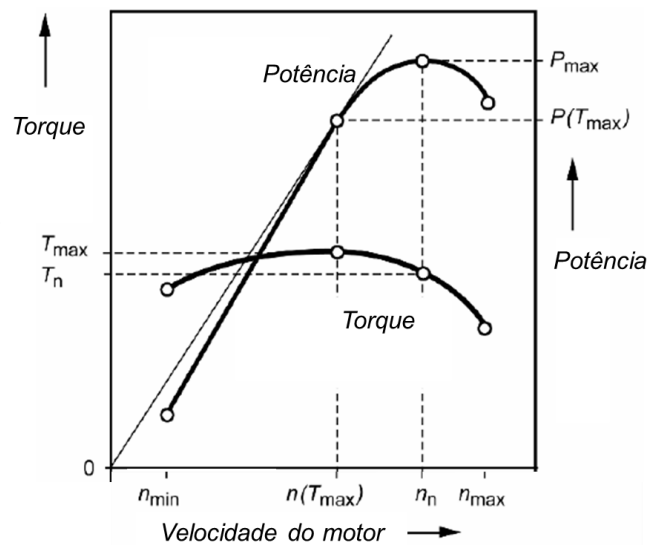
I. Motor

A energia necessária para deslocar os veículos convencionas tem origem na queima da mistura ar-combustível no interior dos motores de combustão interna (MCI). Na câmara de combustão ocorre a conversão de energia química presente nas ligações do combustível em energia térmica por meio da combustão controlada da mistura ar-combustível, esta por sua vez é convertida em energia mecânica por meio do trabalho de expansão dos gases resultantes da combustão. Posteriormente uma parte da energia mecânica é transmitida às rodas através do sistema de transmissão e outra parte é usada para gerar energia elétrica por meio do alternador (FENDER NETO, 2010) e (WEIHERMANN, 2015).

O Motor de combustão interna utilizados nos veículos automotores são geralmente motores de 4 tempos (admissão, compressão, expansão e exaustão). Estes motores podem ser classificados quanto ao tipo de ignição em ignição por centelha ou por compressão. No primeiro tipo ocorre a compressão da mistura ar-combustível, sendo a ignição controlada por centelha, exemplos desses motores são aqueles movidos à gasolina e etanol, que são mais utilizados em veículos leves ou de passeio. Enquanto os veículos pesados, caminhões, ônibus e também alguns utilitários esportivos (SUVs) ou fora de estrada “*off-road*” utilizam motores com ignição por compressão, em que apenas ar é comprimido e a ignição é controlada pela injeção do combustível na câmara com o ar já comprimido (MAHLE, 2012) e (HEYWOOD, 1988).

Os motores de combustão interna fornecem potência e torque não uniforme em faixas específicas de rotação, geralmente a rotação de maior potência é diferente da rotação de torque máximo. Na Figura 5 são apresentadas as curvas características de um motor de combustão interna (NAUNHEIMER, *et al.* 2011).

Figura 5: Curvas características de motor de combustão interna

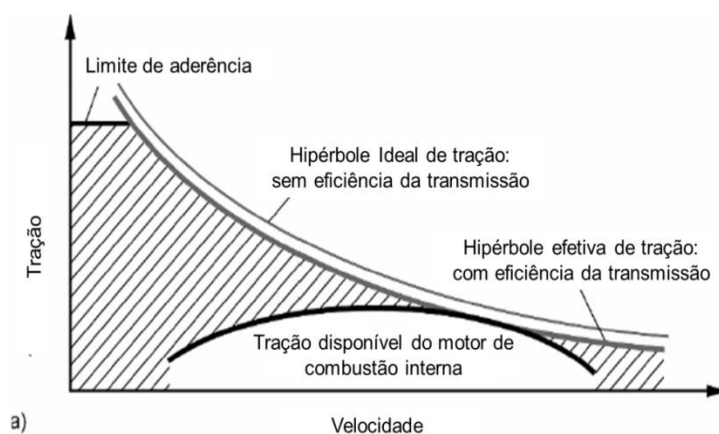


Fonte: Adaptada de (NAUNHEIMER, *et al.* 2011)

II. Sistema de transmissão

A potência disponível pelo motor pode ser observada em uma curva conhecida como hipérbole de tração ideal, obtida pela razão entre a potência máxima e a rotação, a hipérbole efetiva de tração considera a eficiência da transmissão, as duas curvas são traçadas junto com a curva de tração fornecida pelo motor e o limite de força que pode ser transmitida à via pelos pneus (aderência) na Figura 6, como pode ser observado, boa parte da área sob a curva não é utilizada (OLIVEIRA, 2011).

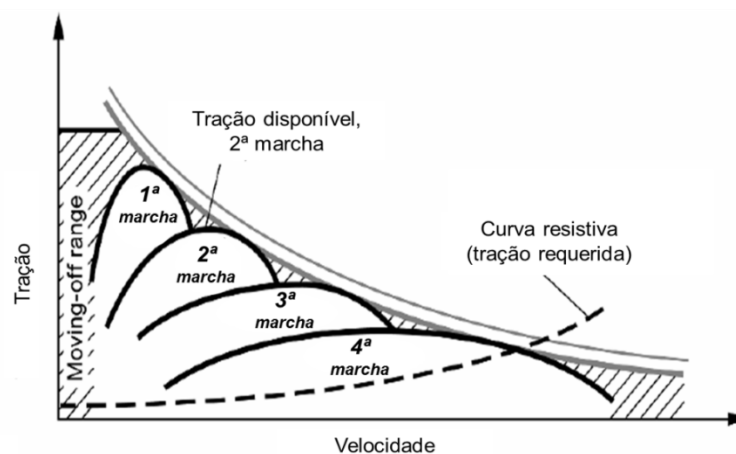
Figura 6: Curvas de tração disponíveis pelo motor de combustão interna



Fonte: Adaptada de (NAUNHEIMER, *et al.* 2011)

O sistema de transmissão permite distribuir a curva de tração do motor sob a hipérbole de tração efetiva de modo a aproveitar o máximo de torque em cada faixa de velocidade do motor. A Figura 7 mostra a curva de tração do motor considerando um escalonamento de 4 marchas, também é plotado a curva de força resistiva (OLIVEIRA, 2011).

Figura 7: Curvas de tração do motor com escalonamento de marchas



Fonte: (NAUNHEIMER, *et al.* 2011)

Conforme a Figura 7 a primeira marcha é a que multiplica mais o torque (maior relação de marcha), pois nessa região existe maior disponibilidade de força. Tornando-se menor a necessidade de multiplicar o torque à medida que a velocidade aumenta, ou seja nas últimas marchas as relações de marcha são menores.

A relação de marcha total é o produto da relação de transmissão da marcha engatada e do diferencial, que é o componente responsável por fazer a compensação entre a roda direita e esquerda em curvas, pois a velocidade em cada roda deve ser diferente para realizar manobras curvas sem uma roda arrastar a outra (CARDOSO, 2012).

Apesar do sistema de transmissão ser composto por vários componentes (embreagem ou conversor de torque, caixa de mudança de marchas, eixos, diferencial, etc.) costuma-se associar o termo transmissão a caixa de marchas e ao tipo de sistema. A transmissão ou câmbio pode ser manual (MT), automática (AT), automatizada (MTA), ou continuamente variável (CVT). Sob a ótica do consumidor a principal diferença entre elas é com relação ao acionamento, no caso do câmbio manual a troca de marcha é feita pelo condutor, nas demais opções não é necessário à sua intervenção, com algumas exceções (OLIVEIRA, 2011).

As transmissões MT e MTA são em geral mais econômicas em termos de implementação, manutenção e consumo de combustível, pois a eficiência da transmissão manual é maior que as demais. Sua principal desvantagem é com relação ao conforto para os ocupantes do veículo, pois o acoplamento e desacoplamento da embreagem provoca interrupções de torque, que podem causar desconforto em relação as transmissões automáticas e CVT, contudo a transmissão automatizada (MTA) surgiu como uma tecnologia intermediária

entre os câmbios manuais e automáticos melhorando o conforto (CARDOSO, 2012) e (WEIHERMANN, 2015).

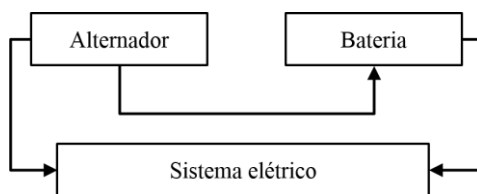
III. Sistema elétrico

O veículo tem uma demanda de energia mecânica como visto anteriormente, provocada pelas forças de resistência ao deslocamento, porém na atualidade é necessário também destacar a importância da demanda de energia elétrica presente nos veículos, pois essa energia também é obtida pela queima do combustível no motor.

Diversos componentes demandam energia elétrica como o próprio funcionamento do motor, que exige consumo de energia elétrica no sistema de ignição, alimentação de combustível, arrefecimento, lubrificação entre outros. Para suprir esta demanda são utilizados dois componentes básicos, o alternador e a bateria (PAPAIOANNOU, 2005).

A bateria é um armazenador de energia, enquanto o alternador é um gerador de energia elétrica, ou melhor dizendo, um conversor de energia mecânica em elétrica. O alternador é responsável por alimentar o sistema elétrico do veículo e recarregar a bateria enquanto o motor está ligado, pois este é acionado pelo torque do motor. Quando o motor está desligado a bateria alimenta o sistema elétrico do carro, em especial para ligar o motor, fornecendo energia para o sistema elétrico juntamente com o alternador, quando este não consegue suprir sozinho a demanda de energia do veículo. Dessa forma a bateria é descarregada, a carga é expressa pelo estado de carga (SOC, do inglês *State of Charge*), que é o percentual de carga instantâneo em relação ao valor nominal máximo de carga da bateria. O alternador deve carregá-la conforme o fluxo da Figura 8 (PAPAIOANNOU, 2005).

Figura 8: Fluxo de carga elétrica em um veículo automotor



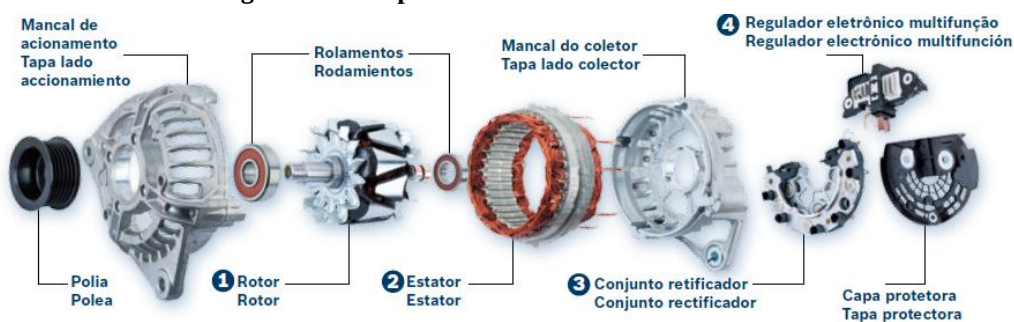
Fonte: Elaborada a partir de (PAPAIOANNOU, 2005)

O alternador usa os princípios da indução eletromagnética, gerando corrente alternada a partir do movimento rotativo do motor, no caso dos alternadores automotivos é necessário um retificador de corrente, pois o veículo trabalha com corrente contínua, Figura 9 (BOSCH, 2005), (SOEIRO, 2009), (EZELLINER, 2011) e (PAPAIOANNOU, 2005).

Figura 9: Alternador automotivo

Fonte: (BOSCH, 2015)

Os componentes básicos de um alternador convencional são o rotor, estator, retificadores de corrente e o regulador de tensão, que podem ser observados na Figura 10 (BOSCH, 2015) e (NASCIMENTO, STIVAL e FONSECA, 2013).

Figura 10: Componentes do alternador automotivo

Fonte: (BOSCH, 2015)

Além da retificação é importante que a tensão necessária para que seja produzida corrente seja compatível e estável com o sistema elétrico do alternador, para evitar danos à máquina, o regulador de tensão monitora e regula a tensão do alternador para mantê-las nas condições adequadas de funcionamento (BOSCH, 2015) e (PEREIRA, 2012).

2.3 Consumo de combustível e eficiência energética

A seguir serão abordados alguns conceitos relacionado à consumo de combustível, procedimento de medição e eficiência energética no contexto deste trabalho.

2.3.1 Consumo de combustível e procedimento de medição

O consumo de combustível automotivo é uma grandeza influenciada por diversos fatores como temperatura ambiente, qualidade do combustível, vento, altitude, fatores circunstanciais, como o modo de condução do motorista, trânsito, congestionamento, condições

de asfalto, do amaciamento e pressão dos pneus, uso de sistemas auxiliares como ar-condicionado, entre outros fatores. Com todas estas variáveis torna-se difícil medir o consumo de combustível na rua, pois a cada viagem um valor diferente pode ser obtido para um mesmo veículo. Portanto, para fins de homologação e declaração pelos fabricantes, o consumo de combustível é medido sob condições padrões e controladas em laboratório. Isso justifica o fato do consumo de combustível percebido pelos condutores na rua as vezes divergir do valor declarado pelos fabricantes (ROSILHO, 2013).

Consumo de combustível automotivo (C) é definido como a quantidade de combustível em volume gasta por distância percorrida, no Brasil a medição de consumo de veículos automotores leves é regulamentada pela ABNT NBR 7024 de 2017, sendo expressa em unidade de $l/100km$ (ABNT NBR 7024, 2017).

No ensaio de consumo de combustível o veículo é posto em um dinamômetro de chassi, sobre o qual deve operar seguindo um ciclo de condução padrão de velocidade por tempo, a quantidade de combustível pode ser medida por três métodos (gravimétrico, volumétrico e balanço de carbono com análise dos gases de combustão). A distância percorrida (D) é medida indiretamente pela velocidade dos rolos do dinamômetro, o consumo é calculado pela razão entre o volume de combustível (v), em litros, e a distância percorrida D em km , Equação (7) (ABNT NBR 7024, 2017).

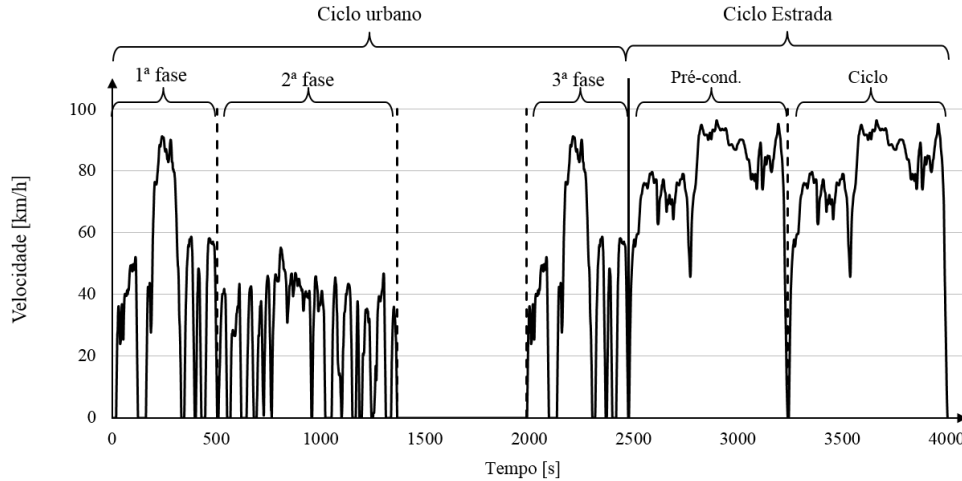
$$C = \frac{v}{D} \times 100 \quad (7)$$

Durante o ensaio a temperatura ambiente do laboratório deve ser mantida entre 20 °C e 30 °C. O dinamômetro de chassi deve reproduzir as forças que o veículo é submetido em pista (forças resistivas do veículo). Como o veículo permanece parado sobre o rolo, as forças são aplicadas pelo dinamômetro eletricamente ou hidraulicamente, de acordo com o tipo de equipamento disponível. Portanto antes do ensaio ser realizado é necessário executar um teste de desaceleração livre em pista (*coast down*) para obter os coeficientes da força resistiva (F_0 e F_2) descritos pela Equação (6), que deve ser imposta no dinamômetro (ABNT NBR 6601, 2012) e (ABNT NBR 7024, 2017).

São utilizados dois ciclos de condução durante o ensaio, um para condução urbana e outro para condução estrada, Figura 11. Os ciclos estabelecem o perfil de velocidade que o veículo deve executar durante o teste. O ciclo urbano é composto por 3 fases, sendo a 1ª fase de partida fria transiente, a 2ª fase de partida fria estabilizada e a 3ª fase de partida quente transiente. Este ciclo foi criado nos Estados Unidos também sendo conhecido como FTP-75,

representando uma viagem média de 17,8km. (ABNT NBR 6601, 2012) e (ABNT NBR 7024, 2017).

Figura 11: Ciclo de condução de ensaio de consumo no Brasil



Fonte: Elaborada pela Autora¹

Como pode ser observado na Figura 11 a 1ª e 3ª fase são iguais, apenas a condição de partida é diferente, a fase 1 é sempre iniciada com motor frio, sendo necessário que o motor permaneça desligado por no mínimo 12 horas e no máximo 36 horas, a fase 3 por sua vez é iniciada com o motor aquecido, tendo uma pausa entre a fase 2 e a 3 de $(10 \pm 1)min$ com o motor desligado, no entanto, o ciclo original tem uma 4ª fase igual à 2ª fase, porém nas duas fases estabilizadas (2 e 4) o motor já se encontra aquecido, logo teoricamente elas são iguais, em razão disso o ciclo FTP-75 dispensa a fase 4, mas à considera no cálculo do consumo urbano igual a fase 2. O consumo de combustível urbano (C_{urb}) é uma média ponderada de 43% da fase de partida fria (fase 1 e 2) e 57% da fase de partida quente (fase 3 e $\{4 = 2\}$), Equação (8). (ABNT NBR 6601, 2012) e (ABNT NBR 7024, 2017).

$$C_{urb} = 0,43 \frac{C_1 D_1 + C_2 D_2}{D_1 + D_2} + 0,57 \frac{C_3 D_3 + C_2 D_2}{D_3 + D_2} \quad (8)$$

Onde C_i e D_i é o consumo de combustível e a distância percorrida, respectivamente, medidos em cada fase i do ciclo FTP.

O ciclo de condução estrada representa uma viagem média de 16,5 km, este pode ser feito na sequência do ciclo urbano. Sendo necessário realizar um ciclo estrada como

¹ As coordenadas de velocidade e de tempo foram obtidas da ABNT NBR 6601 e ABNT NBR 7024

precondicionamento seguido do ciclo em que efetivamente é feita a medição, portanto são feitos 2 ciclos estradas, Figura 11 (ABNT NBR 7024, 2017).

O consumo de combustível é divulgado nos meios de comunicação, no site do PBEV, no INMETRO e nas Etiquetas fixadas aos veículos em termos de autonomia urbana (A_{urb}) e estrada (A_{est}) ou combinada (A_{comb}), nos veículos que operam com dois combustíveis, o consumo é divulgado com cada combustível (ABNT NBR 7024, 2017). A autonomia (km/l) é calculada com a Equação (9).

$$A_{comb} = \frac{100}{C_{comb}} \quad (9)$$

Onde C_{comb} é o consumo de combustível combinado calculado pela média ponderada de 55% do ciclo urbano e 45% do ciclo estrada, Equação (10) (ABNT NBR 7024, 2017).

$$C_{comb} = 0,55C_{urb} + 0,45 C_{est} \quad (10)$$

Por fim o consumo é expresso também em termos de energia, tornando viável a comparação de veículo com diferentes combustíveis, como por exemplo um veículo *flex*, que apresenta diferentes consumo com etanol e gasolina já que a densidade energética dos combustíveis é diferente, porém em energia o consumo é o mesmo para ambos combustíveis. O consumo energético CE (MJ/km) é calculado pela Equação (11) (ABNT NBR 7024, 2017).

$$CE = \frac{\delta_e}{A_{comb}} \quad (11)$$

Onde δ_e é a densidade energética do combustível em MJ/L . Geralmente é declarado o consumo energético calculado com a autonomia combinada (obtida com o consumo combinado do ciclo urbano e estrada).

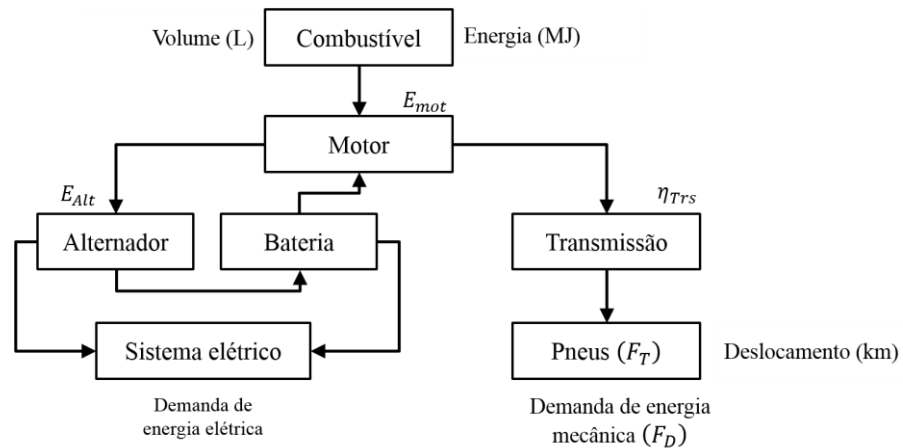
Vale salientar que o consumo de combustível medido em laboratório deve ser informado com o ciclo de condução utilizado, pois o ciclo de condução influi diretamente no resultado obtido.

2.3.2 Eficiência energética

De forma geral eficiência energética é entendida como a relação entre a energia fornecida por um sistema ou equipamento e a energia que foi necessária inserir nesse sistema ou equipamento. No contexto dos veículos automotores pode-se falar de eficiência energética como a relação entre a energia produzida pelo veículo em termos de deslocamento, aceleração

ou energia potencial em relação à quantidade de combustível consumida pelo veículo, ou o quanto o veículo consegue aproveitar da energia do combustível para deslocar-se, a Figura 12 mostra o fluxo de energia típico de um veículo automotor (SMITH, 2010).

Figura 12: Fluxograma de energia típico de um veículo automotor



Fonte: Elaborada a partir de (SMITH, 2010) e (PAPAIOANNOU, 2005)

A entrada do sistema é o combustível, que pode ser quantificada em termos de volume ou energia, a saída é o deslocamento do veículo, quanto maior a relação Deslocamento[km]/combustível[MJ] maior é a eficiência energética do veículo.

No cenário de políticas de eficiência energética no qual o Brasil está inserido o termo eficiência energética foi bastante associado ao consumo energético em (MJ/km) , quanto menor o consumo energético mais eficiente é o veículo, pois menor quantidade de energia é necessária para deslocar o veículo em $1km$.

Apesar do desenvolvimento de tecnologias de eficiência energéticas com objetivos de redução de consumo, existem tecnologias que não mostram seu real benefício no ensaio de medição de consumo em laboratório devido as condições normatizadas, mas provocam redução de consumo em pista. Como toda tecnologia agrega custo para empresa dentro de uma política de eficiência energética, tais tecnologias não se tornam atrativas do ponto de vista financeiro para as montadoras e sistemistas. Portanto o Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior (MDIC) publicou a portaria n. 397 de 2015 concedendo créditos de consumo energético aos veículos que possuem algumas dessas tecnologias para fins de contabilização de aumento de eficiência energética referente ao INOVAR-AUTO, esta é uma forma de motivar a inserção de tecnologias que de fato trazem benefícios para o consumidor. As tecnologias e seus respectivos créditos são apresentados na Tabela 1 (MDIC, 2015).

Tabela 1: Créditos de consumo para tecnologias de eficiência energética concedidos pelo MDIC

Tecnologia	Créditos [MJ/km]
Sistema de desligamento em marcha lenta [Start-stop]	0,0227
Sistema de controle de grade frontal	0,0049
Indicador de troca de marcha [GSI]	0,0134
Sistema de Monitoramento de Pressão de Pneus [TPMS]	0,0134

Fonte: (MDIC, 2015)

2.4 Tecnologias de Eficiência energéticas

Nesta seção serão abordadas tecnologias de eficiência energética automotiva, posteriormente algumas tecnologias são descritas, agrupadas segundo a sua área de aplicação.

2.4.1 Tecnologias de eficiência energética automotivas

São consideradas tecnologias de eficiência energéticas dispositivos ou soluções que tenham como diferencial a funcionalidade de reduzir o consumo de combustível. Um exemplo desse tipo de tecnologia pode ser dado pelo alternador inteligente. O alternador consome parte do combustível do motor para gerar energia elétrica. Um alternador que simplesmente executa a função de gerar energia elétrica pode ser considerado um alternador convencional. Uma tecnologia inovadora desenvolvida para fazer o alternador trabalhar de uma forma otimizada com uma gestão de carregamento inteligente, consumindo menos energia do motor e fornecendo um mesmo nível ou maior de energia elétrica que o alternador convencional, pode ser considerada uma tecnologia de eficiência energética, por contribuir com a redução de consumo de combustível (GUIMARÃES, 2017).

É importante mencionar que no contexto aqui considerado também é tratada como tecnologia algumas soluções ou adaptações do projeto automotivo, que não são necessariamente dispositivos tecnológicos adicionais, quando é compreendido que tais alterações no projeto tenham a finalidade de reduzir consumo de combustível, pois é de interesse também compreender como estas modificações interagem com outros dispositivos ou com as tecnologias de eficiência energética.

O desempenho em termo de aceleração e consumo do veículo dependem da relação entre a força que efetivamente é utilizada para tracionar o veículo F_T e das forças de resistência ao deslocamento F_D , ou seja, quanto menor F_D e maior for F_T mais eficiente se torna o veículo. A Equação (12) mostra o critério básico para acelerar um veículo, esta equação pode ser reescrita

em termos de energia, onde a força trativa disponível nas rodas é resultado da energia mecânica gerada pelo motor (E_{mot}) menos a energia que é convertida em energia elétrica pelo alternador (E_{Alt}) multiplicada pela eficiência da transmissão (η_{Trs}), pois uma parte da energia que é transmitida se perde no sistema de transmissão do veículo. Resumidamente a Equação (12) pode ser descrita de forma genérica pela Equação (13) (OLIVEIRA, 2011).

$$F_T \geq F_D \quad (12)$$

$$\eta_{Trs}(E_{mot} - E_{Alt}) \geq E_D \quad (13)$$

Onde E_D é a energia demanda pelo veículo para se deslocar, que depende da força de resistência ao deslocamento, F_D . A redução de consumo de combustível pode ser alcançada por duas macros linha de aplicação de tecnologias, uma delas é focada nas forças de resistência que atuam sobre o veículo, de forma que a demanda de energia para deslocar o veículo seja menor (E_D). A outra linha de aplicações é investindo em melhorias no sistema *powertrain*, buscando aumentar a sua eficiência, resultando em maior aproveitamento da energia liberada na queima da mistura ar-combustível, que representa aumento do lado esquerdo da Equação (13).

2.4.2 Tecnologias que atuam nas forças de resistência ao deslocamento

Ao reduzir as forças de resistência ao deslocamento do veículo menor quantidade de energia é necessária para movê-lo, fazendo com que o consumo de combustível seja reduzido. As principais formas de obter redução de consumo de combustível nesta linha são por meio de desenvolvimento de pneus, otimização da aerodinâmica do veículo e redução de peso;

I. Aerodinâmicas

Os veículos com melhor formato aerodinâmico apresentam menor resistência ao arrasto, expresso em termos de coeficientes de arrasto (C_x) e área frontal (A). Encontrar o melhor formato aliando a disposição e tamanho dos componentes é um processo difícil, em razão disso a simulação computacional de fluidos é utilizada nesse processo (VIDAL, 2017).

A forma aerodinâmica de um veículo faz parte do seu conceito como produto, sofrendo influência do público alvo que se pretende atingir, como por outros fatores que influenciam no projeto, como tamanho dos componentes, o espaço interno do veículo. Existem várias áreas dentro do projeto automotivo que influenciam na forma do veículo, o setor responsável pela aerodinâmica deve encontrar um ponto ótimo entre C_x e as demais vozes de projeto (SOUSA e GONÇALVES, 2013).

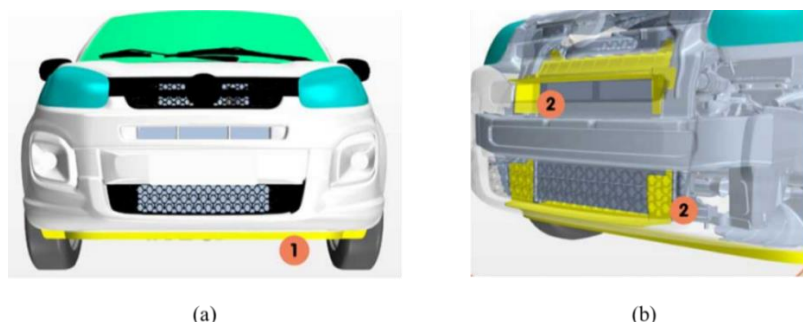
Ramos (2012) estima que redução de 30 % no arrasto resulta em reduções de consumo de combustível na ordem de 10%. Porém Coimbra (2011) estimou por meio de simulação computacional que reduções em torno 14% no arrasto provoca reduções em cerca de 3% no consumo de combustível.

Além da forma em si, existem dispositivos que podem ser adicionados para melhorar a aerodinâmica do veículo, denominados apêndices aerodinâmicos, além de outras duas tecnologias que serão apresentadas posteriormente.

1. Apêndices aerodinâmicos

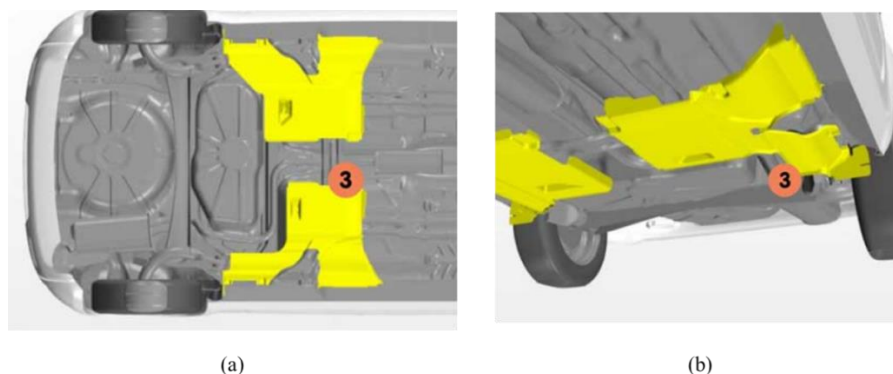
Uso de superfícies aerodinâmica ou apêndices aerodinâmicos é uma das formas de reduzir o arrasto aerodinâmicos, estes dispositivos melhoram o escoamento em torno do veículo em pontos estratégicos, alguns desses dispositivos são aerofólios dianteiro/traseiro, convergedor de ar do radiador, Figura 13, e revestimentos aerodinâmicos no assoalho, Figura 14 (VIDAL, 2017).

Figura 13: (a) Aerofólio dianteiro (spoiler); (b) Convergedor de ar do radiador



Fonte: Adaptada de (VIDAL, 2017)

Figura 14: Revestimentos aerodinâmicos (assoalho)



Fonte: Adaptada de (VIDAL, 2017)

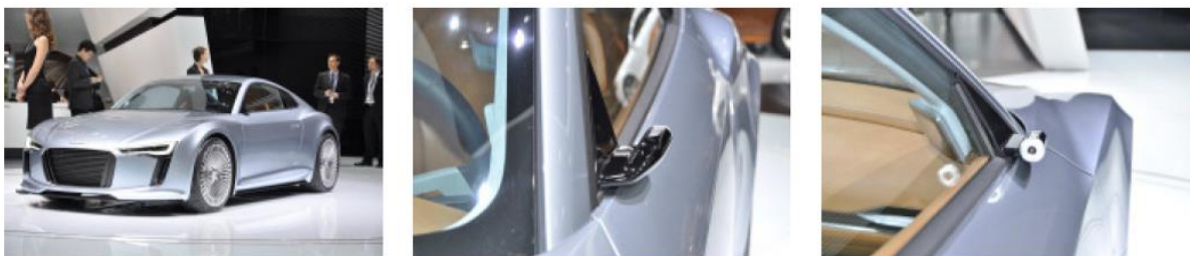
2. Substituição dos espelhos retrovisores por sistema de câmeras

A substituição de retrovisores por câmeras também pode ser uma alternativa para reduzir o arrasto nas laterais do veículo. Segundo Rosilho (2013) a retirada dos espelhos

retrovisores externos contribui para melhoria da forma aerodinâmica contribuindo com a redução de consumo de combustível. Um estudo de caso mostrou que essa tecnologia proporciona 1,16 % de redução de consumo para um veículo, no ciclo de condução estrada, que possui velocidade média de 77,6 km/h e máxima de 96,6 km/h. Segundo Rosilho (2013) a remoção dos espelhos ainda promove redução de ruído e vibrações.

Porém existe limitação legislativa para implementação de tais tecnologia no Brasil, pois há obrigatoriedade dos espelhos retrovisores nos veículos automotores no país. Além da limitação legislativa, esse sistema tem maior custo de reparação em relação aos espelhos. Na Figura 15 pode ser observado um sistema de câmeras instalado em um modelo da marca AUDI (ROSILHO, 2013).

Figura 15: Câmeras substituindo espelhos retrovisores externos em veículos automotores



Fonte: (ROSILHO, 2013)

3. Sistema de controle de grade frontal - AGS

A grade frontal do veículo quando aberta melhora a ventilação e arrefecimento do motor, porém piora o arrasto, melhoria aerodinâmica é obtida quando a grade frontal está fechada, contudo é possível aliar condição com a demanda de arrefecimento do motor por meio de um sistema de controle da grade frontal (AGS, do inglês *Active Grill Shutter*). Dependendo da velocidade do veículo, temperatura da água de arrefecimento do motor e da temperatura dentro da cabine do veículo, o sistema abre ou fecha as aletas da grade. Geralmente a grade fica aberta na partida e em velocidade baixa, quando atingida velocidades maiores a grade é fechada, melhorando a aerodinâmica em velocidades elevadas, que de acordo com a Figura 3 é a faixa em que a resistência aerodinâmica é mais significativa. Os veículos com esta tecnologia recebem os créditos de consumo energético segundo a portaria do MDIC n. 397 de 2015, por não ser considerada uma tecnologia que apresenta seu real benefício no ensaio de medição de consumo de combustível (FORD, 2017) (SAE, 2012), e (MDIC, 2015).

II. Tecnologias que atuam na força de resistência ao rolamento

1. Pneus de baixa resistência ao rolamento

A resistência ao rolamento dos pneus é responsável por consumir boa parte da energia fornecida pelo motor. Em razão disso a indústria de pneus e automotiva tem investido em desenvolvimento de pneus mais eficientes, que apresentam menor resistência ao rolamento, obtendo redução de consumo. Entretanto a redução da resistência ao rolamento pode provocar perdas da capacidade de frenagem e durabilidade (BARBOSA, 2013).

Para reduzir a resistência ao rolamento deve-se aliar melhorias nos componentes materiais, na construção e na redução de peso. Nos últimos anos surgiram no mercado pneus conhecidos como pneus de baixa resistência ao rolamento, com a proposta de redução significativa no consumo de combustível, estes pneus tem como principal diferencial a composição da borracha (BARBOSA, 2013) e (GALI, 2015).

A indústria passou a inserir sílica na matriz de borracha utilizadas na produção de pneus. A sílica aumenta a rigidez dos pneus, que diminui a sua capacidade de deformação e consequentemente menor energia de deformação é dissipada, porém sem prejudicar o desempenho na frenagem (BARBOSA, 2013) e (VIDAL, 2017).

As propriedades de materiais viscoelásticos, como a borracha, tem suas propriedades sensíveis as variações de temperatura e frequência de excitação. A sílica permite alterar a histerese do material de acordo com a frequência de excitação, de modo que os pneus resultantes conseguem apresentar baixa resistência ao rolamento, pois reduz a histerese na região de baixa frequência. A redução de resistência ao rolamento devido artifício pode ser quantificada por meio de ensaio na máquina de resistência ao rolamento e indiretamente no teste de *coast down* pelo coeficiente F_0 (CARDOSO, 2012) e (LOPES, *et al.* 2017a).

Redução de consumo de combustível com o uso dos pneus de baixa resistência ao rolamento depende do fabricante, da quantidade de sílica e dos outros componentes usados na fabricação, além do procedimento de fabricação. Alguns fabricantes defendem percentuais de redução em consumo entre 4% e 7% (BARBOSA, 2013) e (RHODIA, 2016).

2. Sistema de Monitoramento de Pressão do Pneu - TPMS

A pressão do pneu é um fator que afeta o consumo de combustível, pois interfere na resistência ao rolamento do pneu, uma vez que quanto maior a pressão, mais rígido se torna o pneu, menor é a sua deformação, portanto a energia de deformação dissipada é menor (GALI, 2015).

De acordo com a EPA (*Environmental Protection Agency*) pressões abaixo do indicado pelos fabricantes em torno de 3,3 *psi* provoca aumento no consumo em torno de 1% (EPA, 2006).

O Sistema de monitoramento da pressão do pneu TPMS (do inglês *Tire Pressure Monitoring System*) auxilia os condutores a manter a pressão do pneu adequada, para reduzir o consumo. O TPMS usa sensores nos pneus para monitorar a pressão e temperatura, informando por meio de alarme no painel ao condutor quando a pressão estiver fora dos limites especificados pelo fabricante impostos na calibração do sistema (PAPAIOANNOU, 2005).

O TPMS é uma tecnologia de eficiência energética que não mostra seu benefício no teste de consumo em laboratório, portanto ele está incluso nas tecnologias que recebem créditos de consumo energético para fins de comprovação de eficiência energética do INOVAR-AUTO (MDIC, 2015).

III. Inércia

A massa do veículo impacta diretamente na força de resistência ao deslocamento, por meio da força inercial. Na realidade não é apenas a massa transladada em si que rouba energia, mas toda a inércia, incluindo a inércia rotativa de alguns componentes (COIMBRA, 2011).

Redução de peso do veículo induz menor resistência à inércia reduzindo o consumo de combustível, contudo para fins de medição em laboratório pequenas variações de peso podem não ser significativas, pois ABNT NBR 6601 estabelece classes de inércias que deve ser inserida no dinamômetro para o ensaio de consumo, cada classe de inércia. Por exemplo, se a massa para ensaio de um veículo for 1080 kg, ele pertence à classe de inércia 1077, que abrange a faixa de 1050 *kg* à 1105 *kg*, portanto variações entre estes valores não provocam mudanças na inércia com a qual o teste será feito, logicamente, variações que não afetam a classe de inércia podem ser captadas no ensaio de *coast down*, através de pequenas variações nos coeficiente do F_0 e F_2 , mas dependendo da magnitude da variação de massa o efeito sobre F_0 e F_2 pode ser confundido com incerteza da prova (ABNT NBR 6601, 2012).

Segundo Coimbra (2011) reduções de massa em torno de 14% proporciona redução de consumo na faixa de 4,2%, segundo trabalho realizado via simulação computacional.

As reduções de peso podem ocorrer em diversos componentes, carroceria, chassi, motor, sistema de transmissão, o importante é que as reduções não afetem negativamente as demais funcionalidades presentes nos veículos.

2.4.3 Tecnologias que atuam no trem de forças

Elevar a eficiência do sistema *powertrain* em um veículo automotor é sem dúvida uma das formas de reduzir o consumo de combustível. Esta linha de aplicações tecnológicas envolve melhorias no sistema da transmissão, redução das perdas de energia por atrito, redução da demanda de cargas elétricas e melhorias que auxiliem no aumento da eficiência do motor e alternador.

I. Motores turboalimentados - Downsizing

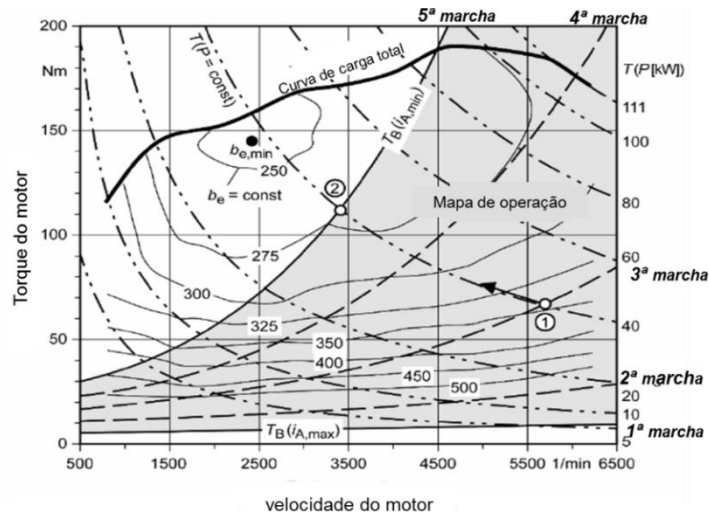
Os motores sobrealimentados tornaram-se famosos nos últimos anos com a proposta de reduzir o consumo de combustível por meio da redução do tamanho do motor ou mais especificamente do volume deslocado do cilindro, fornecendo níveis de torque equiparado a de motores com maior deslocamento volumétrico, em razão disso eles são conhecidos como *downsizing*. Estes motores trabalham nas regiões de baixo consumo no mapa de consumo específico com pressões média efetiva (PME) maiores, por isso conseguem fornecer similar nível de torque que motores aspirados de maior volume deslocado com menor quantidade de combustível (RODRIGUES, 2014) e (SILVA, 2017).

Nesses motores o ar de admissão é comprimido antes de entrar no cilindro por um turbocompressor, que utiliza os gases da combustão para acionar a turbina, reaproveitando a energia térmica que seria dissipada, em razão disso tais máquinas também são conhecidas por motores turboalimentados ou simplesmente motores turbo (HIGA, 2011) e (SILVA, 2017).

II. Tecnologias aplicada no sistema de transmissão

A transmissão afeta o consumo de combustível em dois aspectos, as distribuições das relações de marchas e a eficiência da transmissão. O consumo é menor com baixo giro e torque elevado, conforme o mapa de consumo específico da Figura 16 mostra como a relação de marcha influencia no consumo para um câmbio de 5 marchas. A eficiência da transmissão é influenciada pelo tipo de transmissão e pelas perdas devido o atrito na transmissão de movimento. Quanto mais eficientes for a transmissão menor será o consumo, a eficiência da transmissão pode ser melhorada pelo sistema de lubrificação, pois reduz as perdas por atrito (OLIVEIRA, 2011) e (NAUNHEIMER, *et al.* 2011).

Figura 16: Mapa de consumo específico do motor com as relações de marcha

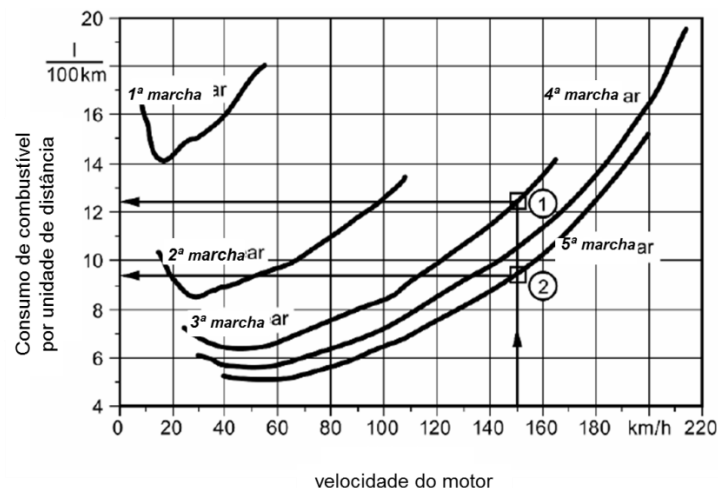


Fonte: (NAUNHEIMER, *et al.* 2011)

1. Relação de marcha

No que diz respeito a relação de marcha, quanto maior o seu valor, maior é o torque de saída, porém, em geral o consumo de combustível é prejudicado, conforme mostra a Figura 17. Portanto para aumentar a eficiência energética de um veículo deve-se buscar trabalhar com relações de marchas menores, buscando um arranjo que forneça uma configuração econômica, mas sem violar as exigências de desempenho estabelecidas no projeto (COIMBRA, 2011).

Figura 17: Relação de marcha × consumo de combustível



Fonte: (NAUNHEIMER, *et al.* 2011)

A redução da relação de marcha pode reduzir o consumo de combustível, afirma (COIMBRA, 2011). Porém a definição das marchas deve sempre levar em conta o motor que irá trabalhar em conjunto, com todas as suas particularidades, pois nem sempre uma redução na

relação de marcha proporciona o melhor resultado em termos de consumo e simultaneamente em desempenho e conforto (OLIVEIRA, 2011).

2. Óleos com baixa viscosidade

Os lubrificantes são utilizados nos veículos principalmente nos motores e sistema de transmissão para reduzir o atrito, melhorando a eficiência na transmissão do movimento, além de evitar danos aos componentes devido ao atrito e ainda auxilia no controle de temperatura, absorvendo calor (CAMARA, PERES e CHRISITANINI, 2010).

Uma das propriedades mais importante de óleos lubrificante é a sua viscosidade, que é a resistência que um fluido apresenta de se deformar continuamente quando submetido à uma tensão de cisalhamento, quanto maior a viscosidade de um fluido mais difícil é de movê-lo e de bombeá-lo (FOX, PRITCHARD e MCDONALD, 2013).

Ao utilizar óleos com menor viscosidade na transmissão, dois benefícios são obtidos diretamente, menor energia no bombeamento do óleo e menor perda por atrito na transmissão do movimento entre as engrenagens, esses benefícios se refletem no consumo de combustível (OLIVEIRA, 2011).

Os óleos lubrificantes automotivos podem ser classificados quanto a sua origem em minerais, sintéticos e semissintéticos, apresentando diferentes viscosidades e durabilidade. Os óleos sintéticos são menos viscosos, em razão disso são preferíveis aos minerais, porém eles são consideravelmente mais caros (CAMARA, PERES e CHRISITANINI, 2010) e (FREITAS, *et al.* 2014)

Os óleos sintéticos são também denominados óleos de baixo atrito, sendo que sua utilização nas transmissões automotivas pode trazer benefícios no consumo de combustível por reduzir as perdas de energia na transmissão e a energia gasta no bombeamento, que culmina em menor carga sobre o alternador do veículo colaborando com a redução de consumo.

3. Indicador de troca de marcha

A troca de marcha é outro fator que influencia no consumo e desempenho do motor. Em geral os pontos de trocas são estabelecidos pelos fabricantes baseado nas curvas de torque e rotação do motor. Nos veículos com câmbio automático, automatizado e continuamente variável, a troca é feita sem interferência do condutor, sendo estabelecida pela calibração inserida na central de controle do veículo, portanto, nestes veículos espera-se que as trocas de marcha sejam sempre feitas no momento ideal para cada condição de carga e rotação do motor.

Nos veículos com câmbio manual, contudo, a troca de marcha é feita pelo condutor, podendo ser executada a qualquer instante, os pontos de trocas são geralmente informados no manual do veículo, contudo existem dois aspectos que podem elevar o consumo de combustível com relação ao modo de direção do motorista. O primeiro é que o condutor pode não trocar a marcha nos pontos informados nos manuais, demorando mais que o recomendado para trocar a marcha, que é a pior situação, conhecida popularmente como “esticar a marcha”. O outro aspecto é que os pontos de trocas são fixos, definidos para atender o ciclo de homologação do veículo. Contudo, as variações de solicitação de carga do motor por meio do pedal do acelerador permite trocar as marchas em diferentes rotações de forma a otimizar o consumo de combustível, em outras palavras, para cada nível de carga do pedal existe um ponto ótimo de troca para redução de consumo de combustível, contudo, no manual esse conjunto de informações precisam ser facilmente compreendidas, portanto adota-se os valores especificados na homologação, que não são necessariamente os melhores para consumo de combustível, mas são necessários para cumprir o ciclo estabelecido por norma.

Uma forma de reduzir tais problemas é utilizando um sistema de indicação de troca de marcha conhecido como GSI (do inglês *Gear Shift Indicator*), que consiste em um dispositivo que informa ao condutor por meio de sinal visual no painel do veículo o momento ideal para troca de marcha levando em conta as condições de demanda de carga do motor, o GSI funciona conforme um mapa de troca de marcha que leva em conta o giro do motor e a solicitação de pedal. O condutor que segue a instrução do GSI consegue ter melhor aproveitamento de cada marcha reduzindo o consumo de combustível (ANDRADE, 2012).

O GSI também é uma tecnologia que está inserida na Portaria n. 397 de 2015 recebendo créditos de consumo energético para os veículos que detém a tecnologia (MDIC, 2015).

III. Sistema de partida e parada automático

O sistema de parada e partida automático do motor, mais conhecido pelo termo inglês *Start Stop* tem por objetivo economizar o combustível desperdiçado pelo funcionamento do motor enquanto o veículo está parado, em sinais de trânsito e congestionamento, isso é feito por meio do desligamento do motor durante o período em que o veículo permanece parado e religando-o novamente quando o condutor acelera o veículo. Esse processo é feito de forma automática, sendo controlado pelos parâmetros inserido na calibração da central de controle (VERZIMIASSI, 2012) e (SILVA, *et al.* 2014).

A principal vantagem do *Start stop* do ponto de vista das montadoras é o fato do sistema auxiliar no aumento de eficiência energética dos veículos, que é importante para atender as metas estabelecidas por programas como o INOVAR-AUTO. Para os consumidores a economia de combustível resulta em menor custo com abastecimento e para a sociedade de modo geral contribui com a redução das emissões de gases poluentes (VERZIMIASSI, 2012).

Todavia, o *Start stop* requer algumas exigências para funcionar, como um sistema de cargas robusto em relação aos veículos sem a tecnologia, pois ao religar o motor surgem picos de demanda de energia. A bateria deve ter carga suficiente para religar o motor quando ele for desligado durante uma parada, caso contrário a central de controle não permite o desligamento do motor, isso depende do monitoramento do estado de carga (SOC, do inglês *State of charged*). De tal modo é importante que o alternador seja eficiente para recarregar a bateria durante o uso do veículo e o estado de carga da bateria deve ser monitorado constantemente, pois este é um parâmetro que habilita a ação do *Start stop*, esse processo pode ser denominado como prognóstico da tensão de arranque (MARQUES, 2009), (VERZIMIASSI, 2012) e (SILVA, 2013).

O percentual de economia de combustível pela atuação do *Start stop* é sensível ao ciclo de condução, pois quanto maior o número de paradas e a duração da parada, maior é a economia de combustível, desta forma o sistema é mais eficiente em regiões urbanas como São Paulo, Rio de Janeiro e Belo Horizonte, pesquisadores afirma que o efeito no consumo de combustível pode chegar à 20 % (SILVA, 2013) e (VERZIMIASSI, 2012).

Os veículos equipados com *Start stop* também recebem o benefício dos créditos de consumo energético segundo o MDIC (MDIC, 2015).

IV. Alternador de alta eficiência e alternador inteligente

Quanto maior a quantidade de energia fornecida pelo alternador, maior é o consumo de combustível do motor, além de prejudicar o consumo, o alternador também pode limitar o desempenho do veículo, pois rouba uma porção da potência disponibilizada pelo motor. Com objetivo de reduzir a quantidade de combustível utilizada para gerar energia elétrica equipamentos mais eficientes foram desenvolvidos como os alternadores de alta eficiência e alternador com gestão inteligente de carregamento (PASQUINI, PENACHIN e LANDGRAF, 2009).

A eficiência do alternador é dada pela razão entre a energia gerada pelo alternador e a energia fornecida pelo motor. No processo de conversão existem três tipos de perdas de energia:

mecânica, elétricas e magnéticas, as perdas mecânicas são devidas ao atrito dos rolamentos, coletores e eletrovetiladores. As perdas elétricas ocorrem nas pontes retificadoras, diodo, resistências, bobinas, estator. Enquanto as perdas magnéticas se devem à corrente de Foucault e histerese (PASQUINI, PENACHIN e LANDGRAF, 2009).

Segundo Pasquini, Penachin e Landgraf (2009) a BOSCH desenvolveu um alternador de alta eficiência com redução das perdas magnéticas, que teria sua eficiência aumentada em 5 %, resultando em uma redução de consumo que pode chegar até 1,3 % no ciclo de consumo NEDC.

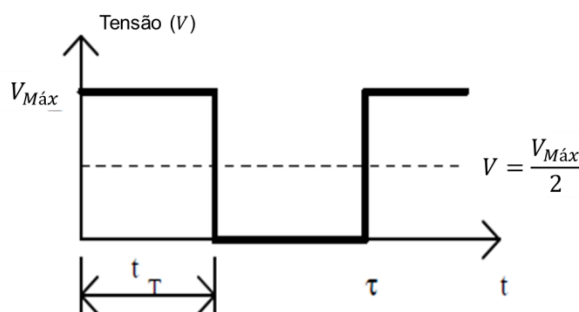
Outra inovação tecnológica é conhecida como alternador inteligente ou alternador LIN (do inglês *Local Interconnect Network*), este alternador possui uma lógica de funcionamento otimizada para drenar menos energia do motor. O funcionamento consiste em uma comunicação entre o alternador e a bateria através de comunicação LIN e monitoramento do SOC pelo sensor de bateria inteligente IBS (do inglês *Intelligent Battery Sensor*), o nível do SOC comanda o acoplamento do alternador. Se o SOC está abaixo do valor especificado pela calibração do sistema, o alternador será acoplado para carregar a bateria, caso contrário o alternador não é acoplado, evitando o envio de energia desnecessário para a bateria, com exceção dos momentos de frenagem, em que o alternador é posto em máximo funcionamento para enviar e acumular energia extra na bateria, num processo regenerativo da energia que é dissipada na frenagem do veículo. Outro aspecto relevante é que nas acelerações do veículo o alternador é programado para aliviar a carga sobre o motor com a finalidade de melhorar o seu desempenho, sendo acoplado apenas quando a bateria estiver em um nível de carga próximo do limite inferior permitido (PASQUINI, PENACHIN e LANDGRAF, 2009) e (GUIMARÃES, 2017).

V. Modulação por largura de Pulso - PWM

O controle feito com modulação de largura de pulso (PWM, do inglês *Pulse Width Modulation*) é uma forma de obter respostas analógicas por meio de sinal digital através de ondas quadrada, chamadas de pulso. Em geral, em circuitos elétricos, fontes alimentadoras de equipamentos possui uma chave que pode está aberta (desligada – *OFF*) ou fechada (ligada-*ON*), de forma que o componente a ser alimentado estará energizado com a tensão de alimentação ou não energizado, porém para fornecer um valor intermediário de tensão entre o zero e o valor da fonte de alimentação, pode-se utilizar um Modulador de largura de pulso ou PWM. A Figura 18 auxilia a entender como eles funcionam. O PWM possui frequência

constante com período τ , o tempo que a chave permanece fechada é chamado de ciclo de trabalho ou *duty cycle* (t_T), a tensão de saída é controlada pela modulação do ciclo de trabalho, ou seja, o percentual de *duty cycle* (que a chave permanece ligada), portanto se é desejado que seja fornecido apenas metade da tensão máxima disponível ($V_{Máx}$) deve-se utilizar *duty cycle* 50%, de forma que a chave estará ligada em 50 % do período de duração do pulso e em 50 % estará desligada (CENDRON, 2017) e (POMILIO, 2014).

Figura 18: Formato do pulso (onda quadrada) típica do PWM



Fonte: Adaptada de (POMILIO, 2014)

Os controladores PWM são dispositivos que permitem controlar com boa precisão a corrente que é enviada à algum equipamento. A aplicação de controladores PWM se mostrou interessante no setor automotivo por permitir um controle com redução de perdas de energia elétrica que ocorre em alguns componentes, como a bomba de combustível (do sistema de alimentação), eletro-ventilador (do sistema de arrefecimento) e outros componentes elétrico (NULLE, 2015).

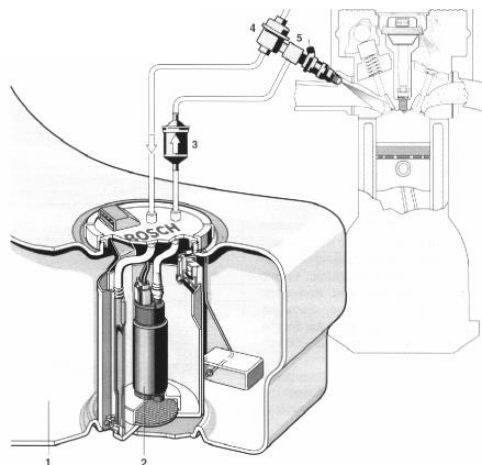
1. Bomba de combustível

A bomba é o componente do sistema de alimentação de combustível responsável por fornecer energia suficiente para injetar combustível à pressão adequada nos cilindros do motor. Nos veículos com injeção eletrônica a bomba é alimentada eletricamente pela bateria e alternado, posicionada no interior do tanque. Além da bomba outros componentes que são importantes para o correto deslocamento do combustível são: tanque (1), filtro (3), regulador de pressão (4) e injetor (5), conforme pode ser observado na Figura 19 (BOSCH, 2011).

O funcionamento da bomba consome uma parcela de energia elétrica oriunda da bateria e alternado, que resulta em aumento de consumo de combustível. As bombas convencionais recebem alimentação elétrica continuamente, mantendo a pressão da linha de combustível acima da necessária para garantir que a pressão nos eletro injetores não fique abaixo do

especificado, porém quando a pressão torna-se maior que o especificado uma válvula direciona o combustível de volta para o tanque, logo tem-se constantes desperdícios de energia para bombear combustível que será retornado para o tanque. Portanto parte da energia gasta no bombeamento é simplesmente descartada.

Figura 19: Sistema de alimentação de combustível



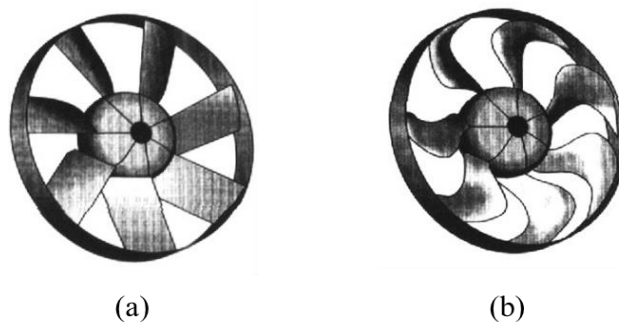
Fonte: (ROVAI, 2005)

A modulação por largura de pulso pode ser usada para controlar a alimentação de energia elétrica da bomba de combustível, de forma que o PWM mantém a alimentação da bomba de acordo com a necessidade, para que a pressão seja mantida dentro de limites especificados próximo a pressão de trabalho dos eletro injetores, não havendo retorno de combustível para o tanque. Logo a energia desperdiçada nos sistemas com alimentação contínua da bomba é reduzida com uso do PWM.

2. Eletro-ventilador

Os eletros-ventiladores são usados nos veículos para compor o sistema de arrefecimento do motor, sua função principal é aumentar a troca de calor no radiador, que por sua vez deve resfriar o fluido de arrefecimento do motor, pelo aumento de vazão de ar sobre o radiador provocando troca de calor por convecção forçada, principalmente em baixa velocidade. Os eletro-ventiladores automotivos geralmente são axiais, suas hélices podem ser retas ou com forma otimizada para melhorar a eficiência, Figura 20 (QUIM, 2007).

Figura 20: Eletro-ventilador automotivo: (a) hélices retas; (b) hélice otimizada



Fonte: (QUIM, 2007)

O eletro-ventilador é um componente alimentado pelo sistema elétrico, o seu funcionamento representa uma parcela da demanda de energia elétrica que influenciará na energia absorvida pelo alternador, afetando o consumo de combustível. O uso de controladores PWM em substituição ao controle por resistor, que possui pontos de operação de velocidades fixados, chamados *On/Off*, permite reduzir o consumo de energia elétrica e consequentemente o consumo de combustível, pois a velocidade do eletro-ventilador varia de acordo com a demanda de arrefecimento, podendo operar em diversas intervalos de velocidades fixados no eletro-ventiladores *On/Off*.

VI. Direção elétrica

Sistemas de direção assistida reduzem o esforço do condutor no esterçamento das rodas ao manobrar o veículo. Os primeiros sistemas de direção popularizados foi a direção hidráulica, estes sistemas possui um mecanismo de direção acionado hidraulicamente, tendo portando uma bomba responsável por fornecer energia ao fluido hidráulico, o processo de bombeamento aumenta o consumo de combustível, porém a direção assistida se tornou um atrativo interessante nas vendas de veículos na atualidade, sendo desejada por parte dos condutores. Uma forma de reduzir o consumo de combustível mantendo o conforto da direção assistida é por meio de um sistema de acionamento elétrico da direção, pois boa partes da energia gasta na direção hidráulica provêm do bombeamento do fluido. Na direção elétrica o acionamento do mecanismo de direção é controlado por circuito elétrico, tendo também a vantagem de apenas usar energia quando requisitado o que não ocorre na direção hidráulica (NACIF, 2014).

2.5 Estado da Arte

Como foram abordados nas seções anteriores avanços importantes foram alcançados ao longo dos anos na área de eficiência energética automotiva, principalmente na última década, a seguir são destacados os principais trabalhos encontrados da área.

Pasquini, Penachin e Landgraf (2009) publicaram um estudo sobre os alternadores de alta eficiência com redução de perdas magnéticas, no qual afirmam que o aumento de eficiência do alternador em 5% pode resultar em redução de consumo em até 1,3% no ciclo europeu NEDC. A pesquisa mostra o benefício da melhoria no aço de fabricação do estator reduzindo a perda magnética, que gerou aumento de eficiência do alternador em 3%.

Almeida, Soares e Reis (2010) publicaram sobre o fracionamento das forças resistivas que são captadas no teste de *coast down*. No estudo foram determinadas as perdas de potência resistiva dos pneus, aerodinâmica, transmissão e residual de freio, em um ensaio denominado *coast down* fracionado, concluindo que os maiores contribuintes para as forças resistivas são os pneus (resistência ao rolamento) e o arrasto aerodinâmico, recomendando que melhorias deveriam ser feitas no futuro no sentido de reduzir estas duas forças.

Fonseca, Casanova e Valés (2011) realizaram experimentos em pista na Espanha com veículos em região urbana, no qual mostraram as emissões de CO₂ de um veículo equipado com *Start stop*, nos quais foi observada redução média de emissões de CO₂ em torno de 12 %, que está diretamente ligado ao consumo de combustível.

Oliveira (2011) fez um estudo avaliando o efeito da relação de marcha em sistema de transmissão automatizado no consumo de combustível, emissões e conforto, utilizando análise numérica para propor novas relações, obtendo redução de consumo em torno de 3% no ciclo estrada utilizado no Brasil.

Coimbra (2011) avaliou os efeitos da resistência ao rolamento, resistência aerodinâmica, da massa e também as relações de marcha no consumo de combustível e desempenho de veículos automotores via simulação computacional. Seus resultados apontam redução de 3% no consumo para redução de 14% no arrasto aerodinâmico, 4,2 % para o mesmo percentual de redução de massa (14%), já para resistência ao rolamento reduções em torno de 35% resultaram em melhoria de 5,4% no consumo. A relação de transmissão foi reduzida em 14%, porém o efeito em cada uma das 5 marchas proporcionou diferentes percentuais de redução em consumo, sendo o efeito global de 5,4%. Apesar de ter analisado 4 fatores que afetam o consumo de combustível, eles foram analisados isoladamente, sem estudar as combinações entre os fatores.

Rosilho (2013) apresentou um estudo via simulação computacional sobre a substituição dos espelhos retrovisores externos automotivos por um sistema de câmeras para reduzir as perdas de energia devido à resistência aerodinâmica. Foi observado uma redução de área frontal de 2,255% e de coeficiente de penetração aerodinâmica de 0,901%, que resultaram em 1,16% de redução de consumo, os resultados são foram obtidos para o ciclo de condução estrada normatizado no Brasil com o combustível E22.

Barbosa (2013) publicou uma pesquisa sobre “pneus verdes”, como foram inicialmente chamados os pneus de baixa resistência ao rolamento no Brasil com adição de sílica na composição da borracha. No estudo Barbosa (2013) apresentou uma pesquisa de mercado mostrando pneus de diferentes fabricantes disponíveis com a proposta de redução de consumo.

Nacif (2014) analisou o impacto da direção elétrica versus hidráulica no consumo de combustível automotivo, mostrando que os sistemas elétricos consomem menos combustível que os sistemas hidráulicos.

Silva *et al* (2016) desenvolveu um trabalho de melhoramento do índice de viscosidade de óleos lubrificantes automotivos, com o objetivo de reduzir a variação da viscosidade com a temperatura. O que torna a eficiência da transmissão menos suscetível a variações.

Lopes, *et al.* (2017a) discorre sobre o uso de sílica nos pneus automotivos com obtivo na redução de consumo de combustível. Apontando a importância da adesão de pneus de baixa resistência ao rolamento, pois o investimento nesses pneus, que são a princípio mais caros retorna para as montadoras como forma de atingir metas de eficiência energéticas e para o consumidor com menos gastos com abastecimento.

Jalles (2017) apresenta um estudo comparando a classificação de eficiência energética de pneus no mercado de pós-venda com os a classificação dos pneus no desenvolvimento de projeto automotivo, mostrando que ao substituir pneus originais de um veículo, que atualmente possuem classificações energéticas melhores (A, B e C) por pneus de reposição com classificações energéticas piores (como E, F e G) o consumidor pode ter um aumento considerável de consumo, que pode chegar à 6%, mostrando que no longo prazo, uma escolha de pneu a princípio mais barata pode gerar maiores custos para o consumidor.

Lopes, *et al.* (2017b) fez uma revisão sobre os benefícios do sistema *Start stop* para as montadoras, o condutor e para o meio ambiente. No qual conclui que esta tecnologia se mostra útil para o condutor que trafega em regiões urbanas com tráfego de veículos intenso, como na cidade de São Paulo, podendo a chegar à 20% de economia de combustível dependendo o perfil

de condução, quanto mais paradas e maior o tempo de parada mais vantajoso o *Start stop* se torna.

Guimarães (2017) realizou um estudo com o alternador inteligente (LIN) e alternador de alta eficiência (HEG), no qual foi observada redução de consumo de 3,6 % em ciclo urbano e de 2,22 % no ciclo combinado com o alternador inteligente em relação ao de alta eficiência HEG.

Monteiro (2017) analisou o efeito no consumo de combustível com a utilização de um alternador com desacoplamento mecânico em veículos automotivos. Em seu trabalho Monteiro mediu reduções de consumo de 3,09% no ciclo de condução urbana e 2,33% no ciclo estrada, resultando em 2,81% no consumo combinado dos dois ciclos.

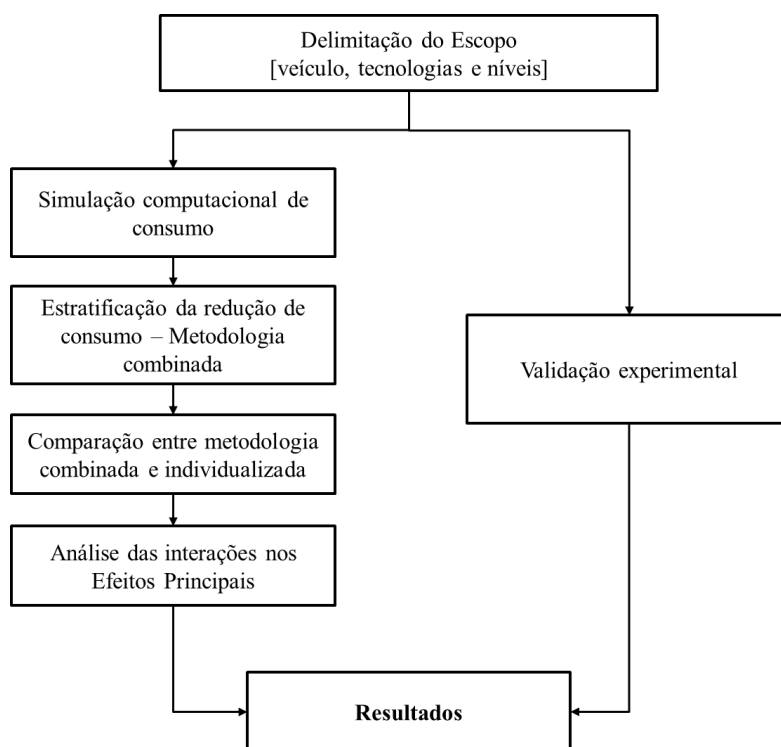
Lopes, *et al.* (2017c) apresentou uma análise do aumento de eficiência energética da frota de veículos leves no Brasil nos últimos 8 anos, com dados declarados pelas fabricantes de veículos ao Programa Brasileiro de Etiquetagem Veicular. Sua análise apontou aumento de eficiência média de 3% nos veículos brasileiros, mas houveram segmentos de veículos que apresentaram maior variação de eficiência, como os veículos esportivos.

Conforme a revisão apresentada pode-se perceber avanços significativos em relação à Eficiência energética e às tecnologias de eficiência energética aplicadas aos veículos automotores. Contudo, estudos relacionados às interações que podem existir entre diferentes tecnologias não foram encontrados até o presente momento. Utilizar as ferramentas estatísticas para analisar as tecnologias de eficiência energéticas e as possíveis interações, pode ser uma boa prática para melhorar análises quantitativas de forma a reduzir o erro envolvido no estudo de consumo dentro do projeto de um veículo automotor.

CAPÍTULO 3 - METODOLOGIA

A metodologia é apresentada em 6 etapas conforme o fluxograma da Figura 27. Inicialmente foi delimitado o escopo de trabalho, no qual foi definido o veículo analisado, as tecnologias de eficiência energética e a definição do tipo de planejamento fatorial aplicado. Após definidos os tratamentos a serem executados foram realizadas as simulações computacionais de consumo de combustível. Com os dados de saída da simulação foram aplicadas as ferramentas estatísticas de análise de efeitos e interações, que foi denominada neste contexto de *Metodologia combinada*. Posteriormente fez-se a comparação entre esta metodologia e uma outra metodologia de análise que não considera interações, chamada de *Metodologia individualizada*. Por fim julgou-se necessário analisar os efeitos principais com relação às interações. A última seção deste capítulo trata da validação experimental das simulações.

Figura 21: Fluxograma da metodologia



Fonte: Elaborada pela Autora

A seguir, antes de abordar a delimitação do escopo, serão apresentadas as ferramentas utilizadas neste trabalho por meio de alguns exemplos, na sequência são descritas as etapas da metodologia apresentadas na Figura 27.

3.1 Ferramentas estatísticas de análise de interações entre fatores

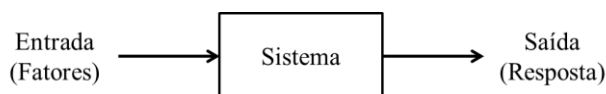
A estatística experimental lança mão de várias ferramentas e metodologias para analisar uma variável em função de outros fatores. Algumas ferramentas se mostram bastante úteis para quantificar variações de consumo de combustível resultantes de combinações de tecnologias de eficiência energéticas em projetos automotivos como o planejamento experimental ou DoE (do inglês, *Design of Experiment*). DoE reúne uma gama de possibilidades de estudos para diferentes tipos de aplicações. Nesta seção serão apresentados o planejamento de experimentos e como calcular os efeitos provocados pelas tecnologias.

3.1.1 Planejamento de experimentos

Planejamento de experimentos (DoE) é uma área da estatística experimental que trabalha com um conjunto de ferramentas que podem ser usadas na análise de efeitos que um fator ou variável tem sobre um fenômeno ou grandeza de interesse. Apesar do nome planejamento experimental, a metodologia estatística pode ser usada em outras situações, como controle de processos e de qualidade, como ferramenta investigativa de relações entre variáveis (GOMES, 2007).

O intuito básico de se utilizar um planejamento experimental é investigar a relação que pode haver entre duas ou mais variáveis ou grandezas em um sistema (ou processo) em que se tem uma ou mais variáveis de entradas e uma variável de saída, conforme a Figura 21. Em estudos desta natureza geralmente deseja-se saber como a resposta ou saída do sistema se comporta com alterações controladas das entradas, pois a saída do sistema não é controlada diretamente, mas pode ser manipulada por meio do controle das entradas, desde que se conheça a relação que existe entre as entradas e saída do sistema. A entrada (ou fatores) do sistema pode ser grandezas possíveis de serem avaliadas quantitativamente ou qualitativamente, enquanto a saída geralmente é medida quantitativamente, sendo também chamada de resposta do sistema ou variáveis de saída (BARROS NETO, SCARMINIO e BRUNS, 2001).

Figura 22: Fluxo entre entrada e saída de um sistema



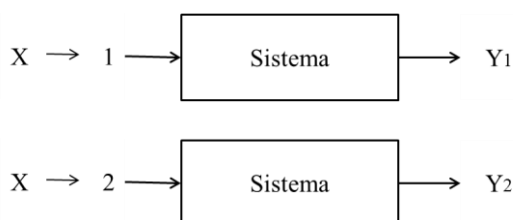
Fonte: Elaborado pela Autora

Para avaliar o efeito de um fator sobre a saída do sistema parti-se do princípio básico de provocar uma variação da entrada e observar a alteração da saída, mantendo constante todos os

demais fatores que não são de interesse conhecer o seu efeito. Efeito é conceituado como a variação da saída do sistema devida a variação provocada na entrada, ou mais especificamente, o efeito de um fator é o valor que a saída apresenta quando este fator é alterado (MONTGOMERY, 2004).

De forma simplificada o efeito de um fator X é a variação da resposta Y , quando X muda de um nível 1 para um nível 2, conforme ilustra a Figura 22, o efeito é calculado pela Equação (14).

Figura 23: Fluxo entre entrada e saída de um sistema com 1 fator e 2 níveis



Fonte: Elaborada pela Autora

$$\text{Efeito de } X: \quad E = Y_2 - Y_1 \quad (14)$$

A Figura 22 e Equação (14) mostram a simplicidade de um experimento com 1 fator e 2 níveis, nível é cada condição que os fatores podem assumir, o experimento descrito acima é o mais simples que existe, todavia conforme o número de fatores e níveis aumentam o efeito passa a ser calculado de forma diferente, assumindo um valor médio da variação da resposta (BARROS NETO, SCARMINIO e BRUNS, 2001).

Para analisar fatores é necessário adotar um tipo de planejamento experimental, cada tipo estabelece como serão conduzidos os teste, em outras palavras, a configuração dos fatores em cada teste a ser realizado. Existem vários tipos de experimentos, como os fatoriais, Box-Behnken, hipercubo-latino, entre outros, porém os mais populares são os fatoriais, pela simplicidade e também por fornecerem resultados que são importantes em início de pesquisa, as demais alternativas de planejamento podem ser aplicadas em etapas avançadas de pesquisas posteriormente, depois que de fato é indentificado que um fator tem efeito significativo sobre a saída do sistema de interesse (BARROS NETO, SCARMINIO e BRUNS, 2001).

3.1.2 Experimento fatorial completo

O planejamento fatorial envolve o estudo com mais de um fator, ou seja, há mais de uma variável de interesse que pode influenciar a resposta. Existem basicamente dois tipos de planejamentos fatoriais, o fatorial completo, no qual são utilizadas todas as combinações de

todos os níveis de cada fator e o fatorial fracionado, em que apenas uma parte de combinações são executadas, o último tipo é geralmente adotado quando o número de combinações se torna elevado a ponto de inviabilizar a execução de todas as combinações. Contudo para avaliar todos os efeitos e as interações é necessário utilizar o fatorial completo (BARROS NETO, SCARMINIO e BRUNS, 2001).

Experimentos fatoriais consistem em montar um conjunto de testes com todas possíveis combinações entre os fatores e níveis. Supondo que um estudo englobe 2 fatores (**A** e **B**), em que **A** deve ser avaliado em 2 níveis (-1 e +1), mas **B** possui 3 níveis (-1, 0 e +1). O número de combinações de um fatorial completo (n_T) é dado pela Equação (15) (MONTGOMERY, 2004).

$$n_T = n_A \times n_B \quad (15)$$

Portanto, existem 6 combinações possíveis ($n_T = 2 \times 3 = 6$), tais combinações são apresentadas na Tabela 2, que é chamada de Matriz de planejamento, cada linha da matriz é uma combinação, que também é denominada tratamento, a primeira coluna indica a ordem de tratamentos e nas demais colunas estão o nível dos fatores em cada tratamento (BARROS NETO, SCARMINIO e BRUNS, 2001).

Tabela 2: Matriz de planejamento de um fatorial completo com 2 fatores

Tratamento	A	B
1	-1	-1
2	-1	0
3	-1	+1
4	+1	-1
5	+1	0
6	+1	+1

Fonte: Elaborada pela Autora

Como pode ser observado na Tabela 2, no fatorial completo todos os níveis de um fator são testados com todos os níveis do outro fator, ou seja, nos tratamentos 1, 2 e 3 o fator **A** assume o nível -1, enquanto **B** é avaliado nos 3 níveis possíveis, nos tratamentos seguintes 4, 5 e 6, a sequência de **B** é repetida, mas com **A** no nível +1.

Os planejamentos fatoriais podem envolver vários fatores, com vários níveis, à medida que o número de níveis e fatores aumenta a complexidade do problema cresce consideravelmente. Existe um tipo de planejamento em que o número de níveis é igual para todos os fatores. Os fatoriais desse tipo de 2 níveis são os mais simples, contudo, muito úteis, pois permitem identificar relações entre variáveis com a menor quantidade de tratamentos,

sendo geralmente adotado em estudos iniciais, uma vez que em uma pesquisa embrionária é desconhecido se existe de fato relação entre a resposta do sistema e os fatores objeto de estudo. Com os fatoriais de 2 níveis é possível identificar se existe ou não efeito significativo dos fatores na saída do sistema, se nenhuma relação é encontrada, não é necessário aplicar outro tipo de método mais complexo, mas uma vez constado relação ou dependência entre uma variável de entrada e saída pode-se partir para outro planejamento que identifique o tipo de relação, pois com dois níveis a relação encontrada é sempre linear. Este tipo de fatorial é representado pela Equação (16), em que m é o número de tratamento e k é o número de fatores, o 2 se deve ao número de níveis (BARROS NETO, SCARMINIO e BRUNS, 2001) e (MONTGOMERY, 2004).

$$m = 2^k \quad (16)$$

3.1.3 Efeito principal

Como definido anteriormente efeito é a variação da resposta como consequência de variações controladas da entrada, contudo, quando se considera mais de um fator, o efeito na verdade é um cálculo de médias, podendo ser agrupado em efeitos principais e efeitos das interações. O efeito principal é o efeito médio de cada fator na resposta e efeito das interações é o efeito obtido das combinações de fatores, que pode ser de 2ª ordem com combinações de 2 fatores, de 3ª ordem com combinações de 3 fatores e assim sucessivamente. Um exemplo pode auxiliar a entender melhor o conceito de efeito principal (BARROS NETO, SCARMINIO e BRUNS, 2001).

Um planejamento de 2 fatores (F1 e F2) e 2 níveis (-1 e +1) é apresentado na Tabela 3, juntamente com as respostas obtidas após execução de testes.

Tabela 3: Matriz de planejamento - 2^k

Tratamento	F1	F2	Resposta
1	-1	-1	10
2	-1	+1	20
3	+1	-1	40
4	+1	+1	60

Fonte: Elaborada pela Autora

O conceito inicial de efeito foi dado pela Equação (14), considerando os resultados da Tabela 3, pode-se calcular o efeito de F2 pela diferença entre o tratamento 1 e 2, e entre o tratamento 3 e 4, pois entre 1 e 2 apenas F2 sofre variação de nível, enquanto F1 permanece

constante no nível -1, entre 3 e 4 novamente F2 varia de -1 para +1, enquanto F1 continua constante, porém no nível +1.

Contudo, observe que efeito de F2 entre 1 e 2 é 10 unidades, enquanto o efeito entre 3 e 4 são 20 unidades, Equações (17) e (18). A Figura 23 mostra o comportamento de F1 e F2.

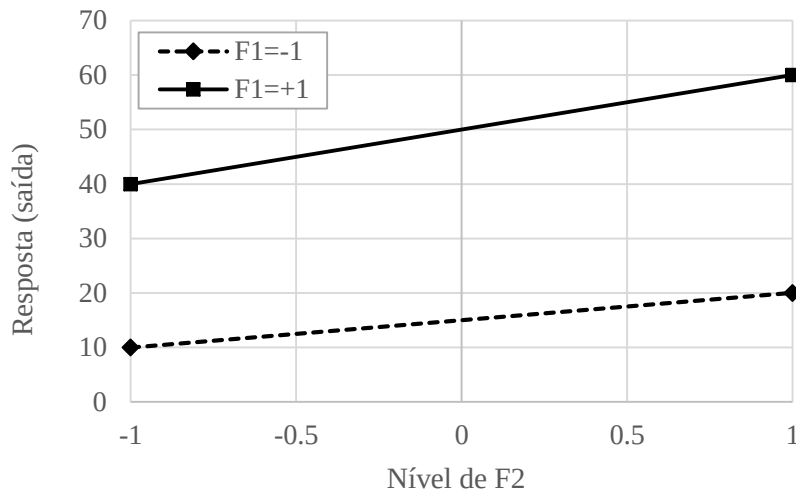
$$E_{F2 F1^-} = R_2 - R_1 \quad (17)$$

$$E_{F2 F1^-} = 20 - 10 = 10$$

$$E_{F2 F1^+} = R_4 - R_3 \quad (18)$$

$$E_{F2 F1^+} = 60 - 40 = 20$$

Figura 24: Efeito da resposta com interação



Fonte: Elaborada pela Autora

O efeito de F2 muda de acordo com o nível de F1, Figura 23, ao mudar o nível de F1 o efeito de F2 passa de 10 para 20 unidades, portanto existe interações entre os dois fatores. A interação entre fatores ocorre quando a variação na resposta, devido a um fator depender do nível de outro fator.

A interação entre fatores pode ser positiva (amplificação da resposta) ou negativa (redução na resposta). No exemplo abordado observa-se que a interação amplifica a resposta conforme a Figura 23, logo é uma interação positiva (BARROS NETO, SCARMINIO e BRUNS, 2001).

Portanto, a Equação (14) não é suficiente para calcular os efeitos, em vez disso, é necessário adicionar termos que representem as interações existentes, que será abordado no próximo item. O efeito de um fator não pode ser estimado pela simples diferença entre dois tratamentos, quando se tem mais de uma variável envolvida. Sendo necessário calcular os

efeitos com todos os tratamentos existentes. O efeito de F2 pode então ser obtido pela média entre os efeitos calculados em cada nível de F1, Equação (19) (BARROS NETO, SCARMINIO e BRUNS, 2001).

$$E_{F2} = \frac{E_{F2 F1^-} + E_{F2 F1^+}}{2} \quad (19)$$

$$E_{F2} = \frac{10 + 20}{2} = 15$$

O efeito E_{F2} é chamado de efeito principal, sendo um valor médio do efeito do fator. Reorganizando os termos para calcular o efeito de F2, observa-se que o efeito pode ser calculado pela diferença da média da resposta para cada nível de F2. O Efeito principal de F2 é, portanto, a média dos tratamentos 2 e 4, em que F2 assume o nível +1 menos a média dos tratamentos 1 e 3, em que F2 assume o nível -1, conforme a Equação (20).

$$E_F = \bar{R}_{F^+} - \bar{R}_{F^-} \quad (20)$$

$$E_{F2} = \bar{R}_{F2^+} - \bar{R}_{F1^-}$$

$$E_{F2} = \frac{R_2 + R_4}{2} - \frac{R_1 + R_3}{2}$$

$$E_{F2} = \frac{20 + 60}{2} - \frac{10 + 40}{2} = 15$$

Usando a Equação (20), nota-se que o nível +1 de F1 é a média do tratamento 3 e 4, enquanto do nível -1 é a média do 1 e 2, o efeito principal de F1 é 35.

$$E_{F1} = \frac{R_3 + R_4}{2} - \frac{R_1 + R_2}{2}$$

$$E_{F1} = \frac{40 + 60}{2} - \frac{10 + 20}{2} = 35$$

A Equação (19) e (20) são duas formas de calcular o efeito, a Equação (19) calcula por meio da média dos efeitos, enquanto a Equação (20) calcula pelo efeito da média. Fatoriais com 4 tratamentos podem ser calculados facilmente com as duas equações, porém quando o número de tratamentos aumenta calcular vários efeitos para posteriormente calcular a média se torna menos interessante do ponto de vista operacional, sendo mais conveniente usar a Equação (20).

3.1.4 Efeito das Interações

Para calcular a interação é necessário estabelecer uma coluna com sinais de entrada para completar a matriz de planejamento, conforme Tabela 4. O sinal de entrada da interação **F1_F2** é definido como o produto dos sinais dos fatores envolvidos. No tratamento 1 o sinal da interação entre F1 e F2 é dado por $(-1 \times -1 = +1)$, no tratamento 2 tem-se $(-1 \times +1 = -1)$, no tratamento 3 $(+1 \times -1 = -1)$ e o tratamento 4 $(+1 \times +1 = +1)$.

Tabela 4: Matriz de coeficiente de contrastes

Tratamento	F1	F2	F1_F2	Resposta
1	-1	-1	+1	10
2	-1	+1	-1	20
3	+1	-1	-1	40
4	+1	+1	+1	60

Fonte: Elaborada pela Autora

A Tabela 4 é conhecida como Matriz dos coeficientes de contrastes, ela contém todos os componentes para calcular todos os efeitos (principal e interações) envolvidos. A interação entre F1 e F2 é calculada pela Equação (20), contudo seguindo o sinal da coluna **F1_F2** o nível +1 será a média dos tratamentos 1 e 4, e o nível -1 dos tratamentos 2 e 3, logo o efeito da interação é 5 unidades.

$$\bar{R}_{(F1_F2)^+} = \frac{R_1 + R_4}{2}$$

$$\bar{R}_{(F1_F2)^+} = \frac{10 + 60}{2} = 35$$

$$\bar{R}_{(F1_F2)^-} = \frac{R_2 + R_3}{2}$$

$$\bar{R}_{(F1_F2)^-} = \frac{20 + 40}{2} = 30$$

$$E_{F1_F2} = \bar{R}_{(F1_F2)^+} - \bar{R}_{(F1_F2)^-}$$

$$E_{F1_F2} = 35 - 30 = 5$$

A interação entre F1 e F2 tem valor de 5 unidades. 5 é o efeito da interação F1_F2, que é de 2ª ordem positiva. A partir deste método pode-se ampliar o número de fatores, ao considerar mais um fator (F3), o número de testes duplica, são necessário 8 tratamentos (2^3), haverá 3 efeitos principais, 3 interações de 2ª ordem e 1 interação de 3ª ordem, o sinal da interação de 3ª ordem pode ser obtido pelo produto dos sinais de uma das interações de 2ª ordem

com um fator formando então o sinal da interação **F1_F2_F3**, observe na Tabela 5, que o sinal da coluna **F1_F2_F3** pode ser obtido pelo produto de F1 e F2_F3, ou F2 e F1_F3, ou F3 e F1_F2.

Tabela 5: Matriz de coeficientes de contrastes - 2³

Tratamento	F1	F2	F3	F1_F2	F1_F3	F2_F3	F1_F2_F3	Resposta
1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	10
2	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	20
3	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	80
4	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	100
5	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	50
6	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	40
7	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	80
8	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	100

Fonte: Elaborada pela Autora

Aplicando a Equação (20) para calcular F1, F2 e F3, tem-se:

$$E_F = \bar{R}_{F1+} - \bar{R}_{F1-} \quad (20)$$

$$E_{F1} = \frac{R_5 + R_6 + R_7 + R_8}{4} - \frac{R_1 + R_2 + R_3 + R_4}{4} = 15$$

$$E_{F2} = \frac{R_3 + R_4 + R_7 + R_8}{4} - \frac{R_1 + R_2 + R_5 + R_6}{4} = 60$$

$$E_{F3} = \frac{R_2 + R_4 + R_6 + R_8}{4} - \frac{R_1 + R_3 + R_5 + R_7}{4} = 10$$

Observe que para calcular cada efeito são usados os 8 resultados dos testes, mas o cálculo exige que as respostas sejam rearranjadas de acordo com o sinal de entrada de cada fator. Com o mesmo princípio são calculadas as interações de 2ª ordem **F1_F2**, **F1_F3** e **F2_F3**:

$$E_{F1_F2} = \frac{R_1 + R_2 + R_7 + R_8}{4} - \frac{R_3 + R_4 + R_5 + R_6}{4} = -15$$

$$E_{F1_F3} = \frac{R_1 + R_3 + R_6 + R_8}{4} - \frac{R_2 + R_4 + R_5 + R_7}{4} = -5$$

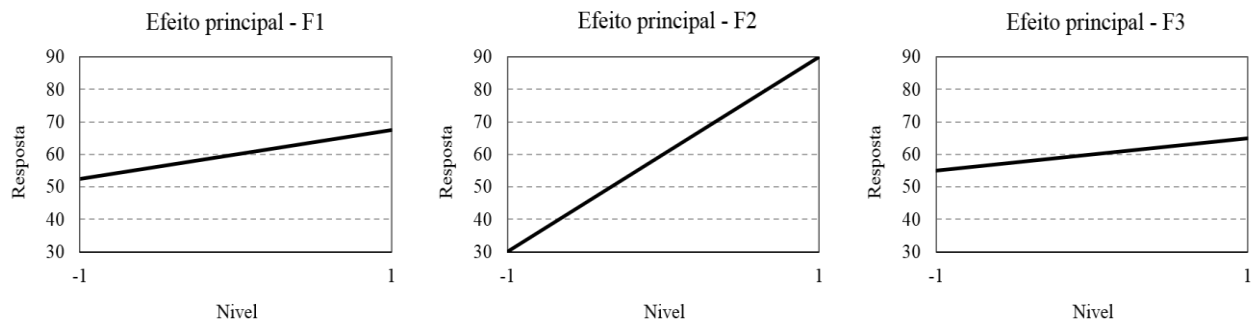
$$E_{F2_F3} = \frac{R_1 + R_4 + R_5 + R_8}{4} - \frac{R_2 + R_3 + R_6 + R_7}{4} = 10$$

E para a interação de 3ª ordem **F1_F2_F3**, tem-se:

$$E_{F1_F2_F3} = \frac{R_2 + R_3 + R_5 + R_8}{4} - \frac{R_1 + R_4 + R_6 + R_7}{4} = 5$$

A Figura 24 mostra os efeitos principais calculados para o exemplo abordado. Na Figura 25 são apresentados os gráficos de efeitos das interações de 2ª ordem e a Figura 26 traz o efeito da interação de 3ª ordem.

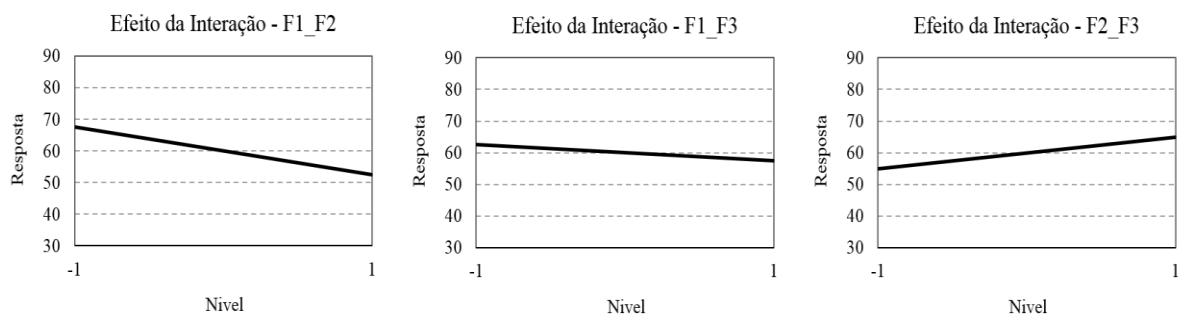
Figura 25: Efeitos principais



Fonte: Elaborada pela Autora

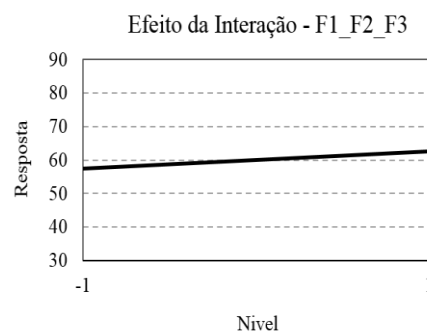
Observe nas Figuras 25 que as interações **F1_F2** e **F1_F3** são negativas, ou seja, elas reduzem o efeito da resposta, enquanto a interação **F2_F3** é positiva, então ela amplifica a resposta, assim como a interação de 3ª ordem **F1_F2_F3**.

Figura 26: Efeitos das interações de 2ª ordem



Fonte: Elaborada pela Autora

Figura 27: Efeitos da interação de 3ª ordem



Fonte: Elaborada pela Autora

3.2 Delimitação do escopo de análise

Foi escolhido um veículo de passeio, que tem algumas tecnologias embarcadas com foco na eficiência energética implementadas em versões mais recentes. O veículo possui motor de combustão interna naturalmente aspirado, com sistema de transmissão manual de 5 marchas. Uma vez definido os veículos de estudo foram identificados 10 fatores (tecnologias) que foram aplicadas com finalidade de redução de consumo.

3.2.1 Fatores e níveis

Cada fator pode assumir duas condições, 2 níveis representados por 0 e 1:

1. Sem tecnologia de eficiência energética = [0];
2. Com tecnologia de eficiência energética = [1].

A Tabela 6 apresenta o resumo da delimitação do escopo e na sequência são detalhadas as variações de cada fator.

Tabela 6: Fatores e níveis dos fatores (tecnologias)

Tecnologias (Fatores)		Nível [0]	Nível [1]	Área de aplicação
1	Motor	Motor 1	Motor 2	Trem de forças
2	Alternador	Alta eficiência	Gestão inteligente	
3	Bomba de combustível (alimentação elétrica)	Convencional (continua)	Controlada por PWM	
4	Óleo de transmissão	Mineral	Sintético	
5	GSI	Ausente	Presente	
6	Start stop	Ausente	Presente	
7	Relação de marcha	100%	94%	Forças de Resistência ao deslocamento
8	Pneu [Resistência rolamento]	100%	94%	
9	Aerodinâmica	100%	94%	
10	Inércia	100%	105%	

Fonte: Elaborada pela Autora

1. O motor [1] apresenta menor consumo em relação ao motor nível [0].
2. O Alternador no nível [0] é de alta eficiência (HEG) e no nível [1] é um alternador com gestão de carregamento inteligente (LIN).
3. A bomba de combustível no nível [0] é alimentada continuamente, enquanto no nível [1] o fornecimento de energia elétrica é controlado por PWM.
4. O óleo de câmbio no nível [0] é um óleo mineral, enquanto no nível [1] o óleo é sintético, apresentando menor viscosidade.
5. O GSI está ausente no nível [0] e presente no nível [1].
6. O Start stop está ausente no nível [0] e presente no nível [1].

7. A relação de marcha foi reduzida no nível [1] em relação ao nível [0]. O nível [0] é considerado como referência assumindo valor simbólico de 100%. As relações de marchas no nível [1] tiveram redução percentual média de 6%, ou seja o nível [1] pode ser considerado como 94% do nível [0].
8. O Pneu no nível [0] é um pneu comum e no nível [1] um pneu de baixa resistência ao rolamento. De forma que a resistência ao rolamento no nível [1] é menor que no nível [0] em torno de 6% considerando o coeficiente F_0 da força resistiva do veículo;
9. O fator aerodinâmica assume 100% no nível [0], com as melhorias aerodinâmicas aplicadas no projeto como apêndices aerodinâmicos o arrasto foi reduzido, considerando o coeficiente F_2 da força resistiva do veículo, houve uma redução de 6% no nível [1];
10. A inércia do veículo por outro lado sofreu aumento. Algumas das tecnologias podem aumentar a massa, contudo, foi observado que no conjunto de tecnologias aplicadas não houve aumento significativo de massa, pois algumas tecnologias agregaram massa e outras reduziram, porém houve aumento de peso devido outros componentes, que resultou em aumento de 5 % no nível [1].

3.2.2 Planejamento experimental (DoE)

Foi utilizado o planejamento fatorial completo para montar o conjunto de tratamentos que foram estudados, como são 10 fatores de 2 níveis, o fatorial representado por (2^{10}) é composto por 1024 tratamentos.

Foi construída a matriz de planejamento, constituída por 1024 linhas e 11 colunas (1ª coluna identifica cada tratamento e as 10 seguintes são referentes aos 10 fatores, cada linha é um tratamento). A Tabela 7 apresenta alguns dos tratamentos/linhas da matriz de planejamento.

Tabela 7: Seções da Matriz de Planejamento

Tratamentos	Aero	Alter.	PWM	Motor	Óleo de Câmbio	GSI	Pneu	Start stop	Rel. Trans.	Inércia
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
3	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
5	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
1020	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1
1021	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
1022	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1
1023	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
1024	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Fonte: Elaborada pela Autora

A quantidade de tratamentos inviabilizou o desenvolvimento do trabalho apenas com dados experimentais, pois levaria anos para testar todas as combinações, em razão das características dos testes e das restrições normativas que gerem o condicionamento do teste.

Portanto a abordagem totalmente experimental foi descartada. Como opção foi adotada a simulação computacional do consumo para gerar dados que permitam aplicar as ferramentas estatísticas de análises de interações.

3.3 Simulação computacional

A simulação computacional realizada possui dimensão zero, no domínio do tempo, feita em um *software* desenvolvido internamente pela *Fiat Chrysler Automobiles (FCA)*. O *software* simula o consumo no ciclo de condução utilizado no Brasil. Por questões de sigilo empresarial não é descrito neste trabalho detalhes do *software* de simulação.

As simulações de consumo foram executadas com os respectivos 1024 tratamentos com o ciclo de condução urbana e estrada, com combustível padrão de ensaio de consumo recomendado por norma, Gasool A22, fornecendo como saída o consumo em ($L/100km$), autonomia (km/L) e consumo energético (MJ/km).

Contudo, até mesmo utilizando simulação computacional a quantidade de tratamentos se mostrou um desafio, sendo adotado um *software* de fluxo para tornar o processo de simulação menos propício a erros, foi utilizado o *software* comercial ©*Isight 5.7*.

O ©*Isight 5.7* possui ferramentas de DoE que foram usadas para compor o fluxo de simulações. Foi desenvolvido um algoritmo no ©*Isight 5.7* para executar as 1024 simulações alternando os níveis das tecnologias em cada tratamento seguindo a matriz de planejamento configurada no próprio ©*Isight 5.7*.

A saída das simulações foram os 1024 consumos de cada tratamento da matriz de planejamento.

3.4 Metodologia de análise de efeitos – “combinada”

Foi utilizado o *software Microsoft Excel 2010* para realizar os cálculos envolvidos na metodologia.

A análise dos resultados com as ferramentas estatísticas foi denominada neste trabalho como metodologia combinada. Inicialmente é necessário calcular todos os efeitos existentes, para

isto foi construída a matriz de coeficientes de contrastes, esta matriz é composta pela matriz de planejamento mais as colunas que representam a entrada de cada interação, totalizando 1024 linhas e 1024 colunas, das quais 11 colunas são propriamente a matriz de planejamento mais as 1013 colunas referentes às interações.

Os 1023 efeitos foram calculados com a Equação (20). Os efeitos foram agrupados de acordo com a sua ordem (quantidade de fatores envolvidos no cálculo do efeito) segundo a Tabela 8.

Tabela 8: Efeitos calculados

Ordem do efeito	Quantidade	Tipo do efeito
1 ^a	10	Efeitos principais
2 ^a	45	Interação
3 ^a	120	Interação
4 ^a	210	Interação
5 ^a	252	Interação
6 ^a	210	Interação
7 ^a	120	Interação
8 ^a	45	Interação
9 ^a	10	Interação
10 ^a	1	Interação
Total de efeitos	1023	-

Fonte: Elaborada pela Autora

Uma vez calculados todos os efeitos, é possível obter uma equação que descreva qualquer ponto dentro do conjunto de condições simuladas, porém esta equação envolve 1023 coeficientes, sendo útil para cálculos precisos. Todavia, torna-se complexo analisar os efeitos com uma quantidade tão elevada de termos, portanto foram propostas formas mais eficazes de analisar os efeitos e as interações.

3.4.1 Estratificação da redução de consumo

Uma vez que um dos objetivos é conhecer como a variação entre um veículo com e sem tecnologias de eficiência energética se distribui entre as os efeitos, foram destacadas duas condições referências, condição inicial e condição final conforme a Tabela 9. A condição inicial representa o veículo sem nenhuma tecnologia de eficiência energética (tratamento 1), enquanto a condição Final representa o veículo com todas as tecnologias (tratamento 1024).

Tabela 9: Tratamentos 1 e 1024 da matriz de planejamento – condições de referência

Condição	Tratamento	Aero.	Alter.	PWM bomba	Motor	Óleo de câmbio	GSI	Pneu	Start stop	Rel. de Trans.	Inércia
Inicial	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Final	1024	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Fonte: Elaborada pela Autora

Como será apresentado nos resultados, foi observado que a soma de todos os efeitos não coincide com a variação real entre os tratamentos 1 e 1024. A explicação veio da construção do método de cálculo dos efeitos, que será explicado no capítulo de resultados.

Com análise da distribuição da variação de consumo entre as duas condições foi construído gráficos de barras, em que se pode observar os efeitos mais relevantes no consumo.

3.4.2 Análise das interações

Foram utilizadas basicamente 3 ferramentas para analisar as interações:

1. Gráfico de linhas de interação entre dois fatores;
2. Matriz de interações de 2ª ordem;
3. Gráficos de distribuições percentuais de participação das tecnologias nas interações.

As interações podem ser classificadas como desprezíveis ou significativas, sendo que as significativas podem ser positivas ou negativas. As positivas amplificam o consumo, por isso são indesejadas, as interações negativas reduzem o consumo, sendo desejadas. Contudo, para estabelecer se a interação é desprezível ou não é necessário adotar um critério de classificação, pois todas as interações foram diferentes de zero. Foi estabelecida uma escala percentual de 0 ao valor máximo de interação observado (100%). Foi adotado um fator de 20% para classificar as interações como significativa.

Por uma questão de representação gráfica as interações de 2ª ordem são as mais visuais de serem avaliadas, pois é possível analisá-las através de gráfico de linhas e da matriz de interação. Os gráficos de linhas de interação de 2ª ordem são semelhantes ao apresentado na Figura 23 no Capítulo 3.

Cada gráfico de linha mostra a interação entre duas tecnologias, logo podem ser obtidos 45 gráficos. Uma forma mais prática de avaliar as 45 interações é por meio de uma matriz de interações, no qual as 45 interações foram dispostas, permitindo avaliar de forma ampla as interações.

Porém as interações de ordens maiores que 2 tornam-se menos prático avaliar por gráficos de linhas, pois seriam necessárias representações tridimensionais, além do mais o número de interações se torna elevado (120 interações de 3ª ordem). Então, é proposto utilizar uma ferramenta que avalie a participação das tecnologias nas interações por meio de distribuições estatísticas.

Para construir as distribuições foram contabilizadas as participações de cada fator (tecnologia) nas interações de acordo com cada grupo (positivas, desprezíveis e negativas). Dessa forma é possível analisar quais fatores tendem a interagir mais frequentemente. As distribuições foram construídas para cada ordem de interações.

Com a análise das interações foi possível agrupar as tecnologias em dois grupos, as que têm interação significativas e as que não tem interação significativa. Posteriormente foram analisados os dois grupos a fins de estabelecer comparações de metodologias.

3.5 Comparações entre metodologias

Foram comparadas a metodologia com aplicação das fermentas descritas nas seções anteriores, chamada aqui de “*combinada*” com uma metodologia chamada de “*individualizada*”.

A metodologia individualizada supõe que o efeito de uma tecnologia é a variação de apenas duas condições. A Tabela 10 mostra uma matriz de planejamento de uma fatorial com 3 fatores (Aerodinâmica, Alternador e Motor).

Tabela 10: Matriz de planejamento – 3 fatores

Tratamento	Aerodinâmica	Alternador	Motor	Consumo
1	0	0	0	C_1
2	0	0	1	C_2
3	0	1	0	C_3
4	0	1	1	C_4
5	1	0	0	C_5
6	1	0	1	C_6
7	1	1	0	C_7
8	1	1	1	C_8

Fonte: Elaborada pela Autora

A metodologia individualizada calcula o efeito do fator aerodinâmica apenas com os tratamentos 1 e 5, do alternador com os tratamentos 1 e 3 e do motor com os tratamentos 1 e 2, usando a Equação (17).

$$E_{Aero} = C_5 - C_1$$

$$E_{Alt} = C_3 - C_1$$

$$E_{Alt} = C_2 - C_1$$

Neste caso não são considerados os demais tratamentos, 4, 6, 7 e 8, nem são calculadas as interações.

É esperado que essa metodologia seja assertiva quando não houver interações significativas. Contudo o fato de não considerar interações pode provocar erros na análise de tecnologias que interagem entre si.

Para comparar essa metodologia individualizada com a combinada, foram executados os procedimentos descritos na seção 5.3.1 *Estratificação da redução de consumo* para os dois grupos (5 tecnologias em cada grupo), Grupo 1 - com interação significativa e Grupo 2 - sem interação significativa. Foram também calculados os efeitos segundo a metodologia individualizada, sendo comparadas as duas metodologias.

Pode-se imaginar que os efeitos principais são independentes das interações. Contudo, por observar que no seu cálculo todas as condições da matriz de planejamento são consideradas, é sensato pensar que os efeitos principais também contém interação. Em razão disso foi realizada análise dos efeitos principais com relação às interações.

Para avaliar a sensibilidade dos efeitos principais em relação às interações, foram executados os procedimentos: considerando os dois grupos de tecnologias da seção anterior (com e sem interação significativa) foi recalculado os efeitos principais com um fator a menos no conjunto. Ou seja, na seção anterior foram calculados os 5 efeitos principais de cada grupo com um fatorial de 32 tratamentos, (2^5), posteriormente foi calculado 4 efeitos principais para um fatorial de 16 tratamentos, (2^4). Foram comparados os 4 efeitos do último fatorial (2^4) com os efeitos calculados com o primeiro fatorial (2^5).

3.6 Validação experimental

A validação experimental foi realizada com a execução de ensaios experimentais de consumo de combustível para uma amostragem de 10 tratamentos da matriz de planejamento. A seguir será descrita a metodologia utilizada, na sequência é abordada análise de incertezas.

3.6.1 Ensaio de consumo de combustível

Os testes foram executados em consonância com as normas brasileiras regulamentadoras sobre ensaios de consumo, emissões e desaceleração livre, ABNT NBR 7024:2017, ABNT NBR 6601:2012 e ABNT NBR 10312:2014, respectivamente. Os testes foram feitos no Laboratório de Emissões Veiculares do Centro de Inovação e Tecnologia (CIT) SENAI FIEMG, Campus CETEC, em Belo Horizonte, MG, Brasil, no período de 17 de março de 2017 a 11 de abril de 2018, com algumas interrupções devido a problemas técnicos.

Foi utilizado o combustível Gasool A22, constituído de 22% de Etanol anidro e 78% de gasolina pura (ABNT NBR 8689, 2012).

Os testes foram realizados com um único veículo. O veículo disponível possui as tecnologias de eficiência energética consideradas neste estudo, portanto originalmente todos os níveis das tecnologias estão no nível [1], o que configura o tratamento 1024. Foram realizados ensaios com 10 tratamentos, que são apresentados na Tabela 11.

Tabela 11: Tratamentos que foram testados em laboratório

Teste	Tratamento	Motor	Rel. Trans.	Óleo câmbio	PWM bomba	Alter.	Inércia	Pneu	Aero	GSI	Start stop
1	1024	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1020	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
3	1008	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1
4	1004	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
5	512	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1
6	1016	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1
7	1023	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1
8	483	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0
9	971	1	1	0	1	1	0	1	1	0	0
10	355	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0

Fonte: Elaborada pela Autora

Teste 1 - *Tratamento 1024*: Foi executado com o veículo original.

Teste 2 - *Tratamento 1020* – Start stop: o tratamento com *Start stop* no nível [0] foi realizado com o sistema *Start stop* desligado.

Teste 3 - *Tratamento 1008* – GSI: o teste com GSI no nível [0] foi realizado com o piloto trocando as marchas nas velocidades recomendadas pelo fabricante do veículo, sem seguir a indicação do GSI, no caso o nível [0] foi denominado de “*troca de marcha fixa*”.

Teste 4 - *Tratamento 1004* – GSI + *Start stop*: O teste com GSI e *Start stop* no nível [0] foi realizado com a *Start stop* desligado e com troca de marcha fixa.

Teste 5 - *Tratamento 512* – Aerodinâmica: o nível [0] para Aerodinâmica foi obtido com a substituição do coeficiente F_2 da força resistiva inserida no dinamômetro para reprodução do *coast down*.

Teste 6 - *Tratamento 1016* – Pneu: o nível [0] do pneu foi obtido com a substituição do coeficiente F_0 da força resistiva inserida no dinamômetro para reprodução do *coast down*.

Teste 7 - *Tratamento 1023* – Inércia: o nível [0] da inércia foi obtido com a substituição da classe de inércia na reprodução do *coast down* no dinamômetro.

Teste 8 - *Tratamento 483* – GSI + *Start stop* + Pneu + Aerodinâmica + Inércia: os 5 fatores foram testados no nível [0] conforme as descrições nos itens anteriores.

Teste 9 - *Tratamento 971* – Óleo de câmbio + GSI + *Start stop* + Inércia: O nível [0] do óleo de câmbio foi realizado com a troca do óleo sintético do câmbio pelo mineral. Os demais fatores foram testados no nível [0] conforme as descrições acima.

Teste 10 - *Tratamento 355* – Bomba de combustível + GSI + *Start stop* + Pneu + Aerodinâmica + Inércia: O nível [0] da bomba de combustível foi obtido com a troca da bomba de combustível com PWM original do veículo por um bomba convencional sem PWM. Os demais fatores foram testados no nível [0] conforme as descrições acima.

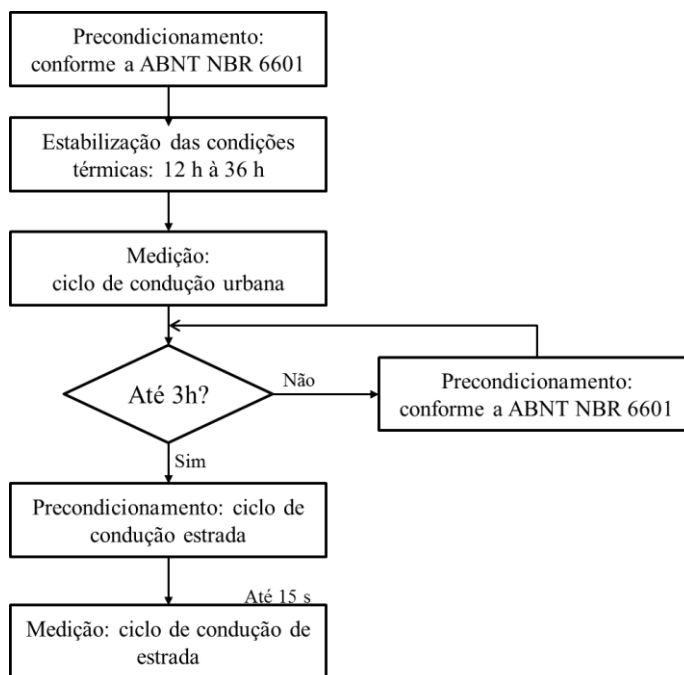
Foram realizadas 4 repetições de cada tratamento, com exceção do teste 2 e 8, que foram feitas 3 repetições.

Os procedimentos de ensaio foram executados conforme o fluxo apresentado na Figura 28.

Precondicionamento: o veículo operou a 1ª e a 2ª fase do ciclo de condução urbana no dinamômetro conforme a norma ABNT NBR 6601.

Estabilização: o veículo foi mantido desligado dentro do intervalo especificado, mínimo de 12 horas e máximo de 36 horas em temperatura ambiente entre 20 °C e 30 °C.

Medição: o veículo operou o ciclo de condução urbana para medição do consumo urbano, seguido do condicionamento do ciclo estrada e por fim executou o ciclo estrada para medição, conforme fluxograma da Figura 28.

Figura 28: Fluxo dos procedimentos de ensaio de consumo de combustível veicular

Fonte: Adaptado de (ABNT NBR 7024, 2017)

Os resultados dos ensaios foram o consumo (L/100km) e autonomia (km/L) urbana, estrada e combinada. O consumo energético foi calculado considerando a densidade energética do Gasool A22 recomenda na ABNT NBR 7024:2017 de 28,99 MJ/L.

Com os resultados foram calculadas as médias de cada condição de ensaios para comparar com os resultados obtidos via simulação computacional.

3.6.2 Análise de incertezas

A incerteza dos testes de consumo de combustível foi calculada segundo o *Guia para expressão de incerteza de medição* - GUM. A metodologia usada para cálculo de incerteza das medições do consumo de combustível será aqui brevemente discutida. Os dados de incerteza apresentados neste trabalho foram fornecidos pelo Laboratório de Emissões Veiculares do CIT SENAI, onde foram feitos os testes, sendo apresentada no ANEXO I a metodologia de cálculo de incerteza adotada pelo Laboratório.

O consumo de combustível neste laboratório é calculado pelo método de balanço de carbono, conforme descrito na ABNT NBR 7024:2017. Em essência, os gases contendo carbono em sua composição são coletados e quantificados durante os ciclos de condução urbano e estrada. O Consumo de combustível é obtido por meio da Eq. (21).

$$C = \left\{ \frac{[(0,8656 \times m_{THC}) + (0,4288 \times m_{CO}) + (0,2729 \times m_{CO_2})]}{(6,4487 \times \%V_{gás}) + (4,1102 + \%V_{ETOH})} \right\} \times 100 \quad (21)$$

Onde:

C é o consumo de combustível, em litros por 100 quilômetros (L/100 km);

m_{THC} é a massa final de hidrocarbonetos totais (THC) emitida no ensaio, em gramas por quilômetro (g/km);

m_{CO} é a massa final de monóxido de carbono (CO) emitida no ensaio, em gramas por quilômetro (g/km);

m_{CO_2} é a massa final de dióxido de carbono (CO₂) emitida no ensaio, em gramas por quilômetro (g/km);

$\%V_{gás}$ é a porcentagem, em volume a 20°C, de gasolina no combustível utilizado;

$\%V_{ETOH}$ é a porcentagem, em volume a 20°C, de etanol no combustível utilizado, descontada o percentual de água.

Os gases THC e CO são obtidos em partes por milhão (ppm) por fase e para o CO₂ em % por fase. São realizados cálculos descritos na ABNT NBR 6601:2012 para os valores de emissões serem expressos em unidade de massa (gramas) e posteriormente em unidade de massa por unidade de distância (gramas/quilômetro). Logo, para levantamento da incerteza do consumo é necessário considerar as fontes de incerteza relacionadas com a amostragem e determinação das massas dos gases THC, CO e CO₂, assim como incertezas associadas com a distância percorrida durante o ciclo, entre outros.

As fontes de incertezas consideradas no cálculo de incerteza do tipo A, que são obtidas por procedimentos estatísticos, foi a repetibilidade dos testes. Segundo o *Guia para expressão de incerteza de medição* a condição de repetibilidade pode ser considerada quando os testes são feitos sob (GUM, 2008):

- Mesmo procedimento;
- Mesmo observador (condutor);
- Mesmo instrumentos de medição, utilizado nas mesmas condições;
- Mesmo local;
- Repetições em curto período de tempo.

Portanto estando as condições do teste conforme o GUM, a repetibilidade foi calculada pela Equação (22).

$$Re = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (22)$$

Onde s é o desvio padrão amostral e n é a quantidade de testes realizados sob as mesmas condições de repetibilidade.

As demais fontes de incertezas, do tipo B, não obtidas por procedimentos estatísticos, sendo retiradas dos certificados de calibração dos equipamentos utilizados nos ensaios. A seguir são citadas as fontes de incertezas do tipo B consideradas no cálculo da incerteza:

1. Incerteza relacionada à análise de gás: incerteza da resolução do analisador, incerteza relacionada ao gás padrão (retirada do certificado de ensaio que acompanha o gás padrão), incerteza da linearidade da curva de calibração do analisador, incerteza da divisora de gases;
2. Incertezas relacionadas às condições ambientais no momento do ensaio: incerteza da pressão atmosférica, umidade relativa, temperatura;
3. Incerteza relacionada ao volume de gás coletado: incerteza de certificado de calibração dos sensores de temperatura e pressão do CVS (amostrador de volume constante) e do coeficiente K_v (coeficiente de calibração do CVS);
4. Incerteza relacionada a razão de diluição;
5. Incerteza do diâmetro do rolo (interfere na distância percorrida);
6. Incerteza da medida do tempo;
7. Incerteza da velocidade;
8. Incerteza da resolução do sistema de controle do ciclo (resolução);
9. Incerteza relacionada à curva do coast down;
10. Incerteza relacionada ao cálculo da massa de poluentes.

Após identificadas, quantificada as fontes de incerteza, assim como as distribuições de probabilidade e graus de liberdade associada a cada fonte de incerteza, elas são combinadas de acordo com a Eq. (23) para determinar a incerteza padrão das medições (GUM, 2008).

$$u_c(x) = \sqrt{u(x_1)^2 + u(x_2)^2 + \dots + u(x_n)^2} \quad (23)$$

Onde $u_c(x)$ é a incerteza padrão combinada da variável x e $u_i(x)$ é a incerteza padrão de cada fonte de incerteza i . Uma vez que a incerteza padrão combinada foi calculada, pode-se então calcular a incerteza expandida com confiança de 95,45 % por meio da Eq. (24).

$$U_{ex} = k_{eq} \times u \quad (24)$$

Em que k_{eq} é o fator de abrangência. Neste trabalho adotou-se k_{eq} igual a 2, que corresponde a um nível de confiança de 95,45%.

O gráfico de validação apresentado ao final do Capítulo 6 mostra os resultados médios de cada tratamento com a incerteza expandida juntamente com os valores encontrados via simulação. No próximo capítulo serão apresentados os resultados do trabalho.

CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo apresenta os resultados obtidos no trabalho. Serão tratados apenas os resultados referentes ao consumo energético combinado, que é composto de 55% do consumo urbano e 45% do consumo estrada como descrito na Revisão bibliográfica (Capítulo 3). Os resultados estão divididos em 5 seções, a seção 1 apresenta a estratificação da redução de consumo em efeitos principais e interações. A seção 2 apresenta análises das interações, na seção 3 é apresentada a comparação entre as metodologias combinada e individualizada. A seção 4 traz uma análise dos efeitos principais. Por último a seção 5 é dedicada à validação experimental das simulações de consumo de combustível.

4.1 Estratificação da redução de consumo

Os resultados do consumo energético simulado das condições de referência (inicial e final) são apresentados na Tabela 12 em unidades de consumo energético [MJ/km] e em percentual (em relação ao consumo inicial).

Tabela 12: Consumo energético inicial e final

Condições	Tratamento	Consumo energético [MJ/km]	Consumo relativo [%]
Condição inicial	1	1,9655	100.0%
Condição final	1024	1,5780	80,28%
Variação de consumo	-	-0,3876	-19,72%

Fonte: Elaborada pela Autora

Como pode ser observado na Tabela 12 o consumo energético da condição inicial, sem tecnologias de eficiência energética, é 1,9655 MJ/km, com a aplicação das 10 tecnologias o consumo energético é de 1,5780 MJ/km. A variação de consumo energético com aplicação das tecnologias é 0,3876 MJ/km (19,7% do consumo inicial do veículo), a variação negativa se deve ao fato de que menor quantidade de energia é necessária no tratamento 1024 para deslocar o veículo 1 km. Portanto variações negativas são desejadas e positivas indesejadas.

Na Tabela 13 é apresentada a soma dos efeitos calculados de acordo com a ordem dos efeitos. Cada linha apresenta a soma dos efeitos daquele grupo, por exemplo, a primeira linha de resultados mostra os efeitos de 1ª ordem, ou seja, os 10 Efeitos Principais, na 3ª coluna está a soma dos 10 efeitos de 1ª ordem em valor absoluto (MJ/km) e relativo (percentual), o valor relativo é calculado com a referência do consumo energético do Tratamento 1 (condição

inicial). A coluna 4 mostra os resultados dos efeitos de ordens pares e na coluna 5 os efeitos de ordem ímpares.

Tabela 13: Efeitos totais – Principais e interações

Ordem do efeito	Quantidade de efeitos	Efeito das interações	Efeito das interações pares	Efeito das interações ímpares
-	-	[MJ/km] [%]	[MJ/km] [%]	[MJ/km] [%]
1	10	-0,3836 -19,52%	- -	-0,3836 -19,52%
2	45	0,0296 1,51%	0,0296 1,51%	- -
3	120	-0,0057 -0,29%	- -	-0,0057 -0,29%
4	210	-0,0020 -0,10%	-0,0020 -0,10%	- -
5	252	0,0012 0,06%	- -	0,0012 0,06%
6	210	0,0008 0,04%	0,0008 0,04%	- -
7	120	0,0007 0,04%	- -	0,0007 0,04%
8	45	0,0002 0,01%	0,0002 0,01%	- -
9	10	-0,0002 -0,01%	- -	-0,0002 -0,01%
10	1	-0,0001 0,00%	-0,0001 0,00%	- -
Soma dos efeitos	1023	-0,3590 -18,26%	0,0286 1,45%	-0,3876 -19,72%

Fonte: Elaborada pela Autora

Como pode ser avaliada a soma de todos os efeitos (colunas 3, Tabela 13) não resulta na variação entre a condição inicial e final, Tabela 12. Após avaliação desse primeiro resultado chegou-se à conclusão que algumas interações não são consideradas na distribuição da variação de consumo energético entre os efeitos, então avaliando a Matriz de Coeficientes de Contrastes observou-se que devido a simetria dos coeficientes de contrastes das interações pares, todas as interações pares se anulam entre a condição inicial e final.

Para entender melhor é apresentada na Tabela 14 uma matriz de coeficientes de contrastes de um planejamento fatorial completo de 3 fatores e na Tabela 15 são apresentadas especificamente apenas as colunas da matriz de coeficiente de contrastes original (Tabela 14) referente as interações de ordens pares (neste caso apenas de 2ª ordem). Observe a simetria presente nessa parte da matriz. Foi observado esse comportamento em todas as interações de ordem par, pois o sinal de entrada (coeficiente de contraste) assume valor [1] na condição inicial e final (Tratamentos 1 e 8, Tabela 14 e 15), de forma que ao subtrair um pelo outro para calcular a variação de consumo energético os termos das interações pares tendem para zero.

Tabela 14: Matriz de coeficientes de contrastes (3 fatores)

Tratamento	F1	F2	F3	F1_F2	F1_F3	F2_F3	F1_F2_F3
1	0	0	0	1	1	1	0
2	0	0	1	1	0	0	1
3	0	1	0	0	1	0	1
4	0	1	1	0	0	1	0
5	1	0	0	0	0	1	1
6	1	0	1	0	1	0	0
7	1	1	0	1	0	0	0
8	1	1	1	1	1	1	1

Fonte: Elaborada pela Autora

Portanto foi constatado que a variação de consumo energético entre o Tratamento 1 e 1024 se distribui apenas nas interações de ordens ímpares, conforme mostra a Tabela 13.

Tabela 15: Parte da matriz de coeficientes de contraste – interações de 2ª ordem

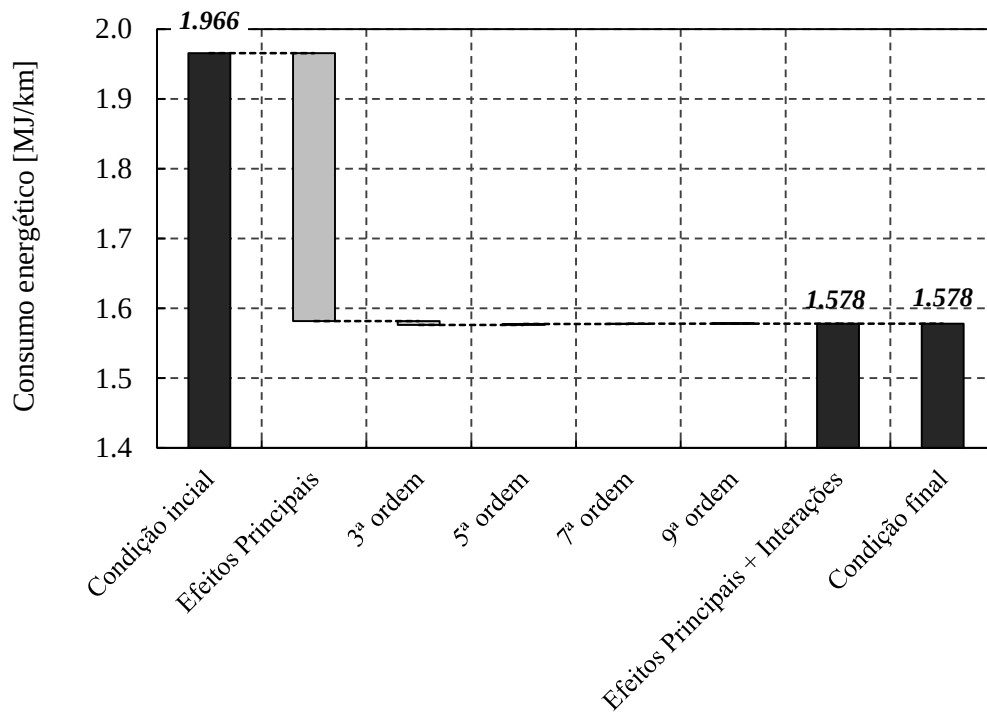
Tratamento	F1_F2	F1_F3	F2_F3
1	1	1	1
2	1	0	0
3	0	1	0
4	0	0	1
5	0	0	1
6	0	1	0
7	1	0	0
8	1	1	1

Fonte: Elaborada pela Autora

A estratificação da variação de consumo energético pode ser visualmente representada pelo gráfico de cascata apresentado na Figura 29 e 30 em escala ampliada, para melhor visualização das interações de 3ª, 5ª, 7ª e 9ª ordem.

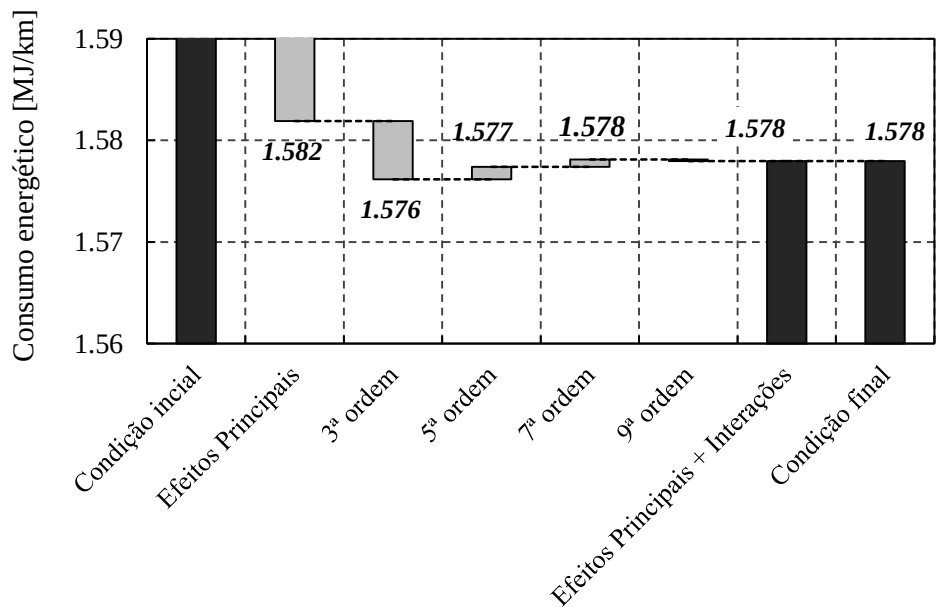
De acordo com a Figura 29, a maior contribuição da variação de consumo energético se deve aos efeitos principais. As interações de 3ª ordem são mais significativas que as demais, mas ainda assim assumem valor pouco representativo (0,3%). As interações de 5ª, 7ª e 9ª ordem podem ser consideradas desprezíveis, 0,06%, 0,04% e 0,01% respectivamente, Figura 30 e Tabela 13.

Figura 29: Estratificação da redução de consumo energético



Fonte: Elaborada pela Autora

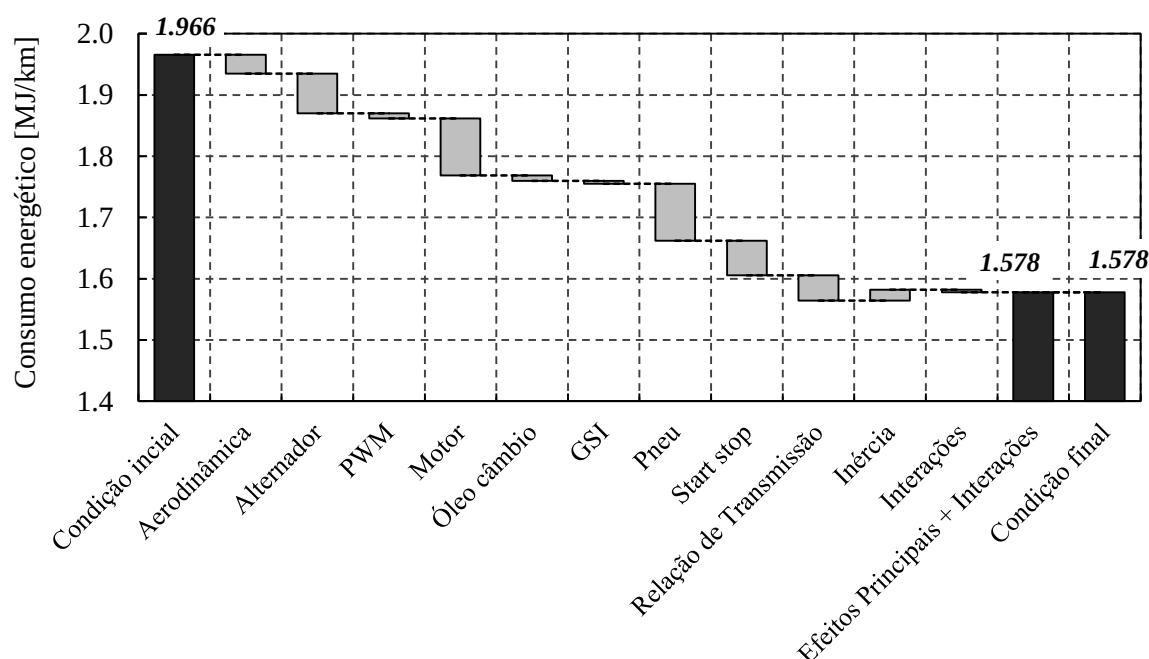
Figura 30: Estratificação da redução de consumo energético - Escala ampliada



Fonte: Elaborada pela Autora

Uma vez que os Efeitos Principais representam a maior parte da variação de consumo energético é interessante estratificar a variação de consumo energético nos 10 Efeitos Principais, Figura 31. Nesse caso o erro entre o valor obtido com a soma dos efeitos principais e o consumo energético final é equivalente à soma das interações ímpares, no caso estudado o erro seria de 0,004 MJ/km (0,2%), que corresponde a soma de 502 interações (120 de 3ª, 252 de 5ª ordem, 120 de 7ª ordem e 10 de 9ª ordem), conforme pode ser observado na Figura 31.

Figura 31: Estratificação da redução de consumo - Efeitos principais e interações



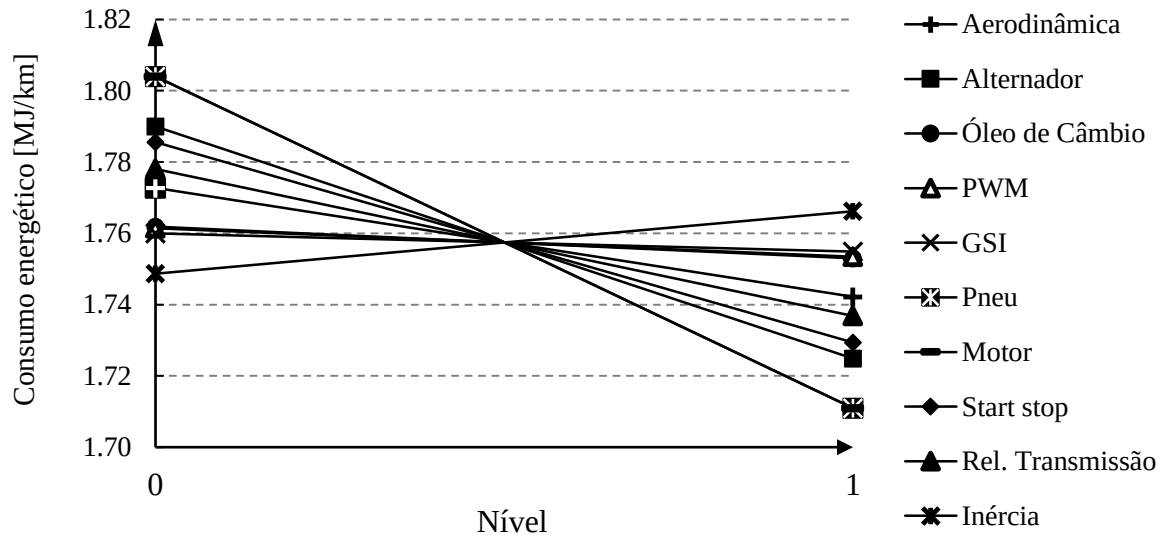
Fonte: Elaborada pela Autora

Dentre as 10 tecnologias avaliadas neste trabalho, o motor foi a tecnologia que apresentou maior efeito (4,7 % do consumo inicial), a melhoria em pneu apresentou em efeito similar. A tecnologia com menor efeito é o GSI, que se deve em parte por ser uma tecnologia não muito expressiva no ciclo de medição, conforme a Portaria n. 397 de 2015 do MDIC e em parte pelo fato das trocas de marchas definidas no nível [0] ter sido otimizada para consumo energético.

Os efeitos principais podem ser apresentados também em gráficos de linhas, Figura 32. O planejamento fatorial com 2 níveis propõe uma relação linear, o efeito é exatamente a inclinação das curvas de cada fator (tecnologia). O consumo energético é avaliado apenas nos níveis [0] e [1], entre os níveis avaliados, Figura 32, não é conhecido se de fato a relação é linear, seria necessário avaliar mais condições intermediárias entre estes níveis, para ter certeza do tipo de relação, porém como o trabalho investiga o efeito de tecnologias, que representam

condições pontuais, esta abordagem mostra-se satisfatória, pois entre um motor nível [0] e nível [1] não existe uma condição intermediária possível, um terceiro nível só seria possível se fosse incluído um terceiro motor no estudo, que não é o objetivo do trabalho. Ou no caso da tecnologia *Start stop*, não existe uma condição intermediária entre o veículo sem *Start stop* e com *Start stop*, assim como no caso da tecnologia GSI.

Figura 32: Efeitos principais

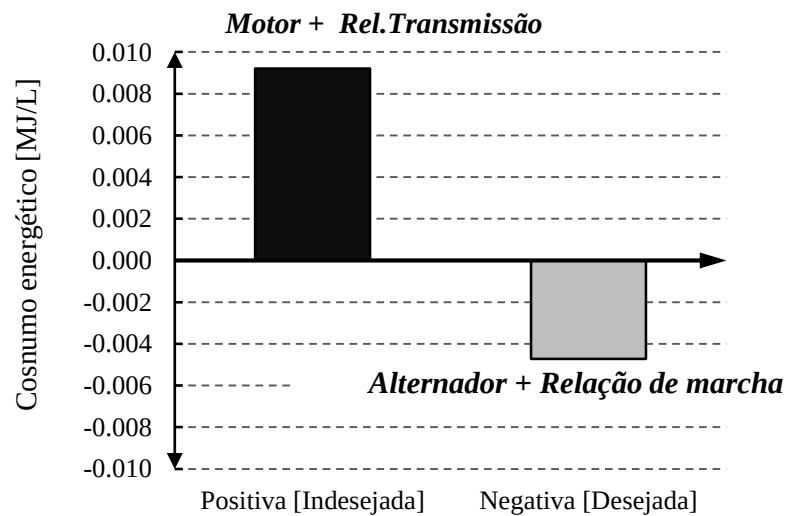


Fonte: Elaborada pela Autora

4.2 Análise das interações

Na Figura 33 são apresentadas as interações mais significativas, positiva e negativa.

Figura 33: Interações de 2ª ordem mais significativas

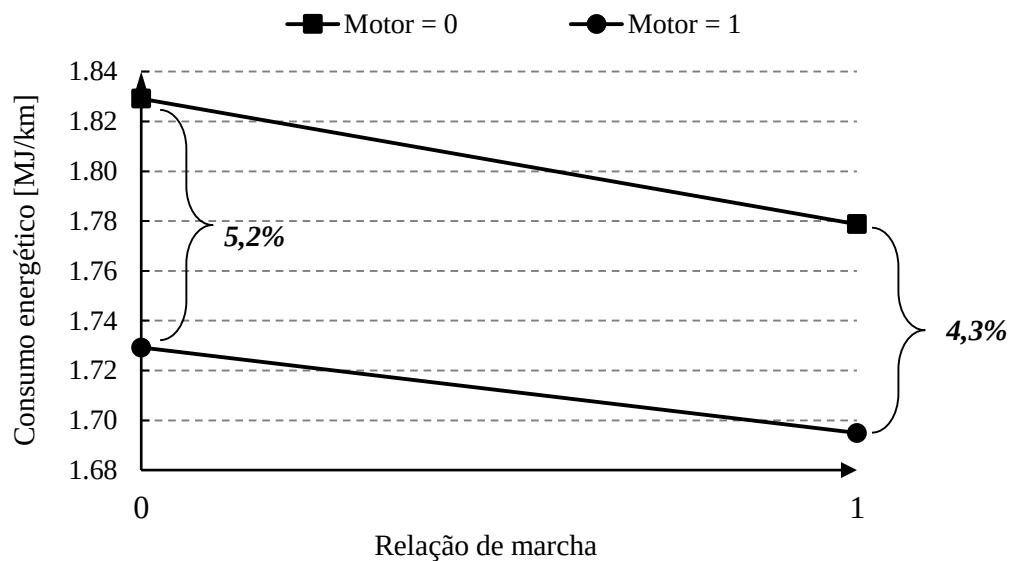


Fonte: Elaborada pela Autora

De acordo com a Figura 33 a interação mais relevante ocorre entre motor e relação de transmissão, sendo uma interação positiva, que amplifica o consumo energético, portanto indesejada. A interação negativa mais relevante ocorreu entre o Alternador e Relação de marcha, sendo a interação negativa aproximadamente 50% da interação positiva mais relevante.

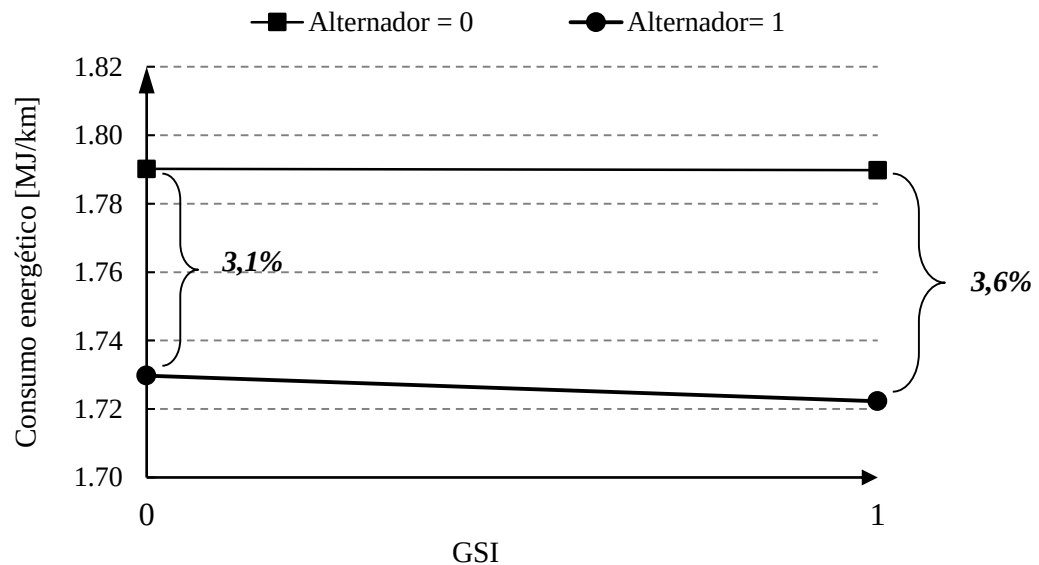
Nas Figuras 34 e 35 são apresentados os gráficos de linhas das interações mais significativa positiva e negativa, respectivamente.

Figura 34: Interação positiva significativa (2ª ordem)



Fonte: Elaborada pela Autora

Figura 35: Interação negativa significativa (2ª ordem)

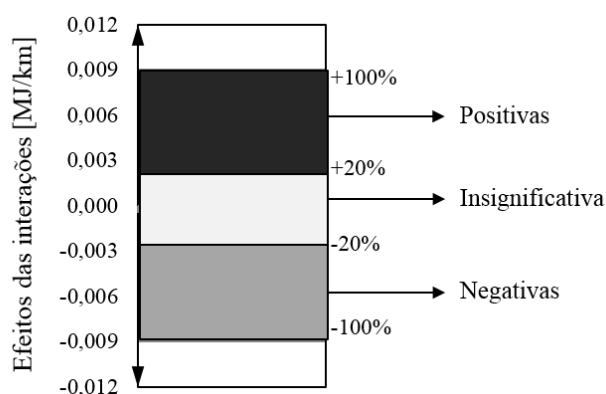


Fonte: Elaborada pela Autora

Na Figura 34 nota-se que o efeito das tecnologias é reduzido pela interação entre relação de marcha e motor, caso não houvesse interação entre elas o consumo energético com o Motor e relação de marcha no nível [1] seria menor do que o indicado no Gráfico. O contrário ocorre com a interação entre Alternador e GSI, a interação faz com que o consumo energético com Alternador e GSI no nível [1] seja menor.

A interação mais significativa (Motor e Relação de marcha) tem intensidade em torno de 0,009 MJ/km. Este valor foi adotado como referência (100%) para estabelecer uma escala, com a qual foi possível classificar as interações em significativas ou não significativas. Foi estabelecido um fator de 20% do valor de referência para classificar as interações como não significativa conforme ilustra a Figura 36.

Figura 36: Escala adotada para classificar as interações significativas



Fonte: Elaborada pela Autora

Após a classificação das 45 interações de 2ª ordem foram organizadas na Matriz de Interações de 2ª ordem, que é apresentada na Tabela 16, sendo destacadas as interações significativas conforme a tonalidade adotada na Figura 36.

A Matriz de interações de 2ª ordem permite avaliar as interações de forma quantitativa, olhando a matriz observa-se que existem 5 interações significativas positiva (indesejada) e 1 negativa (desejada), sendo que as positivas além de maior em quantidade são maiores em intensidade, indicando que as interações tendem a reduzir o benefício das tecnologias quando combinadas.

A relação de marcha participou de 2 interações significativas, a de maior intensidade ocorreu com motor (0,009 MJ/km), o Alternador atuou em 3 interações significativas (com o

PWM, GSI e Start stop) e o Motor interagiu fortemente com 2 tecnologias (Start stop e Ralação de marcha).

Não foram observadas interações significativas com aerodinâmica, inércia e óleo de câmbio.

Tabela 16: Matriz de interações de 2ª ordem – Consumo combinado

	Aero	Altern.	PWM	Motor	Óleo câmbio	GSI	Pneu	Start stop	Rel. Trans.	Inércia
Aerodinâmica		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-0,001	0,000
Alternador			0,004	-0,001	0,000	-0,005	0,001	0,006	-0,001	0,000
PWM				0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Motor					0,000	-0,001	0,001	0,006	0,009	0,001
Óleo câmbio						0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
GSI							-0,002	0,001	0,007	0,002
Pneu								0,000	-0,001	0,001
Start stop									0,000	0,000
Relação de Transmissão										0,001
Inércia										

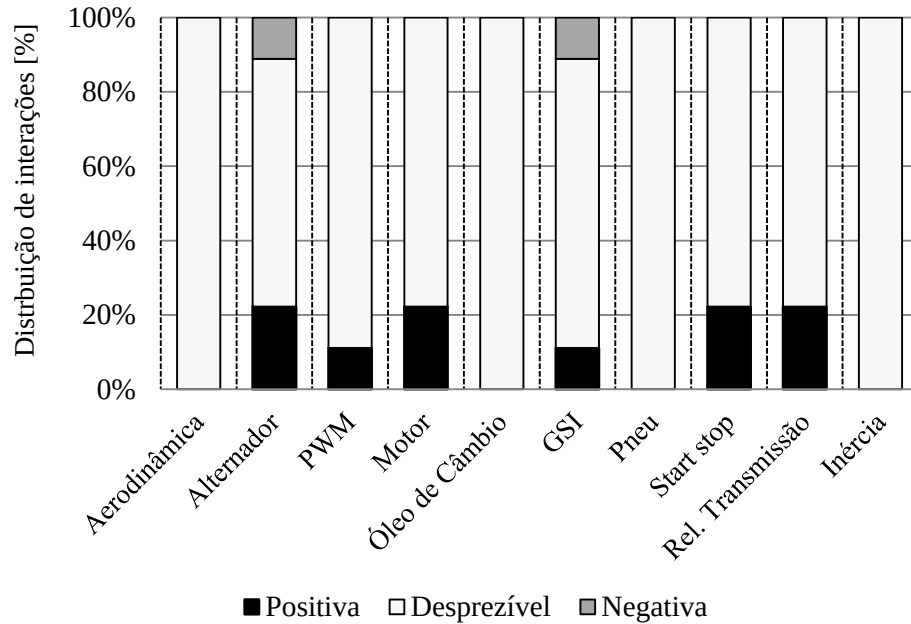
Fonte: Elaborada pela Autora

Na Figura 37 é apresentada as distribuições de participação das tecnologias nas interações de 2ª ordem. Esta ferramenta gráfica auxilia na análise de interações de maiores ordens. Contudo, essa representação possui uma limitação, pois ela não mostra a intensidade das interações, apenas a quantidade de participação de cada tecnologia nas interações.

Logo a ferramenta de distribuição de participação das tecnologias nas interações deve ser usada com cautela, pois ela indica a quantidade de participação nas interações de cada tecnologia, mas não o valor da interação, o seu ponto mais positivo é o fato de permitir avaliar interações de maior ordem que não é possível com a Matriz de Interações de 2ª ordem, fornecendo indicativos das tecnologias que tendem a ter maior interação.

Na Figura 38 é apresentada a distribuição de participação das tecnologias nas interações de 3ª ordem.

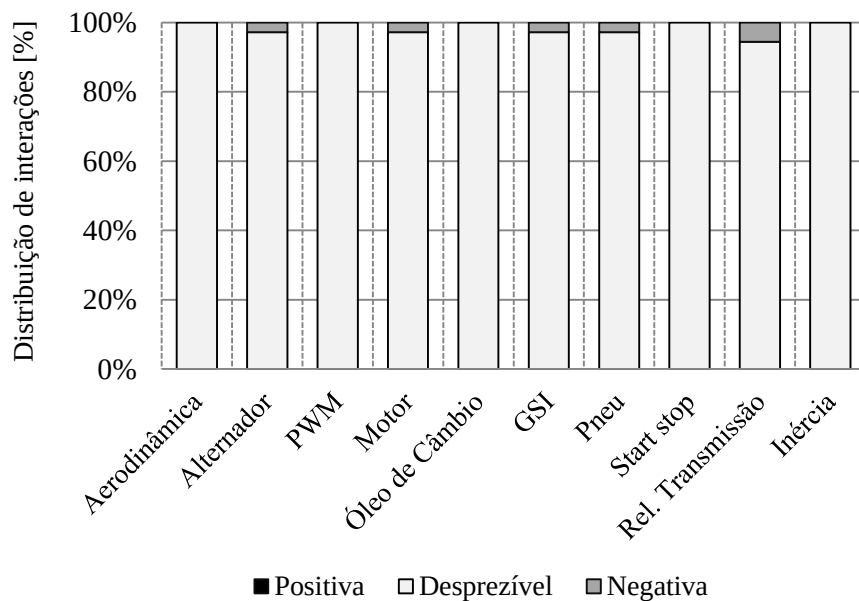
Figura 37: Distribuição das tecnologias em interações Positivas, desprezíveis e positivas – 2ª ordem



Fonte: Elaborada pela Autora

Ao observar a Figura 38 nota-se que poucas interações foram consideradas significativas, havendo apenas interações significativas negativas.

Figura 38: Distribuição das tecnologias em interações negativas, desprezíveis e positivas - 3ª ordem



Fonte: Elaborada pela Autora

Observa-se a mesma tendência das interações de 2ª ordem, indicando que os fatores que tem maior interação é o Alternador, Motor, GSI e Relação de transmissão. Aerodinâmica, PWM de bomba, Óleo de câmbio e Inércia não interagiram significativamente. O Pneu apresentou algumas interações e o Start stop não apresentou interações de 3ª ordem.

As demais distribuições foram avaliadas, mas as interações foram tão pequenas em relação à referência de 0,009 MJ/km, que praticamente não houveram interações significativas.

Com análise das interações, Gráficos de linhas, Matrizes de interação de 2ª ordem e os gráficos de distribuições de interações das tecnologias, foi possível separar as tecnologias em 2 grupos, Grupo 1 com interações significativas e Grupo 2 com interações não significativas, conforme a Tabela 17.

Tabela 17: Tecnologias agrupadas conforme o grau de interação

Tecnologias	Grupo 1	Grupo 2
	Interação significativa	Interação não significativa
	Alternador	Aerodinâmica
	Motor	PWM
	GSI	Óleo de câmbio
	Start stop	Pneu
	Relação de transmissão	Inércia

Fonte: Elaborada pela Autora

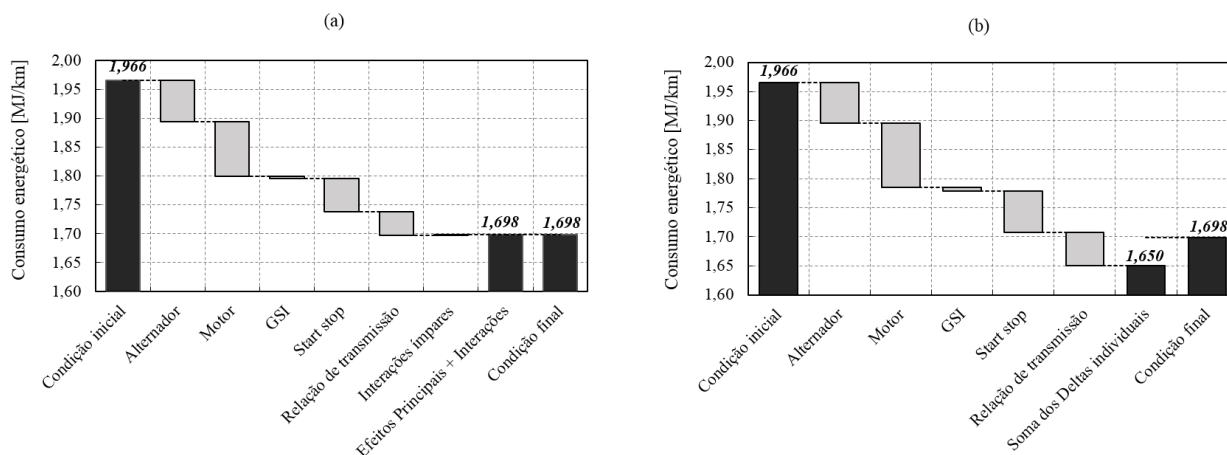
O PWM foi alocado no Grupo 2, apesar de ter apresentado uma interação de 2ª ordem significativa, pois foi somente uma interação de intensidade média, aproximadamente 50% da referência (0,009 MJ/km).

Ao olhar para a Tabela 17 nota-se que as tecnologias que tiveram maior interação foram aplicadas no trem de forças do veículo, em especial o motor, alternador e a relação de transmissão. Das tecnologias analisadas, aquelas voltadas para redução das forças resistivas do veículo apresentam interações pouco significativas.

4.3 Comparação entre metodologias

A comparação entre as metodologias combinada e individualizada é apresentada na Figura 39 para o Grupo 1 de tecnologias com interação significativa e na Figura 40 para o Grupo 2 com as tecnologias que não apresentam interação significativa.

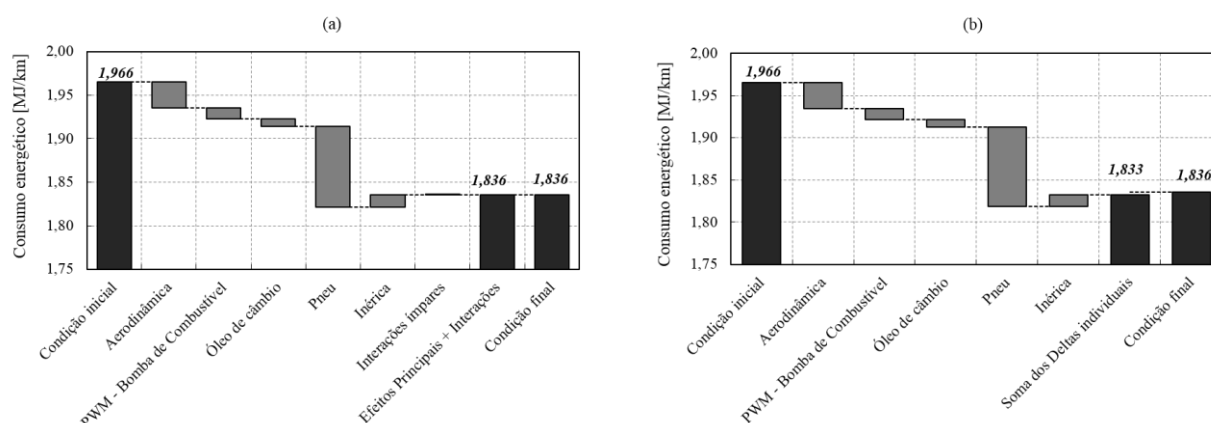
Figura 39: Comparação das metodologias – Grupo 1: Interação significativas – (a) Metodologia Combinada; (b) Metodologia Individualizada



Fonte: Elaborada pela Autora

Como pode ser observado na Figura 39, o erro ao aplicar a metodologia individualizada quando há forte interação entre tecnologias é elevado, no caso analisado o erro foi de 0,048 MJ/km, que corresponde a 2,5 % do consumo energético da condição inicial. Quando as interações não são significativas, Figura 40, o erro de utilizar a metodologia individualizada é relativamente pequeno, neste caso foi obtido o valor de 0,003 MJ/km, que representa apenas 0,2 %.

Figura 40: Comparação das metodologias – Grupo 2: Interação não significativas – (a) Metodologia Combinada; (b) Metodologia Individualizada



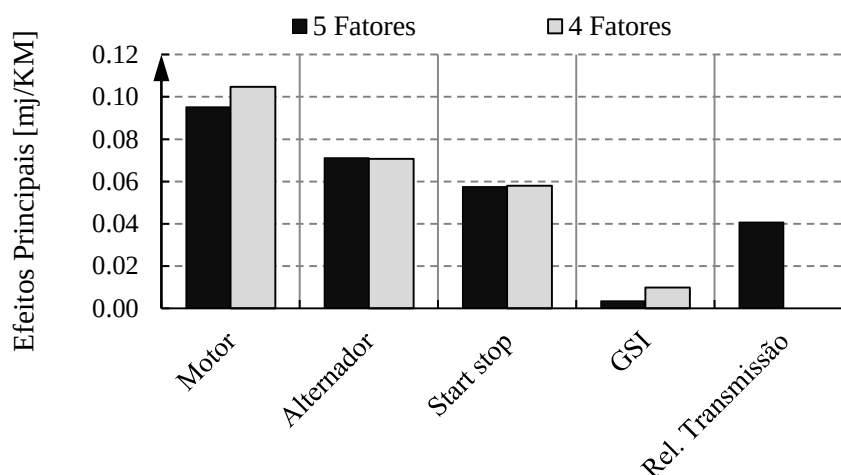
Fonte: Elaborada pela Autora

Portanto a metodologia combinada deve ser utilizada sempre que as interações forem consideradas significativas. Quando não houver interações relevantes a metodologia individualizada pode ser usada com baixo erro.

4.4 Interações nos Efeitos principais

O efeito das interações nos efeitos principais é apresentado nas Figuras 41 e 42, para o Grupo 1 e Grupo 2, respectivamente.

Figura 41: Efeito das interações nos efeitos principais – interação significativa



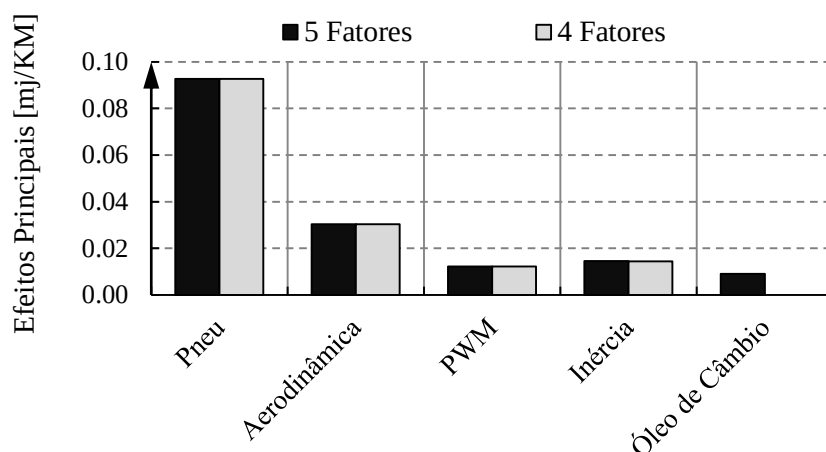
Fonte: Elaborada pela Autoria

Como pode ser observado na Figura 41, no Grupo 1, em que as interações são significativas, uma tecnologia que seja retirada do conjunto, afeta o efeito principal das demais, no caso avaliado, observe que o efeito do motor e do GSI aumentou quando a relação de marcha foi retirada do estudo. Esse resultado é bastante coerente, uma vez que as maiores interações foram observadas em interação entre Motor e Relação de marcha e entre GSI e Relação de marcha, enquanto as interações entre Alternador e Relação de marcha e Start stop e Relação de marcha foram desprezíveis, logo a retirada da relação de transmissão afeta suavemente estas duas tecnologias.

Na Figura 42, Grupo 2 com interações não significativas, fica evidente que ao retirar a tecnologia óleo de câmbio, o efeito principal das outras 4 tecnologias se mantém praticamente inalterado.

Esta última análise é importante para mostrar que apesar dos efeitos principais representarem o efeito global de uma tecnologia, eles são sensíveis às interações e não devem ser manipulados de qualquer forma quando as interações estão presentes, pois pode-se cometer erros elevados ao estimar o consumo energético ao se retirar ou adicionar uma tecnologia que interagem de forma significativa com outros componentes.

Figura 42: Efeito das interações nos efeitos principais – Sem interação significativa



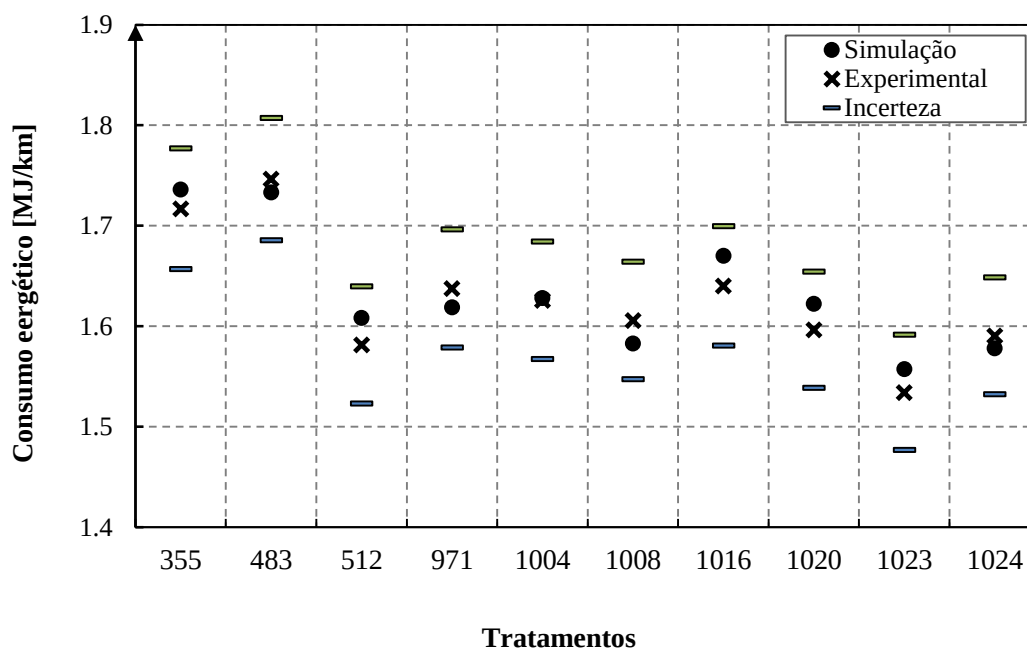
Fonte: Elaborada pela Autoria

Por fim, destaca-se a importância de avaliar as interações, neste trabalho observou-se que a quantidade de interações positivas e negativas é parecida, mas que as positivas (indesejadas) são maiores em intensidade, tornando o efeito das combinações menos atrativo.

4.5 Validação experimental

Os resultados dos testes experimentais (média e incerteza) são apresentados na Figura 43, juntamente com os respectivos consumos da simulação computacional.

Figura 43: validação experimental – Consumo combinado



Fonte: Autoria própria

A análise de incerteza foi fornecida pelo Laboratório que realizou os testes, tendo o valor máximo de 3,74% para o Tratamento 1023 e mínima de 3,48% para o tratamento 483.

Como pode ser observado os pontos médio dos testes apresentou boa correlação com os consumos simulados, estando dentro da faixa de incerteza das medições, portanto o processo de validação foi considerado satisfatório.

Neste trabalho a fonte de incerteza que apresentou maior valor foi a repetibilidade, incerteza do tipo A, as fontes de incerteza do tipo B foram menos representativas.

CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES

O objetivo deste trabalho foi analisar os efeitos de tecnologias de eficiência energética automotivas abrangendo as interações existentes entre as tecnologias. As ferramentas estatísticas foram aplicadas com sucesso, com os resultados obtidos é possível concluir que:

1. A redução de consumo de combustível com aplicação de tecnologias pode ser estratificada em efeitos principais e interações, esta abordagem foi denominada neste trabalho como metodologia combinada. Porém a variação de consumo entre uma condição de referência inicialmente sem tecnologias e final com tecnologias de eficiência energéticas pode ser estratificada nos efeitos principais e interações ímpares. As interações pares são canceladas devido propriedade de simetria da matriz de coeficientes de contraste;
2. Apesar das interações pares não serem consideradas na estratificação dos efeitos, é interessante analisá-las a fim de identificar as interações mais relevantes, especialmente as de 2ª ordem, por meio de gráficos de linhas avaliando cada interação e pela Matriz de interações de 2ª ordem que resume as 45 interações, além das distribuições de participação das tecnologias nas interações.
3. Observa-se com análise das interações, que as mais relevantes envolvem as tecnologias relacionadas ao trem de força, principalmente o motor, relação de marcha e alternador. As tecnologias aplicadas na redução das forças de resistência ao deslocamento apresentaram interações pouco significativas, especialmente as aplicações em aerodinâmica e inércia. Com a matriz de interações de 2ª ordem e os gráficos de distribuição das interações foi possível agrupar as tecnologias com forte interação (motor, alternador, relação de transmissão, Start stop e GSI) e as que não tem interação significativa (Pneu, Aerodinâmica, Óleo de câmbio, PWM da bomba de combustível e inércia);
4. Ao comparar as Metodologias combinada e individualizada, pode-se concluir que quando ocorre interações significativas entre as tecnologias é recomendado o uso da metodologia combinada, pois a individualizada resulta em erros elevados, no caso analisado na ordem de 0,043 MJ/km (2,5%). Em se tratando de tecnologias que não apresentam interação significativa a metodologia individualizada pode ser usada sem grandes erros, neste trabalho foi observado o erro de 0,003 MJ/km (0,2%);

5. Os efeitos principais são afetados pelas interações, portanto, ao se alterar a configuração do veículo, por exemplo, retirando uma tecnologia, se esta tecnologia tiver interação significativa com as demais, o efeito principal das tecnologias mantidas não serão os mesmos, pois os efeitos principais sofrem influência das interações da tecnologia retirada, logo para saber os novos efeitos principais é necessário recalcular os efeitos para o novo conjunto de tratamentos;
6. As ferramentas estatísticas se mostraram muito úteis na compreensão de como as tecnologias de eficiência energética de fato impactam no consumo de combustível automotivo;

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros sugere-se aplicar métodos de estudos que analisem o comportamento de algumas das variáveis em mais níveis, aquelas que podem assumir níveis contínuos, como as tecnologias que atuam na força resistiva do veículo.

Também propõe se aplicar a metodologia desenvolvida por subáreas, por exemplo aplicar o DoE na aerodinâmica para entender quais das alternativas de redução de arrasto aerodinâmico são mais significativas, que tem maior interação entre si, a fim de otimizar o benefício em cada subárea do projeto automotivo com relação ao consumo.

Analisar efeitos de outras tecnologias, com demais componentes dos sistemas, como os relacionados ao motor.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT NBR 10312. **Veículos rodoviários automotores leves - Determinação da resistência ao deslocamento por desaceleração livre em pista de rolamento e simulação em dinamômetro.** 2014.

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.** 2012.

ABNT NBR 7024. **Veículos rodoviários automotores leves - Medição do consumo de combustível - Método de ensaio.** 2017.

ABNT NBR 8689. **Veículos rodoviários automotores leves - Combustíveis para ensaio - Requisitos.** 2012.

ALMEIDA, T.; SOARES, S.; REIS, M. N. E. **Fracionamento de coast down de veículos automotivos.** Campina Grande: VI Congresso Nacional de Engenharia Mecânica - CONEM, 2010.

ANDRADE, L. **Um passo à frente contra as emissões.** Blog: O Carreteiro. Disponível em <<http://www.ocarreteiro.com.br/revista/um-passo-frente-contra-as-emissoes/>> acesso em 25/04/2017, 2012.

AUTO ESPORTE. **Conheça principais pontos do programa de incentivo às montadoras, o Rota 2030.** Disponível < <https://g1.globo.com/carros/noticia/conheca-principais-pontos-do-programa-de-incentivo-as-montadoras-o-rota-2030.ghtml>> em acesso em 12/07/2018. 2018.

BARBOSA, T. A. F. **Pneu verde - Desafios para equilibrar conforto, segurança e baixo consumo de combustível.** Monografia (Especialização em Engenharia Automotiva) - Escola de Engenharia de Mauá, São Caetano do Sul, 2013.

BARROS NETO, B. D.; SCARMINIO, I. S.; BRUNS, R. E. **Como fazer experimentos: pesquisa e desenvolvimento na ciência e na indústria.** Campinas: Editora da Unicamp, 2001.

BASTOS, R. F. **Sistema de gerenciamento para carga e descarga de baterias (chumbo-ácido) e para busca do ponto de máxima potência gerada em painéis fotovoltaicos empregados em sistemas de geração distribuída.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.

BOSCH. **Bombas de combustível, componentes e válvulas de injeção**. Disponível em < <http://vdm.com.br/v1/wp-content/uploads/2013/11/BOSCH-INJECAO.pdf> > acesso em 02/12/2018 às 19:23, 2011.

BOSCH. **Alternadores, motores de partida e principais componentes**. Disponível em < http://br.bosch-automotive.com/media/parts/download_2/motores_eletricos/Cat_Linha_Eletrica_RM_2015-2016_LowRes.pdf > acesso em 01/12/2018 às 09:23. 2015.

BOSCH, R. **Manual de tecnologia automotiva**. 25 ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2005.

BRASIL. **Lei n.º 12.715, de 7 de setembro de 2012, institui o Programa de Incentivo à Inovação Tecnológica e Adensamento da Cadeia Produtiva de Veículos Automotores**. 2012.

CAMARA, M. A.; PERES, B. R.; CHRISITANINI, R. Z. **Óleos lubrificante automotivos**. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" - Faculdade de Engenharia de Bauru, 2010.

CANALE, A. C. **Automobilística**. São Paulo: Érica, 1989.

CARDOSO, J. C. S. **Estudo das melhores práticas sobre a vantagem tecnologia da transmissão automática de veículos de passeio com relação ao consumo de combustível**. Monografia (Especialização em Engenharia Automotiva) - Instituto Mauá de Tecnologia, São Caetano do Sul, 2012.

CENDRON, M. **PWM (Pulse Width Modulation ou Modulação de Largura de Pulso)** - Apostila. Luzerna, 2017.

COIMBRA, C. D. L. **Análise da influência do coeficiente aerodinâmico, resistência ao rolamento de pneus, relações de transmissão e massa no consumo de combustível de automóveis**. Trabalho de conclusão de curso (Especialização em Engenharia automotiva) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011.

CONPET. **Lei da Eficiência Energética**. Disponível em < http://www.conpet.gov.br/portal/conpet/pt_br/conteudo-gerais/lei-de-eficiencia-energetica-1.shtml > acesso em 02/09/2017 às 16:32, 2012a.

CONPET. **Marcos legais**. Disponível em < http://www.conpet.gov.br/portal/conpet/pt_br/conteudo-gerais/lei-de-eficiencia-energetica-1.shtml > acesso em 02/04/2017 às 08:52, 2012b.

CONPET. **Programa Brasileiro de Etiquetagem Veicular**. < http://www.conpet.gov.br/portal/conpet/pt_br/pagina-inicial.shtml > Disponível em acesso em 27/04/2017 às 10:29, 2016.

EPA, E. P. A. **Fuel Economy Labeling of Motor Vehicle Revisions to Improve Calculation of Fuel Economy Estimates**. Environmental Protection Agency, United States, 2006.

EZELLINER, R. **Análise sobre redução de ruído em alternadores automotivos**. Monografia (Especialização em Engenharia automotiva) - Instituto Mauá de Tecnologia, São Caetano do Sul, 2011.

FENDER NETO, J. **Estudo da influência do escalonamento de marchas no consumo de combustível de um ônibus urbano**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Automobilística) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2010.

FONSECA, N.; CASANOVA, J.; VALÉS, M. **Influence of the stop/start system on CO2 emission of a diesel vehicle in urban traffic**. Transportation Research Part D, n. 16, p. 194-200, 2011.

FORD. **Novo Ford Ecosport: como funciona a grade com controle ativo, exclusiva na categoria**. Disponível em < <https://media.ford.com/content/fordmedia/fsa/br/pt/news/2017/11/17/novo-ford-ecosport--como-funciona-a-grade-com-controle-ativo--ex.html> > acesso em 12/02/2018, 2017.

FOX, R. W.; PRITCHARD, P. J.; MCDONALD, A. T. **Introdução à mecânica dos fluidos**. 7 ed. LTC, 2013.

FREITAS, R. F. D. S.; OLIVEIRA, A. P. L. R. D.; SILVA, M. E. S. R.; SOUSA, R. G. D.; ALVES, A. G. D. O.; ERBETTA, C. D. C.; LASTRE, L. F. M. **Estudo reológico de óleos lubrificantes automotivos por meio de reometria**. p. 427-433 . In: In Anais do XXI Simpósio Internacional de Engenharia Automotiva — SIMEA 2013. São Paulo: Blucher, ISSN 2357-7592, DOI 10.5151/engpro-simea-PAP58, 2014.

GALI, M. R. **Modelo analítico de resistência ao rolamento de pneus de carga**. Dissertação (Mestrado em Engenharia mecânica) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2015.

GILLESPIE, T. D. **Fundamentals of vehicle dynamics**. 1 ed. SAE International United States of America, 1992.

GOMES, U. R. **Otimização do processo de laminação a frio através de planejamento de experimentos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

GUIMARÃES, V. T. P. **Avaliação da redução de consumo de combustível de um automóvel com a utilização de um alternador inteligente**. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017.

GUM, I. **Avaliação de dados de medição: guia para a expressão de incerteza de medição**. Rio de Janeiro: Tradução INMETRO. 1ª Edição Brasileira, 2008.

HEYWOOD, J. B. **Internal combustion engine fundamentals**. MCGRAW-HILL, 1988.

HIGA, H. Y. **Estudo e proposição para redução de consumo do motor flex fuel**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2011.

HIRATA, T. **Rota 2030 não está maduro e não tem prazo para sair, diz subchefe da Casa Civil**. Folha de São Paulo. Disponível em < <https://www1.folha.uol.com.br/mercado/2018/03/rota-2030-nao-esta-maduro-e-nao-tem-prazo-para-sair-diz-subchefe-da-casa-civil.shtml> > acesso em 13/03/2018, 2018.

IPEA, I. D. P. E. A. **Políticas de inovação pelo lado da demanda no Brasil**. Brasília, Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada, 2017.

JALLES, P. A. **Avaliação da classificação de eficiência energética do Programa Brasileiro de Etiquetagem de Pneus em um veículo de passeio**. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017.

LOPES, R. D. S.; ARAÚJO, P. C. S. D.; SOARES, S. M. C.; PUJATTI, F. J. P.; " **Revisão sobre uso de sílica nos pneus automotivos para redução de consumo de combustível**. p. 582-591 . In: São Paulo: Blucher, 2017a.

LOPES, R. D. S.; ARAÚJO, P. C. S. D.; SOARES, S. M. C.; PUJATTI, F. J. P. **Benefícios do sistema Start stop no consumo de combustível veicular e emissões de C2: revisão da literatura**. São Paulo: p. 607-616. In: São Paulo: Blucher, 2017b.

LOPES, R. D. S.; SILVA, S. M. B; ARAÚJO, P. C. S. D.; PUJATTI, F. J. P. **Análise da Eficiência Energética da Frota de Veículos Leves no Brasil**. p. 592-606. In: São Paulo: Blucher, 2017c.

MAHLE. **Manual técnico: Curso Mahle metal leve motores de combustão interna**. Disponível em <<https://www.mahle-aftermarket.com/media/local-media-latin-america/download-center/technical-materials/2016-04-19-manual-curso-de-motores-2016-2.pdf>> acesso em 03/11/2017 às 09:29, 2012.

MARQUES, C. F. D. F. **Estudo e análise do sistema de arranque e paragem automática do motor no automóvel**. Dissertação (Mestrado em Engenharia mecânica) - Universidade de Porto, Porto, 2009.

MDIC, M. D. D. I. E. C. E. **Portaria N° 397, de 11 de Agosto de 2015**. 2015.

MDIC, M. D. I. C. E. E. S. **Ministro Marcos Pereira lança Rota 2030 - Mobilidade e Logística**. Disponível em <<http://www.mdic.gov.br/noticias/2447-ministro-marcos-pereira-lanca-rota-2030-mobilidade-e-logistica>> acesso em 10/03/2018, 2017.

MONTEIRO, L. G. D. C. **Avaliação da influência da utilização de um alternador com desacoplamento mecânico no consumo energético e emissão de CO₂**. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017.

MONTGOMERY, D. **Design and Analysis of Experiments**. John Wiley & Sons, 2004.

NACIF, G. C. L. **Análise de sistemas de direção para veículos leves e o impacto das melhorias na eficiência energética no Programa Brasileiro de Etiquetagem Veicular**. Dissertação - Mestrado em Engenharia de Energia - Universidade Federal de São João Del-Rey, São João Del-Rey, 2014.

NASCIMENTO, F. S. D.; STIVAL, G. L.; FONSECA, M. S. P. **Estudo de viabilidade de desenvolvimento de um gerador eólico a partir de componentes de mercado**. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia elétrica) - Universidade tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

NAUNHEIMER, H.; BERTSCHE, B.; RYBORZ, J.; NOVAK, W. **Automotive transmissions: Fundamentals, selection, design and application**. Springer Science & Business Media, 2011.

NULLE, L. **Sistemas de treinamento para a tecnologia automotiva**. Disponível em <https://www.lucas-nuelle.com.br/index.php/fuseaction/download/lrn_file/katalog-kfz_ptbr.pdf> acesso em 08/05/2017, 2015.

OLIVEIRA, C. C. **Estudo das relações de marchas de uma transmissão automatizada com foco na melhoria de conforto e consumo de combustível**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.

PAPAIIOANNOU, I. N. **Estudo e eletrônica embarcada automotiva e sua situação atual no Brasil**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Automotiva) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

PASQUINI, J.; PENACHIN, H.; LANDGRAF, F. **Redução de emissões e consumo de combustível - Alternadores "High Efficiency" com redução de peso e materiais de perda**

magnética reduzida. São Paulo: XVII Simpósio Internacional de Engenharia Automotiva, 2009.

PENTEADO, O. B. **Projeto e instalação de tanque de combustível flexível em automóveis de passeio.** Trabalho de conclusão de curso (Mestrado em Engenharia automotiva) - Escola Politécnica de São Paulo, São Paulo, 2009.

PEREIRA, W. B. **Estudo da viabilidade do uso de alternadores como motores em veículos elétrico.** Projeto (Graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

PEREIRA, R. V. M. **Análise da implementação do protocolo LIN em Hardware e em Software.** Dissertação (Mestrado em Computação aplicada) - Universidade do Vale do Itajaí, São José, 2011.

PLANALTO. **Presidente lança programa Rota 2030 para impulsionar setor automobilístico.** Disponível em <<http://www2.planalto.gov.br/acompanhe-planalto/releases/2018/07/temer-lanca-programa-2030-para-impulsionar-setor-automobilistico>> acesso em 10/07/2018 às 14:34, 2018.

POMILIO, J. A. **Eletrônica de Potência - Apostila.** Universidade Estadual de Campinas - Faculdade de Engenharia Elétrica e de Comunicação - Departamento de Sistemas e Energia, Campinas, 2014.

QUIM, N. **Metodologia de simulação aplicada ao sistema de arrefecimento veicular.** Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

RHODIA. **Sílica de alto desempenho para pneus verdes é tema principal de palestras técnicas da Rhodia.** Expobor e Pneu Show 2016, 2016.

RODRIGUES, T. D. M. **Downsizing em motores de combustão interna:** Uma abordagem de inovação tecnológica. Monografia de Especialização - Engenharia Automotiva - Instituto de Tecnologia Mauá, São Caetano do Sul, 2014.

ROSILHO, V. **Diminuição do arrasto aerodinâmico e economia de combustível de um veículo devido a substituição dos espelhos retrovisores externos por câmeras.** Monografia (Especialização em Engenharia Automotiva) - Instituto Mauá de Tecnologia, São Caetano do Sul, 2013.

ROVAI, F. F. **Desgaste e corrosão de bombas de combustível com mistura de álcool e gasohol.** Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

SAE J2452. **Stepwise coastdown methodology for measuring tire rolling resistance.** 1999.

SAE, E. A. **Aerodinâmica**. 2012.

SILVA, A. R. D.; ANDRADE, D. F. D. S.; SANTOS, F. F. D.; SILVA, J. J. D.; SANTOS, J. L. V. D. **Sistema Start/Stop**. V Simpósio Nacional de Ciências e Meio Ambiente - UniEvanvéllica, 2014.

SILVA, E. R. D. **Análise do crescimento da motorização no Brasil e seus impactos na mobilidade urbana**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

SILVA, F. V. **Panorama e perspectivas do etanol lignocelulósico**. Revista Liberato, v. 13, n. 20, p. 43-58, 2012.

SILVA, M. C. C. D. **O impacto ambiental na redução do consumo de combustível e emissão de poluentes do sistema start stop**. Monografia (Especialização em engenharia automotiva) - Instituto Mauá de Tecnologia, São Caetano do Sul, 2013.

SMITH, C. B. **Análise da difusão de novas tecnologias automotivas em prol da eficiência energética na frota de novos veículos leves no Brasil**. Tese (Doutorado em Planejamento energético) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

SOEIRO, L. G. G. **Simulação do sistema de energia de um veículo**. Fiat Automóveis, 2009.

SOUSA, B. S. D.; GONÇALVES, H. H. A. **Análise da Aerodinâmica de carros populares**. Revista Vozes dos Vales: Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Diamantina, 2013.

VERZIMIASSI, W. **Análise do sistema Stop/start do motor**. Monografia (Especialização em engenharia automotiva) - Instituto Mauá de Tecnologia, São Caetano do Sul, 2012.

VICENTE, P. C. **Uso de modelos de qualidade do ar para a avaliação do efeito do PROCONVE entre 2008 e 2010 na região metropolitana do Rio de Janeiro**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

VIDAL, M. N. **Economia de combustível vai muito além da evolução do motor**. site Autos Segredos, Disponível em < <https://www.autossegedos.com.br/materias-especiais-3/economia-de-combustivel-vai-muito-alem-da-evolucao-do-motor/> > acesso em 04/06/2017 às 20:32, 2017.

WEIHERMANN, H. W. **Estudo sobre aplicação de transmissão continuamente variável para veículos de pequeno porte**. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Automotiva) - Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2015.

ANEXO I - MÉTODO PARA DETERMINAÇÃO DA INCERTEZA

MÉTODO PARA DETERMINAÇÃO DA INCERTEZA DE MEDIÇÃO EM ENSAIOS DE EMISSÕES DE ESCAPAMENTO EM VEÍCULOS LEVES NO LABORATÓRIO DE EMISSÕES VEICULARES DO CETEC

Março/2006

Pompílio Furtado Filho
Priscila Guimarães Dias

RESUMO

É descrito o método, utilizado no Laboratório de Emissões Veiculares do CETEC, para determinação da incerteza em ensaios de emissões de escapamento em veículos leves segundo a norma ABNT-NBR-6601. Procurou-se usar, o máximo possível, a metodologia clássica indicada para este tipo de cálculo pelo GUM. Na determinação da incerteza da massa de cada componente por fase do ensaio foi utilizada a substituição de variáveis proposta por Tadeu C.C.Leite (Cenpes-Petrobrás). Foi utilizado um método de derivação numérica para a determinação dos coeficientes de sensibilidade do Fator de Correção de Umidade (Fu). O método aqui descrito foi implementado no laboratório do CETEC e é utilizado através de uma planilha de computador para o cálculo da incerteza do resultado de cada componente das emissões.

1 INTRODUÇÃO

Este trabalho tem como objetivo descrever o método para cálculo da incerteza do resultado de ensaios de emissões de escapamento, em veículos rodoviários leves, utilizado no Laboratório de Emissões Veiculares do CETEC. Esse tipo de ensaio segue a Norma ABNT-NBR 6601⁽³⁾, que indica os procedimentos para sua realização. Procurou-se, sempre que possível, seguir a metodologia indicada pelo GUM⁽¹⁾, isto é, o cálculo da incerteza do resultado a partir dos coeficientes de sensibilidade desse resultado em relação a todas suas variáveis. Como essa utilização direta geraria expressões extremamente complexas dos coeficientes do resultado final, por não se tratar de um cálculo simples usando uma relação de dependência, mas uma cadeia de cálculos, optou-se por uma substituição de variáveis na etapa intermediária dos cálculos onde são determinadas as massas de cada componente por fase. Essa substituição de variáveis foi sugerida por Tadeu C. C. de Melo⁽⁴⁾ em seu trabalho desenvolvido no CENPES, PETROBRÁS.

2. CÁLCULO DA INCERTEZA DO RESULTADO DE EMISSÕES

A incerteza final a ser apresentada para o resultado de um ensaio de emissões é a Incerteza Combinada Expandida, que normalmente é chamada apenas por Incerteza Expandida ("U"), e que é calculada pela expressão apresentada a seguir:

$$U = ku_c \quad (1)$$

onde: k = fator de abrangência, para o qual, no laboratório do CETEC, é usado o valor 2;
 u_c = Incerteza Padrão Combinada.

A Incerteza Padrão Combinada é calculada pela expressão apresentada abaixo a partir de dois componentes, o instrumental (Incerteza Padrão Instrumental, u_I) que é obtida pela combinação parcial das incertezas dos instrumentos e instalações do laboratório e a repetitividade (Repetitividade Padrão, u_R).

$$u_c = \sqrt{u_I^2 + u_R^2} \quad (2)$$

Para o cálculo da Incerteza Padrão Instrumental são utilizados valores derivados de certificados de calibração, dados dos fabricantes, alguns experimentos feitos no próprio laboratório e algumas estimativas. A maior parte dos valores usados para seu cálculo não é obtida estatisticamente e, portanto, este componente corresponde à incerteza do tipo “B”.

A Repetitividade Padrão é calculada por um processo estatístico e, portanto, corresponde à componente da incerteza do tipo “A”. Seu cálculo é feito pela expressão abaixo, conforme sugerido pelo GUM.

$$u_R = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (3)$$

onde: σ = desvio padrão da amostragem, e
 n = número de amostras.

Quando for realizado um número de ensaios maior que 3 poderá ser utilizada a repetitividade calculada a partir dessa amostragem. No caso de apenas um ou dois ensaios são utilizados resultados de repetitividade obtidos anteriormente com veículo similar.

No próximo capítulo é apresentado o desenvolvimento dos métodos para o cálculo da componente instrumental da incerteza.

3. CÁLCULO DA INCERTEZA PADRÃO INSTRUMENTAL (INCERTEZA DO TIPO “B”)

Para o cálculo da incerteza padrão combinada da parte instrumental do laboratório são seguidos os métodos recomendados pelo GUM⁽¹⁾, onde, para uma grandeza ou resultado $Y = f(x_1, x_2, \dots, x_i)$ a incerteza de Y será calculada por:

$$u(Y) = \sqrt{\sum C_i^2 u(x_i)^2} \quad (4)$$

onde C_i é o Coeficiente de Sensibilidade da grandeza Y em relação a cada variável x_i . Este coeficiente é calculado por:

$$C_i = \frac{\partial Y}{\partial x_i} \quad (5)$$

3.1 Volume do Gás Diluído em cada Fase do Ensaio

O volume do gás diluído produzido por cada fase de um ensaio é medido por um conjunto de três bocais sônicos. A expressão de seu cálculo é:

$$V = \frac{K_v \cdot P \cdot t}{\sqrt{T}} \quad (6)$$

onde: V = volume [m³];
K_v = constante do bocal [m³ K^{0,5}Pa⁻¹]
P = Pressão absoluta na entrada do bocal [Pa]
t = tempo [s]
T = temperatura absoluta [K]

Calculando o coeficiente de sensibilidade de cada uma dessas variáveis através das derivadas parciais desta equação, obtém-se:

$$C_{K_v} = \frac{V}{K_v} \quad (7)$$

$$C_P = \frac{V}{P} \quad (8)$$

$$C_t = \frac{V}{t} \quad (9)$$

$$C_T = \frac{V}{2T} \quad (10)$$

A incerteza padrão do volume será então calculada combinando as incertezas dos componentes através da substituição dos coeficientes de sensibilidade das variáveis na equação (4), obtendo-se a seguinte expressão:

$$u(V) = V \cdot \sqrt{\left(\frac{u(K_v)}{K_v}\right)^2 + \left(\frac{u(P)}{P}\right)^2 + \left(\frac{u(t)}{t}\right)^2 + \left(\frac{u(T)}{2T}\right)^2} \quad (11)$$

Esta é a expressão usada na planilha para o cálculo da incerteza padrão do volume de gás diluído medido pelo sistema do CVS (Constant Volume Sampler) do laboratório.

3.2 Massa de Cada Componente

De acordo com a norma NBR 6601, que regulamenta o ensaio de emissões de escapamento, a massa M de cada componente (em gramas) deve ser calculada pelas seguintes expressões:

$$M = 10^{-6} V.D. \left[Cat - Cab \left(1 - \frac{1}{RD} \right) \right] \quad \text{para THC, metano e CO} \quad (12)$$

$$M = 10^{-6} Fu.V.D. \left[Cat - Cab \left(1 - \frac{1}{RD} \right) \right] \quad \text{para NOx} \quad (13)$$

$$M = 10^{-2} V.D. \left[Cat - Cab \left(1 - \frac{1}{RD} \right) \right] \quad \text{para CO}_2 \quad (14)$$

sendo D = densidade [g/m^3], que, de acordo com a norma NBR-6601, apresenta os seguintes valores para temperatura de 20°C e pressão de 1 at:

576,8 para THC
666,8 para metano
1913 para NOx
1164 para CO
1830 para CO_2

Cat = concentração do componente na amostra, com as seguintes unidades:

[ppm], para metano, CO e CO_2
[ppmC], para THC
[volume %], para CO_2

Cab = concentração do componente no ar ambiente usado na diluição, nas mesmas unidades

O fator Fu é chamado Fator de Correção da Umidade e sua definição será apresentada posteriormente neste trabalho. A grandeza RD é chamada Razão de Diluição e, de acordo com a norma NBR-6601, deve ser calculada pela seguinte expressão:

$$RD = \frac{13,4}{Cat_{\text{CO}_2} + (Cat_{\text{HC}} + Cat_{\text{CO}})10^{-4}} \quad (15)$$

O número 13,4 é o valor considerado, na mesma norma, para a concentração de CO_2 na combustão da gasolina brasileira em condições estequiométricas.

3.2.1 Cálculo da Incerteza Padrão da nova Variável RD^{-1}

De acordo com método sugerido por Tadeu C. C. de Melo⁽⁴⁾ para o cálculo da incerteza, com o objetivo de sua simplificação, será criada uma variável RD^{-1} :

$$RD^{-1} = \frac{1}{13,4} [Cat_{CO_2} + (Cat_{HC} + Cat_{CO})10^{-4}] \quad (16)$$

Os coeficientes de sensibilidade de RD^{-1} são calculados pela derivada parcial de sua expressão em relação à cada variável às quais depende.

$$C_{CO_2} = \frac{1}{13,4} \quad (17)$$

$$C_{HC} = C_{CO} = \frac{10^{-4}}{13,4} \quad (18)$$

Portanto, usando estes valores em (1), obtém-se a expressão para o cálculo da incerteza padrão da variável RD^{-1} , $u(RD^{-1})$, em função das incertezas padrão de cada componente, para uso na planilha de cálculo:

$$u(RD^{-1}) = \frac{1}{13,4} [u(Cat_{CO_2})^2 + (u(Cat_{HC})^2 + u(Cat_{CO})^2).10^{-8}] \quad (19)$$

3.2.2 Cálculo da incerteza padrão da nova variável CabRD

É, ainda por sugestão do mesmo autor, criada uma nova variável:

$$CabRD = Cab \left(1 - \frac{1}{RD} \right) \quad (20)$$

Calculando as derivadas parciais, os coeficientes de sensibilidade desse novo parâmetro em relação às variáveis que o formam (Cab e RD^{-1}) são os seguintes:

$$C_{Cab} = 1 - RD^{-1} \quad (21)$$

$$C_{RD^{-1}} = -Cab \quad (22)$$

Da mesma forma que acima, obtém-se a equação para cálculo da incerteza padrão da nova variável CabRD:

$$u(CabRD) = \sqrt{u(Cab)^2 (1 - RD^{-1}) + u(RD^{-1})^2 Cab^2} \quad (23)$$

Que, através de manipulações algébricas, pode ser escrita como:

$$u(CabRD) = Cab(1 + RD^{-1}) \sqrt{\left(\frac{u(Cab)}{Cab}\right)^2 + \left(\frac{u(RD^{-1})}{1 - RD^{-1}}\right)^2} \quad (24)$$

Que é a expressão utilizada na planilha de cálculo para a incerteza padrão da variável CabRD.

3.2.3 Cálculo da Incerteza da Massa de cada Componente por Fase

Substituindo na expressão da massa de cada componente (9) a definição da variável CabRD como definida em (20), obtém-se:

$$M = 10^{-6} V.D.(Cat - CabRD) \quad (25)$$

Através das derivadas parciais desta função em relação às suas variáveis, obtém-se os seguintes coeficientes de sensibilidade:

$$C_{Cat} = \frac{M}{Cat - CabRD} \quad (26)$$

$$C_{CabRD} = -\frac{M}{Cat - CabRD} \quad (27)$$

$$C_V = \frac{M}{V} \quad (28)$$

Combinando esses coeficientes de sensibilidade, obtém-se a expressão para a incerteza padrão da massa:

$$u(M) = \sqrt{\left(\frac{M}{Cat - CabRD}\right)^2 u(Cat)^2 + \left(\frac{M}{Cat - CabRD}\right)^2 u(Cab)^2 + \left(\frac{M.I(V)}{V}\right)^2} \quad (29)$$

Que, substituindo a expressão da definição da variável CabRD e rearranjando algebricamente, pode ser expressa como:

$$u(M) = M \sqrt{\frac{u(Cat)^2 + u(CabRD)^2}{[Cat - Cab(1 - RD^{-1})]^2} + \left(\frac{u(V)}{V}\right)^2} \quad (30)$$

Esta é a expressão para cálculo da incerteza padrão da massa dos componentes (para THC, CO, metano e CO₂).

Para o caso do NO_x, é adicionado o termo referente à incerteza do Fator de Correção de Umidade (Fu), sendo que a incerteza do resultado de sua massa fica com a seguinte expressão:

$$u(M_{NO_x}) = M \sqrt{\frac{u(Cat)^2 + u(CabRD)^2}{[Cat - Cab(1 - RD^{-1})]^2} + \left(\frac{u(V)}{V}\right)^2 + \left(\frac{u(Fu)}{Fu}\right)^2} \quad (31)$$

3.3 Cálculo da Incerteza do Fator de Correção da Umidade

Pela Norma NBR-6601, o Fator de Correção da Umidade é definido como:

$$Fu = \frac{1}{1 - 0,0329(H - 10,71)} \quad (32)$$

A umidade absoluta (*H*) é calculada pela seguinte expressão:

$$H = \frac{6,211R_{ab} \cdot P_d}{P_{ba} - \frac{P_d R_{ab}}{100}} \quad (33)$$

Para esses fatores numéricos dessas expressões as unidades dessas variáveis devem ser as seguintes:

H = umidade absoluta [g/kg]

R_{ab} = umidade relativa [%]

P_d = pressão de vapor do ar saturado [Pa]

P_{ba} = pressão barométrica [Pa]

No programa de cálculo do resultado e incertezas de um ensaio de emissões de escapamento do Laboratório de Emissões Veiculares do CETEC a pressão de vapor do ar saturado (*P_d*) é calculada através de uma tabela de dados termodinâmicos que relaciona essa grandeza em função da temperatura, com intervalos de 0,1°C. A cópia da planilha de cálculo apresentada no Anexo mostra a relação desses dados numéricos.

Como a incerteza depende desses dados numéricos (e não apenas de equações), optou-se pelo cálculo de coeficientes de sensibilidade também numéricos, o que foi feito seguindo a metodologia sugerida pelo EA-4/02² (seção 4.2). Em cada uma das variáveis de entrada (temperatura, umidade relativa e pressão barométrica) são feitas duas variações, uma positiva e outra negativa e igual ao valor da incerteza de cada variável (+*u*(*x_i*) e -*u*(*x_i*)). O valor de *Fu* é calculado em cada um desses pontos. O coeficiente de sensibilidade é calculado pela diferença entre esses dois valores dividida pelo intervalo da variação, conforme a seguinte expressão:

$$C(x_i) = [Fu(x_i + u(x_i)) - Fu(x_i - u(x_i))] / 2u(x_i) \quad (34)$$

O resultado para esses coeficientes de sensibilidade é um valor numérico que dependerá dos valores das variáveis. Como um exemplo, para um ensaio realizado no veículo padrão do laboratório do CETEC, nas condições de temperatura, pressão atmosférica e umidade relativa do dia do ensaio, os seguintes valores foram obtidos:

$$C_T = 0,025 \text{ unidade de } F_u / ^\circ\text{C}$$

$$C_{Pba} = 4,5 \cdot 10^{-6} \text{ unidade de } F_u / \text{Pa}$$

$$C_{Rab} = 0,008 \text{ unidade de } F_u / 1\% \text{ de umidade relativa}$$

3.4 Incerteza Instrumental do Resultado Final Ponderado para cada Componente

De acordo com a norma NBR 6601, o resultado final de um ensaio de emissão de escapamento em unidades de [g/km] é calculado pela ponderação das massas de cada fase de acordo com a seguinte expressão:

$$M_{pond} = 0,43 \left(\frac{M_{TF} + M_E}{D_{TF} + D_E} \right) + 0,57 \left(\frac{M_{TQ} + M_E}{D_{TQ} + D_E} \right) \quad (35)$$

Onde as massas M e as distâncias D de cada fase têm os seguintes índices:

TF transiente frio (1ª fase)

E estabilizada (2ª)

TQ transiente quente (3ª)

Calculando-se as derivadas parciais, os coeficientes de sensibilidade de cada uma das variáveis (massa e distância por fase) são os seguintes:

$$C_{MTF} = \frac{0,43}{D_{TF} + D_E} \quad (36)$$

$$C_{MTQ} = \frac{0,57}{D_{TQ} + D_E} \quad (37)$$

$$C_{MTF} = \frac{0,43}{D_{TF} + D_E} + \frac{0,57}{D_{TQ} + D_E} \quad (38)$$

$$C_{DTF} = -\frac{0,43(M_{TF} + M_E)}{(D_{TF} + D_E)^2} \quad (39)$$

$$C_{DTQ} = -\frac{0,57(M_{TQ} + M_E)}{(D_{TQ} + D_E)^2} \quad (40)$$

$$C_{DTE} = -\frac{0,43(M_{TF} + M_E)}{(D_{TF} + D_E)^2} - \frac{0,57(M_{TQ} + M_E)}{(D_{TQ} + D_E)^2} \quad (41)$$

Esses coeficientes de sensibilidade são utilizados em planilha de Excel de cálculo de incertezas. O quadro abaixo mostra, como exemplo, a planilha onde é calculada a incerteza combinada do resultado ponderado para o metano.

Cálculo da Incerteza padrão combinada da massa ponderada de metano					
Variável (x)	Valor	Incerteza (u _x)	Expressão do Coeficiente de Sensibilidade (C)	Valor de C.	Inc.(u _x .C)
MTF[g]	0,215392352	0,014656566	0,43 / (DTF+DE)	0,035902146	0,0005262
ME[g]	0,103311758	0,023872876	0,43 / (DTF+DE) + 0,57 / (DTQ+DE)	0,083517216	0,0019938
MTQ[g]	0,161181221	0,01416343	0,57 / (DTQ+DE)	0,04761507	0,0006744
DTF[km]	5,769	0,066616628	- 0,43(MTF+ME) / (DTF+DE) ²	-0,000955345	-6,364E-05
DE[km]	6,208	0,071685912	-0,43(MTF+ME)/(DTF+DE) ² -0,57(MTQ+ME)/(DTQ+DE) ²	-0,002007375	-0,0001439
DTQ[km]	5,763	0,066547344	- 0,57(MTQ+ME) / (DTQ+DE) ²	-0,00105203	-7,001E-05
Incerteza Padrão Combinada (Raiz da soma dos quadrados) [g/km]					0,0021764

Este cálculo representa a Incerteza Padrão Instrumental (*u_i*) a ser utilizada na expressão (2) para o cálculo da Incerteza Padrão Combinada final, ou, como normalmente é chamada, Incerteza Combinada que, por sua vez, será utilizada na expressão (1) para o cálculo da Incerteza Expandida, que é a incerteza a ser relatada pelo laboratório.

3. INCERTEZA DO CONSUMO E RENDIMENTO

De acordo com a norma NBR-7024, considerando o volume de água e o volume de álcool no gás iguais a zero, tem-se a seguinte expressão para o cálculo do consumo em unidades de litros/100 km.:

$$Cons[litros/100km] = \frac{(a.M_{THC} + b.M_{CO} + c.M_{CO_2}).100}{d.Perc_{GAS} + e.Perc_{ALC}} \quad (42)$$

Sendo:

- a = 0,8656
- b = 0,5214
- c = 0,4288
- d = 6,4487
- e = 4,1102

Os termos do denominador são, respectivamente, as percentagens de gasolina e álcool no combustível.

Através da derivação da expressão acima, os coeficientes de sensibilidade para o cálculo da incerteza do consumo são os seguintes:

$$C_{MTHC} = \frac{100.a}{d.Perc_{GAS} + e.Perc_{ALC}} \quad (43)$$

$$C_{MCO} = \frac{100.b}{d.Perc_{GAS} + e.Perc_{ALC}} \quad (44)$$

$$C_{MCO2} = \frac{100.c}{d.Perc_{GAS} + e.Perc_{ALC}} \quad (45)$$

$$C_{PercGAS} = -\frac{d.Cons}{d.Perc_{GAS} + e.Perc_{ALC}} \quad (46)$$

$$C_{PercALC} = -\frac{e.Cons}{d.Perc_{GAS} + e.Perc_{ALC}} \quad (47)$$

Para o rendimento (em km/litro), cuja expressão é $Rend = 100/Cons$, a derivação fornece a seguinte expressão geral para os coeficientes de sensibilidade em relação às variáveis, em função dos coeficientes de sensibilidade de cada uma dessas mesmas variáveis para o consumo, mostrados acima.

$$C_x^{Rend} = -\frac{C_x^{Cons}}{Cons.Rend} \quad (48)$$

4. CÁLCULO DA INCERTEZA DOS RESULTADOS DA ANÁLISE DO GÁS DE ESCAPAMENTO

Para a realização dos cálculos mostrados no Item 3, é necessário realizar a avaliação dos dados de incerteza padrão das análises dos componentes do gás de escapamento diluído. O método para o cálculo dessa incerteza dependerá do tipo de analisador de gás que o laboratório utiliza e o tipo de verificação que esses equipamentos fazem. Geralmente essa incerteza padrão é calculada pela combinação, pela raiz da soma dos quadrados das várias incertezas que a formam. No caso particular do laboratório do CETEC a equação com os componentes que a formam é mostrada a seguir:

$$u(ag) = \sqrt{u(GP)^2 + u(rep)^2 + u(res)^2 + u(div)^2 + u(lin)^2} \quad (49)$$

As variáveis que formam esta equação são definidas a seguir:

$u(GP)$ - Incerteza padrão da análise do gás padrão

Esta incerteza virá do certificado de análise do gás padrão emitido por seu fornecedor. Como a incerteza fornecida é a expandida, deverá ser dividida por seu “k”, que, neste caso específico, por ser um valor obtido estatisticamente, toma o valor de 2. Esta incerteza é tomado em sua unidade e é considerada fixa, isto é: atua com o mesmo valor dentro da faixa daquele gás padrão, independentemente da concentração, e, por esta razão, influencia mais quando a essa é de valor baixo.

$u(rep)$ - Incerteza padrão da repetitividade do analisador

São realizados 8 amostras de análise do gás padrão pelo analisador dentro de cada faixa. A repetitividade padrão do analisador, naquela faixa, é calculada como o desvio padrão dessas amostras em relação ao valor verdadeiro da concentração do gás, tomado como o valor da concentração constante de seu certificado de análise, como na expressão:

$$u(rep) = \frac{\sqrt{\sum (C_i - C_{cert})^2}}{n-1} \quad (50)$$

sendo: C_i a concentração em cada das 8 amostras;

C_{cert} a concentração obtida pelo fabricante do gás; e

n o número de amostras, que neste caso, toma o valor de 8.

Da mesma forma que no componente anterior, este valor também é tomado na unidade da análise e é o mesmo para cada concentração dentro de uma faixa, influenciando também diferentemente seus valores.

$u(res)$ - resolução do analisador

A resolução dos analisadores do laboratório do CETEC, que são digitais, é de 0,01 ppm para todos, à exceção do de dióxido de carbono, que é de 0,001 %.

$u(div)$ - Incerteza padrão da divisora de gás

Este valor é obtido do certificado de calibração da divisora, que indica uma incerteza expandida normalmente variando entre 2 e 3%. Como é tomada a incerteza padrão, o valor do certificado é dividido por seu “k”. Esta incerteza, diferente das três acima, age percentualmente, e, conseqüentemente, influencia de maneira uniforme, independente da concentração.

$u(lin)$ - Incerteza padrão da linearidade

No teste de linearidade dos analisadores de gás do laboratório do CETEC o sistema é considerado aceito quando o desvio da análise do gás padrão dividido não apresenta desvio maior que 2%. Este valor é tomado como a incerteza expandida da linearidade, sendo a padrão obtida dividindo este valor por $\sqrt{3}$. Da mesma maneira da incerteza da divisora, esta atua uniformemente, de maneira percentual, no valor da análise, independente da concentração.

BIBLIOGRAFIA

1. INMETRO, Guia para a Expressão da Incerteza de Medição (GUM), Edição Revisada, Agosto de 1998.
2. INMETRO, Versão Brasileira do Documento de Referência EA-4/02, “Expressão da Incerteza de Medição na Calibração, Janeiro de 1999.
3. ABNT, NBR 6601:2001, “Veículos rodoviários automotores leves – Determinação de hidrocarbonetos, monóxido de carbono, óxidos de nitrogênio e dióxido de carbono no gás de escapamento”
4. MELO, Tadeu C.C., “Implementação de Metodologia para Determinação de Incertezas de Medição nos Resultados de Ensaios de Emissões para Veículos Leves”, CENPES-Petrobrás, 2005.