CENTRO UNIVERSITÁRIO DA FEI

RAFAEL BRUNO BERTONCINI

ESTUDO DE MELHORIA DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE UM VEÍCULO FLEX FUEL NO CONTEXTO DO INOVAR-AUTO

São Bernardo do Campo
2014

RAFAEL BRUNO BERTONCINI

ESTUDO DE MELHORIA DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE UM VEÍCULO FLEX FUEL NO CONTEXTO DO INOVAR-AUTO

Dissertação de Mestrado apresentada ao Centro Universitário da FEI, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de mestre em Engenharia Mecânica, orientada pelo Prof. Dr. Agenor de Toledo Fleury.

São Bernardo do Campo
2014

Bertoncini, Rafael Bruno
Estudo de melhoria da eficiência energética de um veículo flex fuel no contexto do Inovar-Auto / Rafael Bruno Bertoncini. São Bernardo do Campo, 2014.
113 f. : il.

Dissertação de Mestrado - Centro Universitário da FEI.
Orientador: Prof. Dr. Agenor Toledo Fleury

1. Eficiência Energética. 2. Inovar-Auto. 3. Veículo Flex Fuel. I. Fleury, Agenor Toledo, orient. II. Título.

CDU 629.113

Centro Universitário da **FEI**

APRESENTAÇÃO DE DISSERTAÇÃO
ATA DA BANCA JULGADORA

PGM-10

Programa de Mestrado de Engenharia Mecânica

Aluno: Rafael Bruno Bertoncini **Matrícula:** 212304-0

Título do Trabalho: Estudo de melhoria da eficiência energética de um veículo flex fuel no contexto do inovar-auto.

Área de Concentração: Sistemas da Mobilidade

ORIGINAL ASSINADA

Orientador: Prof. Dr. Agenor de Toledo Fleury

Data da realização da defesa: 05/11/2014

A Banca Julgadora abaixo-assinada atribuiu ao aluno o seguinte:

APROVADO ☒ REPROVADO ☐

São Bernardo do Campo, 05 de Novembro de 2014.

MEMBROS DA BANCA JULGADORA

Prof. Dr. Agenor de Toledo Fleury

Ass.: _____

Prof. Dr. Roberto Bortolussi

Ass.: _____

Prof. Dr. Roberto Spinola Barbosa

Ass.: _____

VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO

ENDOSSO DO ORIENTADOR APÓS A INCLUSÃO DAS RECOMENDAÇÕES DA BANCA EXAMINADORA

_____

Aprovação do Coordenador do Programa de Pós-graduação

_____

Prof. Dr. Agenor de Toledo Fleury

A Deus e à minha amada esposa Ana Paula.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus queridos pais, Eva e Walter, pela criação e por terem me fornecido os meios através dos quais pude atingir os meus objetivos.

À minha amada esposa Ana Paula pelo incentivo e, acima de tudo, pela paciência.

Ao meu professor, orientador e amigo Agenor de Toledo Fleury por todo o suporte e auxílio durante o meu mestrado e dissertação.

À FEI que vem fazendo parte da minha formação pessoal e profissional desde a graduação em Engenharia Mecânica Automobilística, passando pela pós-graduação em Administração e Tecnologia Automotiva e culminando neste mestrado em Engenharia Mecânica.

Agradeço em especial ao colega de trabalho e amigo Rafael Licen Santos pela parceria que se iniciou em 2005 e vem gerando frutos até hoje. Sem a sua inestimável ajuda e experiência nos campos de simulação numérica, combustão e controle motor, eu jamais teria conseguido desenvolver este trabalho.

RESUMO

Este trabalho tem por objetivo apresentar um estudo de melhoria da eficiência energética de um veículo *Flex Fuel* por meio de diversas iterações de simulação numérica utilizando o código comercial GT-Suite® da Gamma Technologies. Um modelo matemático de dinâmica veicular 1D foi gerado para este veículo a partir de um *template* e simulado de acordo com as normas brasileiras NBR 6601 e NBR 7024, referentes respectivamente aos ciclos de rodagem urbano e rodoviário, para obter as curvas de consumo de combustível e, consequentemente, a eficiência energética. Os valores de consumo de combustível obtidos por simulação foram comparados aos dados experimentais deste veículo, aquisitados num dinamômetro de chassis, para a validação do modelo matemático. Uma vez validado este modelo, foi realizada uma análise de sensibilidade do compromisso consumo de combustível / desempenho de aceleração com o objetivo de listar os impactos de diversos parâmetros do veículo e do sistema de propulsão na eficiência energética, em comparação com os valores de base. Por fim, propostas de melhoria da eficiência energética foram apresentadas para este veículo de modo a enquadrá-lo no programa brasileiro de incentivo à inovação tecnológica e adensamento da cadeia produtiva de veículos automotores, o Inovar-Auto, que tem por objetivo melhorar a eficiência energética dos veículos produzidos no Brasil, dentre outros. Os resultados finais obtidos comprovaram que o objetivo do trabalho foi atingido.

Palavras chave: Eficiência energética. Veículo Flex Fuel. Inovar-Auto.

ABSTRACT

The purpose of this work is to present a study on the improvement of the energetic efficiency of a Flex Fuel vehicle through several numerical simulation iterations applying the commercial software GT-Suite® by Gamma Technologies. A 1D longitudinal vehicle dynamics model was generated from a template and simulated according to the Brazilian standards NBR 6601 and NBR 7024, which correspond to urban and highway cycles, in order to obtain the fuel consumption curves and the energetic efficiency. The simulated fuel consumption values were compared to the vehicle experimental ones, measured on a chassis dynamometer, to validate the model. Once the model was validated, a sensitivity analysis of the fuel consumption / acceleration performance trade-off was performed to investigate the impact of several vehicle and powertrain parameters on energetic efficiency, in comparison to the baseline values. Based on this analysis, energetic efficiency improvements were proposed so this vehicle could meet the new Brazilian standards. The results show that the purpose of this work was achieved.

Key words: Energetic efficiency. Flex Fuel vehicle. Inovar-Auto.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Poluentes locais 18
Figura 2 – Etiqueta Nacional de Conservação de Energia – veicular 27
Figura 3 – Ciclo urbano – NBR 6601: fases 1, 2 e 3 28
Figura 4 – Ciclo rodoviário – NBR 7024 29
Figura 5 – Esquema de um dinamômetro de chassis para teste de emissões 30
Figura 6 – Consumo energético pela massa média 32
Figura 7 – Consumo energético pela massa média – média do mercado nacional 2012 33
Figura 8 – Estrutura hierárquica da relação de transmissão de um trem de força 34
Figura 9 – Exemplo de um motor alternativo 35
Figura 10 – Injeção indireta de combustível (PFI) 35
Figura 11 – Injeção direta de combustível (GDI) 36
Figura 12 – Ignição espontânea 36
Figura 13 – Os quatro tempos de um motor alternativo a quatro tempos 37
Figura 14 – Os dois tempos de um motor alternativo a dois tempos 38
Figura 15 – Disposição interna dos cilindros para motores alternativos 38
Figura 16 – Diversos tipos de transmissões manuais de múltiplas relações 39
Figura 17 – Diversos tipos de transmissões automáticas de múltiplas relações 40
Figura 18 – Diversos tipos de transmissões continuamente variáveis 41
Figura 19 – Curva característica do motor em plena carga 42
Figura 20 – Curva de torque pela rotação do motor para diversas posições de pedal 43
Figura 21 – Curva de consumo específico de um motor do ciclo Otto 44
Figura 22 – Diagrama de tração pela velocidade para diferentes desnivelamentos 45
Figura 23 – Desempenho de subida por marcha pela velocidade do veículo 45
Figura 24 – Desempenho de aceleração por marcha pela velocidade do veículo 46
Figura 25 – Razão de compromisso entre o mínimo consumo e o máximo desempenho 47
Figura 26 – Gráficos de tração e rotação do motor pela velocidade para os passos geométrico e progressivo 50
Figura 27 – Disposições mais comuns do trem de força dos veículos de passeio 51
Figura 28 – Diversos tipos de engrenamentos para um diferencial 52
Figura 29 – Exemplo de uma transmissão manual de cinco marchas com diferencial 53
Figura 30 – Relação entre o coeficiente de atrito e a velocidade de deslizamento 54
Figura 31 – Comparação dos vários sistemas de classificação da viscosidade 56

Figura 32 – Força total de rodagem de um veículo de passeio pela velocidade no plano 60
Figura 33 – Subdivisão do trabalho em diversos ciclos de teste para um veículo compacto ... 61
Figura 34 – Coeficiente de arrasto aerodinâmico para vários corpos 62
Figura 35 – Exemplo de um modelamento completo do motor 69
Figura 36 – Exemplo de um modelamento parcial do motor 70
Figura 37 – Exemplo de um modelo completamente configurável 73
Figura 38 – Exemplo de um modelo pré-programado 74
Figura 39 – Exemplo de uma razão de compromisso entre objetivos antagônicos em projetos 75
Figura 40 – Modelo matemático do acoplamento trem de força / veículo 78
Figura 41 – Modelo matemático do veículo 79
Figura 42 – Correção de aquecimento do motor 79
Figura 43 – NBR 6601 – Fase 1 – E22 – Integral da massa de combustível consumida 81
Figura 44 – NBR 6601 – Fase 2 – E22 – Integral da massa de combustível consumida 81
Figura 45 – NBR 6601 – Fase 3 – E22 – Integral da massa de combustível consumida 81
Figura 46 – NBR 7024 – E22 – Integral da massa de combustível consumida 82
Figura 47 – NBR 6601 – Fase 1 – E100 – Integral da massa de combustível consumida 83
Figura 48 – NBR 6601 – Fase 2 – E100 – Integral da massa de combustível consumida 83
Figura 49 – NBR 6601 – Fase 3 – E100 – Integral da massa de combustível consumida 84
Figura 50 – NBR 7024 – E100 – Integral da massa de combustível consumida 84
Figura 51 – Classificação do veículo quanto ao consumo energético pela massa média 86
Figura 52 – Diferença do CE das trocas de marcha de base versus as trocas otimizadas 88
Figura 53 – Diferença do CE do diferencial de base versus os diferenciais mais longos 89
Figura 54 – Diferença de atrito entre o óleo de base e o óleo de baixo atrito 91
Figura 55 – Diferença do CE do óleo de base versus o óleo de baixo atrito 91
Figura 56 – Diferença do CE do Crr de base versus os Crr de 8,7 e 8,5 92
Figura 57 – Diferença do CE da área frontal de base versus a área frontal reduzida 94
Figura 58 – Diferença do CE da classe de inércia de base versus as demais classes propostas 95
Figura 59 – Participação de cada parâmetro na redução do consumo energético do veículo .. 97
Figura 60 – Razão de compromisso entre CE e desempenho de aceleração – E100 98
Figura 61 – Impacto da proposta final de melhoria na autonomia de combustível combinada 99
Figura 62 – Impacto da proposta final de melhoria no consumo energético 100
Figura 63 – Resultado final do consumo energético pela massa média (Inovar-Auto) 102

Figura 64 – NBR 6601 – Fase 1 – E22 – Velocidade do veículo 108
Figura 65 – NBR 6601 – Fase 1 – E22 – Troca de marcha 108
Figura 66 – NBR 6601 – Fase 1 – E22 – Rotação do motor 108
Figura 67 – NBR 6601 – Fase 2 – E22 – Velocidade do veículo 109
Figura 68 – NBR 6601 – Fase 2 – E22 – Troca de marcha 109
Figura 69 – NBR 6601 – Fase 2 – E22 – Rotação do motor 109
Figura 70 – NBR 6601 – Fase 3 – E22 – Velocidade do veículo 110
Figura 71 – NBR 6601 – Fase 3 – E22 – Troca de marcha 110
Figura 72 – NBR 6601 – Fase 3 – E22 – Rotação do motor 110
Figura 73 – NBR 7024 – E22 – Velocidade do veículo 111
Figura 74 – NBR 7024 – E22 – Troca de marcha 111
Figura 75 – NBR 7024 – E22 – Rotação do motor 111
Figura 76 – NBR 6601 – Fase 1 – E100 – Velocidade do veículo 112
Figura 77 – NBR 6601 – Fase 1 – E100 – Troca de marcha 112
Figura 78 – NBR 6601 – Fase 1 – E100 – Rotação do motor 112
Figura 79 – NBR 6601 – Fase 2 – E100 – Velocidade do veículo 113
Figura 80 – NBR 6601 – Fase 2 – E100 – Troca de marcha 113
Figura 81 – NBR 6601 – Fase 2 – E100 – Rotação do motor 113
Figura 82 – NBR 6601 – Fase 3 – E100 – Velocidade do veículo 114
Figura 83 – NBR 6601 – Fase 3 – E100 – Troca de marcha 114
Figura 84 – NBR 6601 – Fase 3 – E100 – Rotação do motor 114
Figura 85 – NBR 7024 – E100 – Velocidade do veículo 115
Figura 86 – NBR 7024 – E100 – Troca de marcha 115
Figura 87 – NBR 7024 – E100 – Rotação do motor 115

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Número de atividade pelo ano-calendário 23
Tabela 2 – Percentual de gastos com P&D pelo ano-calendário 23
Tabela 3 – Percentual de gastos com engenharia pelo ano-calendário 24
Tabela 4 – Percentual de modelos a serem etiquetados pelo ano-calendário 25
Tabela 5 – Sumário dos ciclos urbano e rodoviário 29
Tabela 6 – Classe de inércia em função da massa do veículo para ensaio 64
Tabela 7 – Sumário da eficiência energética para cada ciclo – E22 82
Tabela 8 – Sumário da eficiência energética para cada ciclo – E100 84
Tabela 9 – Sumário da autonomia de combustível combinada 85
Tabela 10 – Sumário do consumo energético combinado 85
Tabela 11 – Classificação de eficiência energética para veículos compactos 86
Tabela 12 – Trocas de marcha – NBR 6601 87
Tabela 13 – Trocas de marcha otimizadas conforme DoE 88
Tabela 14 – Impacto dos diferenciais mais longos no desempenho de aceleração 90
Tabela 15 – Impacto do óleo de baixo atrito no desempenho de aceleração 92
Tabela 16 – Impacto do pneu verde no desempenho de aceleração 93
Tabela 17 – Impacto da redução da área frontal no desempenho de aceleração 94
Tabela 18 – Impacto da redução da massa no desempenho de aceleração 95
Tabela 19 – Sumário dos impactos em consumo energético 96
Tabela 20 – Sumário dos impactos em desempenho de aceleração 97
Tabela 21 – Resultados do cálculo da autonomia de combustível combinada 99
Tabela 22 – Sumário do consumo energético combinado 100
Tabela 23 – Resultados do desempenho de aceleração 101

LISTA DE ABREVIATURAS E/OU SIGLAS

1D	Unidimensional
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
BEV	*Battery Electric Vehicle*
Br2	Nível de OBD aplicado no Brasil (similar ao EOBD)
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CFD	*Computational Fluid Dynamics*
CG	Centro de gravidade
CH_4	Metano
CO	Monóxido de carbono
CO_2	Dióxido de carbono
CONPET	Programa Nacional de Racionalização do Uso dos Derivados do Petróleo e do Gás Natural
Crr	Coeficiente de resistência ao rolamento
CVT	*Continuously Variable Transmission*
DCT	*Dual Clutch Transmission*
DoE	*Design of Experiments*
E22	Gasolina comum adicionada com 22% de etanol anidro
E100	Etanol hidratado a 7%
ENCE	Etiqueta Nacional de Conservação de Energia
EOBD	*European Union On-board Diagnostic*
EPA	United States Environmental Protection Agency
FCEV	*Fuel Cell Electric Vehicle*
GDI	*Gasoline Direct Injection*
GEE	Gases do efeito estufa
HCO	Aldeídos totais
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
Inovar-Auto	Programa de Incentivo à Inovação Tecnológica e Adensamento da Cadeia Produtiva de Veículos Automotores
IPI	Imposto sobre Produtos Industrializados

ISO	*International Organization for Standardization*
MMMT	Marca, modelo, motor e transmissão
MOM	Massa em Ordem de Marcha
MP	Material particulado
MVL	*Mean-Value*
NEDC	*New European Driving Cycle*
NO_x	Óxido de nitrogênio
OBD	*On-board Diagnostic*
PAO	Polialfaolefinas
PBE	Programa Brasileiro de Etiquetagem
PBEV	Programa Brasileiro de Etiquetagem Veicular
P&D	Pesquisa e Desenvolvimento
PECO	Programa Nacional de Economia de Combustível
PFI	*Port Fuel Injection*
PID	Controlador Proporcional, Integral e Derivativo
PMI	Ponto Morto Inferior do pistão
PMS	Ponto Morto Superior do pistão
PROCONVE	Programa de Controle das Emissões Veiculares
SAE	*Society of Automotive Engineers*
THC	Total de hidrocarbonetos
WLTP	*World harmonized Light vehicles Test Procedures*

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 18
1.1 Objetivo 20
1.2 Motivação 20
1.3 Conteúdo 21
2 O PROGRAMA INOVAR-AUTO 22
2.1 Ampliação da produção local 22
2.2 Maior investimento ao P&D local 23
2.3 Extensão da engenharia local 24
2.4 Melhoria da eficiência energética 25
2.4.1 Histórico do Programa Brasileiro de Etiquetagem Veicular 26
2.4.2 Objetivo do Programa Brasileiro de Etiquetagem Veicular 26
2.4.3 Ciclos de testes 27
2.4.4 Indicadores de eficiência 30
2.4.5 Metodologia do cálculo de redução da alíquota de IPI 31
3 SUBSISTEMAS DO AUTOMÓVEL E A SUA IMPORTÂNCIA RELATIVA 34
3.1 Trem de força 34
3.1.1 Motor de combustão interna 34
3.1.2 Transmissão 39
3.1.2.1 Acoplamento entre motor e veículo 41
3.1.2.2 Relação de transmissão total 47
3.1.2.3 Maior relação de marcha 48
3.1.2.4 Menor relação de marcha 48
3.1.2.5 Relações de marcha intermediárias 49
3.1.3 Diferencial 51
3.1.4 Óleo lubrificante 53
3.1.4.1 Composição do óleo lubrificante 56
3.1.5 Pneus 59
3.1.5.1 Resistência ao rolamento 59
3.2 Aerodinâmica 61
3.2.1 Força de arrasto 61
3.3 Massa 63
3.3.1 Massa em ordem de marcha 63
3.3.2 Classes de inércia 64
3.4 Consumo de combustível 64
3.4.1 Eficiência energética 65

3.4.1.1 Cálculo da autonomia de combustível combinada 65
3.4.2 Consumo energético 65
3.4.2.1 Cálculo do consumo energético 66
4 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL 67
4.1 Simulação de um modelo de acoplamento trem de força / veículo 67
4.1.1 Modelamento do motor 68
4.1.1.1 Modelamento completo do motor 68
4.1.1.2 Modelamento parcial do motor 69
4.1.1.3 Modelamento simplificado do motor 70
4.1.2 Modelamento do acoplamento trem de força / veículo 71
4.1.2.1 Modelamento completamente configurável 72
4.1.2.2 Modelamento pré-programado 73
4.1.3 Simulação do consumo de combustível e do desempenho do veículo 74
5 ESTUDO DE CASO 76
5.1 Criação do modelo matemático do veículo 76
5.1.1 Dados de entrada 76
5.1.2 Modelo matemático do veículo 78
5.2 Validação do modelo matemático do veículo 80
5.2.1 Validação com o E22 80
5.2.2 Validação com o E100 83
5.2.3 Cálculo do consumo energético combinado 85
5.3 Análise de sensibilidade 87
5.3.1 Otimização da estratégia de troca de marcha 87
5.3.2 Diferencial mais longo 89
5.3.3 Óleo lubrificante de baixo atrito 90
5.3.4 Pneus com menor coeficiente de resistência ao rolamento 92
5.3.5 Redução da área frontal do veículo 93
5.3.6 Redução da massa do veículo 94
5.3.7 Sumário dos resultados da análise de sensibilidade 96
5.4 Proposta final de melhoria da eficiência energética 98
5.4.1 Cálculo da autonomia de combustível combinada 99
5.4.2 Cálculo do consumo energético 100
5.4.3 Resultado do desempenho de aceleração 101
5.4.4 Melhoria da eficiência energética do veículo conforme o Inovar-Auto 101
6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS 103
REFERÊNCIAS 105
APÊNDICE A – Gráficos de validação do modelo matemático para o E22 108

APÊNDICE B – Gráficos de validação do modelo matemático para o E100 112

1 INTRODUÇÃO

Segundo United States Environmental Protection Agency – EPA (2013), a maior preocupação atual, do ponto de vista do meio-ambiente, reside sobre as altas emissões de gases do efeito estufa (GEE) verificadas em todo o mundo. Dentre estes gases, o dióxido de carbono (CO_2) tem interpretado um papel de destaque ao ser o principal gás responsável pelo aumento do efeito estufa.

Embora o efeito estufa seja fundamental para a manutenção da vida na Terra, formando uma barreira que impede que os raios solares refletidos da superfície terrestre sejam emitidos novamente ao espaço, mantendo assim o planeta aquecido (efeito estufa), o aumento dos índices de CO_2 no ambiente e, consequentemente, o aumento desta barreira aos raios solares vem promovendo um crescimento sistemático da temperatura terrestre.

De acordo com Programa de Controle das Emissões Veiculares – PROCONVE (2010), os maiores contribuintes para a formação e emissão do CO_2 são os veículos automotores que, na sua imensa maioria, são movidos por motores de combustão interna que utilizam combustíveis de origem fóssil. A figura 1 mostra o aumento da quantidade de CO_2 emitida no Estado de São Paulo desde 2009, embora os principais poluentes tenham se mantido com quantidades de emissão estáveis:

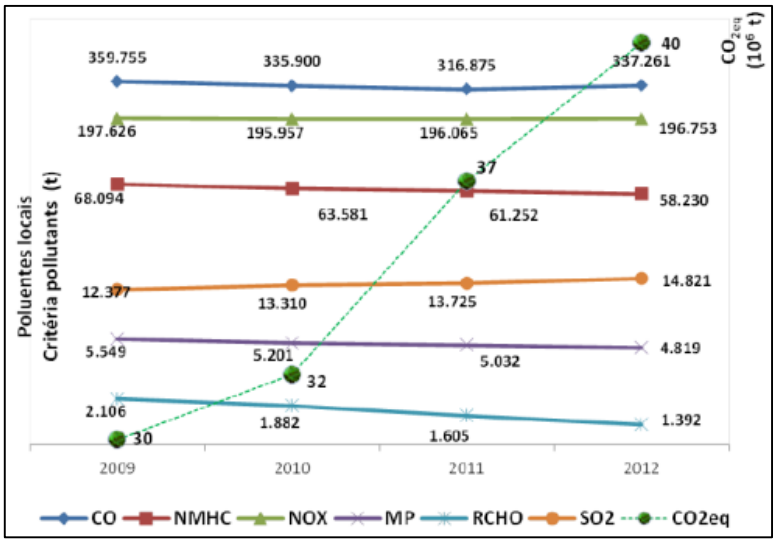

Figura 1 – Poluentes locais
Fonte: CETESB, 2013, p. 10

Tendo em vista esta situação, os principais mercados mundiais vêm controlando as emissões veiculares desde a década de 70, impondo limites cada vez mais severos para

veículos comercializados em seus países, forçando as montadoras e toda a cadeia automotiva a investir em pesquisa e desenvolvimento visando propor a estes mercados produtos cada vez mais adequados às novas regulamentações governamentais.

Ainda segundo PROCONVE (2010), no Brasil, o controle de emissões começou a ser efetuado em 1986 pelo Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis – IBAMA, por meio do PROCONVE, onde cada montadora local ou importador oficial deve comprovar o atendimento à legislação vigente por meio de testes padronizados conduzidos pelos agentes estaduais do PROCONVE – no caso do Estado de São Paulo, a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo – CETESB.

A partir de janeiro de 2014, a legislação passou do PROCONVE L5 OBD Br2 (PL5) ao PL6 OBD Br2. Os gases controlados são os gases nocivos à saúde humana, como o total de hidrocarbonetos (THC), o monóxido de carbono (CO), o óxido de nitrogênio (NOx), os aldeídos totais (HCO) e os materiais particulados (MP). Já o CO_2, o metano (CH_4) e o consumo médio de combustível seguem sem limites regulamentários específicos (PROCONVE, 2010).

Adicionalmente, os biocombustíveis desempenham um papel fundamental no auxílio à redução do CO_2. Largamente aplicados no Brasil desde a década de 70, como alternativa à crise do petróleo, estes combustíveis de origem vegetal promovem o balanço no ciclo do carbono, no qual as plantas se utilizam do CO_2 para se desenvolver e crescer, e estes combustíveis, quando queimados, emitem menos CO_2 à atmosfera (MANOSSO, 2010).

Visando dar um passo à frente, promovendo o crescimento sustentável da indústria automotiva no Brasil e a aceleração da convergência dos limites de emissões aos principais mercados mundiais, o governo federal brasileiro lançou em janeiro de 2013 o Programa de Incentivo à Inovação Tecnológica e Adensamento da Cadeia Produtiva de Veículos Automotores – Inovar-Auto. Um dos principais pilares deste programa é a melhoria da eficiência energética dos veículos por meio da sobre tributação do Imposto sobre Produtos Industrializados – IPI – para as montadoras que não atenderem a esta melhoria na sua média de produção.

Logo, uma vez que a eficiência energética dos veículos passa a ser controlada com mais rigor, a melhoria dos veículos existentes, no curto prazo, e o projeto de novos veículos, no médio e longo prazo, se fazem necessários para a sua adequação a esta nova demanda. Assim, novas tecnologias de produto e de processo deverão ser aplicadas promovendo o aumento do investimento no ramo automotivo e fomentando a pesquisa e o desenvolvimento nacionais.

Desta forma, será possível reduzir a diferença tecnológica dos veículos nacionais em relação aos seus concorrentes internacionais, bem como promover a redução das emissões de poluentes e, consequentemente, a redução do consumo de combustível por quilômetro rodado, melhorando assim a eficiência energética dos nossos veículos.

1.1 Objetivo

O presente trabalho tem por objetivo analisar a eficiência energética de um veículo *Flex Fuel* e, por meio de diversas iterações de simulação numérica, realizar uma análise de sensibilidade da relação de compromisso entre o consumo de combustível e o desempenho de aceleração deste veículo, propondo ao final um conjunto de melhorias que trará um melhor resultado de eficiência energética.

Para isto, um modelo matemático deste veículo será criado utilizando o código comercial GT-Suite®, levando em consideração uma série de definições técnicas, como dados da dinâmica veicular e do trem de força, de tal modo que a sua eficiência energética seja simulada. Os resultados simulados serão comparados aos dados experimentais do veículo para validar o modelo matemático. A partir daí, diversos parâmetros do veículo e do trem de força serão simulados isoladamente para o levantamento dos seus impactos na eficiência energética e no desempenho de aceleração com o objetivo de propor uma série de alterações que apresentem o melhor resultado de eficiência, sem prejudicar de maneira significativa o desempenho de aceleração.

Ao final, com o conjunto de melhorias identificadas, será efetuada uma proposta que leva em consideração a factibilidade de implantação industrial destas alterações bem como os aspectos comerciais que poderão impactar o produto final.

1.2 Motivação

A falta de investimentos no ramo automotivo brasileiro e a presença de produtos defasados em relação aos seus semelhantes internacionais têm se tornado um entrave ao crescimento da produção de veículos nacionais para a exportação. Como a cadeia automotiva é responsável por impulsionar a produção industrial brasileira, o governo decretou a lei nº 7.819 de 03 de outubro de 2012 que regulamenta a implantação do Programa de Incentivo à

Inovação Tecnológica e Adensamento da Cadeia Produtiva de Veículos Automotores, o Inovar-Auto. Esta lei tem por objetivo fomentar o desenvolvimento de novas tecnologias e implantar mais etapas industriais locais, bem como regulamentar e controlar o consumo de combustíveis e as emissões de poluentes por meio da eficiência energética dos veículos, para convergir aos limites praticados internacionalmente no médio e longo prazo.

Os desafios apresentados por este cenário e todos os estudos de engenharia em curso atualmente nas montadoras são a motivação deste trabalho. Num primeiro momento, de curto prazo, de 2014 a 2017, as montadoras buscam adaptar os produtos atuais às primeiras demandas do Inovar-Auto e, num segundo momento, de médio e longo prazo, a partir de 2017, novos produtos deverão ser desenvolvidos.

1.3 Conteúdo

Este trabalho está dividido em seis capítulos descritos resumidamente nesta seção.

O primeiro apresenta a introdução ao problema abordado, o objetivo proposto e a motivação do mesmo.

O segundo capítulo apresenta os detalhes sobre o programa Inovar-Auto e os seus eixos de atuação, em especial a melhoria da eficiência energética.

Serão apresentados, no capítulo seguinte, os diversos subsistemas do automóvel e está dividido em trem de força, aerodinâmica, massa e consumo de combustível.

O quarto capítulo apresenta o planejamento experimental e a simulação de um modelo de acoplamento trem de força / veículo.

Será discutido, no quinto capítulo, o estudo de caso deste trabalho, passando pela criação do modelo matemático do veículo, validação deste modelo, análise de sensibilidade dos parâmetros do veículo e os seus impactos sobre o consumo de combustível e desempenho de aceleração e, finalmente, pela proposta de melhoria da eficiência energética. Os resultados serão apresentados e discutidos ao final desse capítulo.

Para finalizar, o último capítulo apresenta as principais conclusões deste trabalho, além das sugestões para trabalhos futuros.

2 O PROGRAMA INOVAR-AUTO

O programa Inovar-Auto, idealizado pelo governo brasileiro, entrou em vigor em 01 de janeiro de 2013, através do Decreto n° 7.819 de 03 de outubro de 2012 que regulamenta os artigos 40 a 44 da Lei n° 12.715 de 17 de setembro de 2012, com o objetivo de fomentar o crescimento da pesquisa e do desenvolvimento (P&D), da engenharia e da produção industrial local, bem como acelerar a convergência dos limites de emissões regulamentárias aos padrões internacionais.

Apesar de este programa vir a deixar de ter validade em 31 de dezembro de 2017, os seus resultados serão percebidos durante anos uma vez que, ao seu término, nenhuma das leis e ações em curso serão canceladas. Pelo contrário, o sucesso do programa Inovar-Auto, se confirmado, irá permitir a criação da segunda fase deste programa, o Inovar-Auto 2, já a partir do início de 2018.

Segundo Decreto n° 7.819 (2012), o Inovar-Auto está baseado em quatro grandes eixos de trabalho, explicados a seguir. Assim, a empresa que se habilitar neste programa deverá se comprometer a pagar regularmente as taxas federais, a ampliar a produção local (seção 2.2), a melhorar a eficiência energética dos seus produtos (seção 2.5) e deverá escolher duas das três opções restantes: investimento em P&D ou investimento em engenharia ou inscrição no Programa Brasileiro de Etiquetagem Veicular (seções 2.3, 2.4 e 2.5).

2.1 Ampliação da produção local

A empresa que se habilitar no Inovar-Auto deverá realizar uma quantidade mínima de atividades fabris e de atividades de infraestrutura de engenharia, em pelo menos 80% dos veículos fabricados localmente, conforme a lista abaixo:

a) Estampagem;
b) Soldagem;
c) Tratamento anticorrosivo e pintura;
d) Injeção de plástico;
e) Fabricação de motor;
f) Fabricação de caixa de câmbio e transmissão;
g) Montagem de sistemas de direção e suspensão;
h) Montagem de sistema elétrico;

i) Montagem de sistemas de freio e eixos;

j) Produção de monobloco ou montagem de chassis;

k) Montagem, revisão final e ensaios compatíveis;

l) Infraestrutura própria de laboratórios para o desenvolvimento e teste de produtos;

O número de atividades a serem realizadas deverá respeitar o cronograma apresentado na tabela 1:

Tabela 1 – Número de atividade pelo ano-calendário

Ano-calendário	Número de atividades
2013	08
2014	09
2015	09
2016	10
2017	10

Fonte: Decreto n° 7.819, 2012, p. 02.

2.2 Maior investimento ao P&D local

A empresa habilitada deverá realizar gastos com pesquisa e desenvolvimento correspondentes, no mínimo, aos percentuais listados na tabela 2, incidentes sobre a receita bruta total de venda de bens e serviços, excluídos os impostos e contribuições incidentes sobre a venda:

Tabela 2 – Percentual de gastos com P&D pelo ano-calendário

Ano-calendário	Percentual
2013	0,15%
2014	0,30%
2015	0,50%
2016	0,50%
2017	0,50%

Fonte: Decreto n° 7.819, 2012, p. 03.

As atividades de pesquisa e desenvolvimento deverão ser divididas da seguinte maneira:

a) **Pesquisa básica dirigida:** atividades executadas com o objetivo de adquirir conhecimentos quanto à compreensão de novos fenômenos, para o desenvolvimento de produtos, processos ou sistemas inovadores.

b) **Pesquisa aplicada:** atividades executadas com o objetivo de adquirir novos conhecimentos, para o desenvolvimento ou aprimoramento de produtos, processos e sistemas.

c) **Desenvolvimento experimental:** atividades sistemáticas esquematizadas a partir de conhecimentos pré-existentes, com o objetivo de comprovar ou demonstrar a viabilidade técnica ou funcional de novos produtos, processos, sistemas e serviços, ou ainda um evidente aperfeiçoamento dos já produzidos ou estabelecidos.

d) **Serviços de apoio técnico:** serviços indispensáveis à implantação e à manutenção das instalações ou dos equipamentos destinados exclusivamente à execução de projetos de pesquisa, desenvolvimento ou inovação tecnológica, bem como à capacitação dos recursos humanos a eles associados.

2.3 Extensão da engenharia local

Tal empresa deverá ainda realizar gastos locais em engenharia, tecnologia industrial básica e capacitação de fornecedores correspondentes, no mínimo, aos percentuais apresentados na tabela 3, incidentes sobre a receita bruta total de venda de bens e serviços, excluídos os impostos e contribuições incidentes sobre a venda:

Tabela 3 – Percentual de gastos com engenharia pelo ano-calendário

Ano-calendário	Percentual
2013	0,50%
2014	0,75%
2015	1,00%
2016	1,00%
2017	1,00%

Fonte: Decreto n° 7.819, 2012, p. 03.

As atividades de engenharia, tecnologia industrial básica e capacitação de fornecedores deverão ser divididas como segue:

a) **Desenvolvimento de engenharia:** concepção de um novo produto ou processo de fabricação e a associação de novas funcionalidades ou características a um produto ou processo que implique em melhorias incrementais e ganho efetivo de

qualidade ou produtividade, resultando assim em maior competitividade no mercado.

b) **Tecnologia industrial básica:** aferição e calibração de máquinas e equipamentos, o projeto e a confecção de instrumentos de medida específicos, a certificação de conformidade, inclusive os ensaios correspondentes, a normalização ou a documentação técnica gerada e o patenteamento do produto ou processo desenvolvido.
c) Treinamento do pessoal dedicado à pesquisa, desenvolvimento do produto e processo, inovação e implantação.
d) Desenvolvimento de produtos, inclusive veículos, sistemas e seus componentes, autopeças, máquinas e equipamentos.
e) Construção de laboratórios para as atividades de P&D.
f) Desenvolvimento de ferramentais e moldes, novos instrumentos, aparelhos industriais, aparelhos de controle de qualidade e os respectivos acessórios e peças de reposição, utilizados no processo produtivo.
g) Capacitação de fornecedores.

2.4 Melhoria da eficiência energética

Finalmente, a empresa em questão deverá aderir ao Programa Brasileiro de Etiquetagem Veicular – PBEV, definido pelo Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior e estabelecido pelo Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia – INMETRO, com eventual participação de outras entidades públicas, com os percentuais mínimos de modelos comercializados pela empresa identificados na tabela 4, a serem etiquetados no âmbito do referido programa:

Tabela 4 – Percentual de modelos a serem etiquetados pelo ano-calendário

Ano-calendário	Percentual
2013	36%
2014	49%
2015	64%
2016	81%
2017	100%

Fonte: Decreto n° 7.819, 2012, p. 04.

2.4.1 Histórico do Programa Brasileiro de Etiquetagem Veicular

De acordo com Instituto de Energia e Meio Ambiente – IEMA (2011), em 1983 foi instituído o Programa Nacional de Economia de Combustível – PECO, cuja principal medida foi a publicação dos valores de consumo de combustível obtidos por meio de ensaios padronizados, de acordo com a norma da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT – NBR 7024. Este programa, que previu o estabelecimento de metas de consumo de combustível, foi descontinuado em 1987.

Em 1991 foi instituído o Programa Nacional de Racionalização do Uso dos Derivados do Petróleo e do Gás Natural – CONPET – para promover o desenvolvimento de uma cultura anti desperdício no consumo dos recursos naturais não renováveis que, até meados de 2000, focou as suas atividades na capacitação para a adequada manutenção de frotas cativas de ônibus e caminhões, inspeções de opacidade, cursos de educação ambiental e etiquetagem de eletrodomésticos a gás.

Em 2005 a coordenação do CONPET, em conjunto com o INMETRO, instituiu um grupo técnico para a discussão de um programa de etiquetagem para veículos leves. Como resultado deste trabalho foi criado, em 2008, o PBEV.

2.4.2 Objetivo do Programa Brasileiro de Etiquetagem Veicular

O objetivo deste programa é promover a melhoria da eficiência energética dos veículos leves por meio da adoção de uma etiqueta que disponibiliza as informações de eficiência e a classificação de consumo de um determinado veículo em relação aos demais de mesma categoria (IEMA, 2011).

A divulgação destes dados de desempenho energético tem por objetivo disponibilizar ao consumidor informações que lhe permitam tomar uma decisão quando for comprar um veículo, estimulando assim a venda dos veículos mais eficientes.

Desta maneira, este programa faz uso da Etiqueta Nacional de Conservação de Energia – ENCE – que tem sido aplicada em todos os demais programas de etiquetagem nacional, no âmbito do Programa Brasileiro de Etiquetagem – PBE, conforme a figura 2:

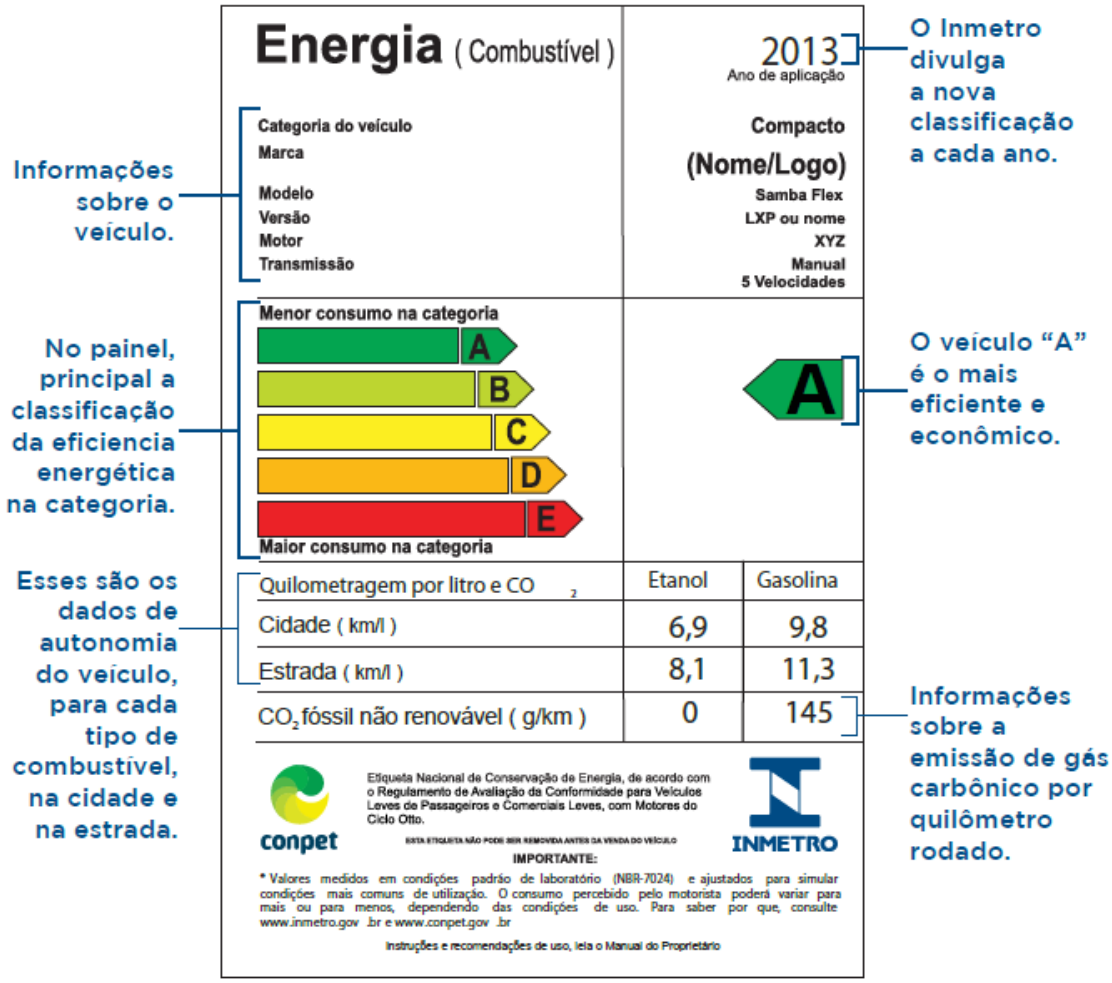

Figura 2 – Etiqueta Nacional de Conservação de Energia – veicular
Fonte: INMETRO, 2013, p. 3

2.4.3 Ciclos de testes

Segundo IEMA (2011), a empresa, quando aderir ao PBEV, deverá realizar ensaios sobre os veículos comercializados conforme o percentual de modelos a serem etiquetados pelo ano-calendário (tabela 4), por marca, modelo, motor e transmissão (MMMT).

Estes testes devem seguir os procedimentos, métodos e critérios constantes na norma ABNT NBR 7024:2010, em laboratórios veiculares previamente credenciados pelo INMETRO.

A norma NBR 7024, referente ao ciclo de rodagem rodoviário, indica a norma NBR 6601, que se refere ao ciclo de rodagem urbano. Estes ciclos são comparáveis aos padrões internacionais, sendo particularmente similares ao ciclo FTP-75 + *Highway* dos Estados

Unidos da América, o que permite a comparação dos veículos comercializados localmente com os que vêm sendo comercializados internacionalmente.

A diferença do caso brasileiro está no fato de comercializar veículos *Flex Fuel* o que demanda adotar uma média aritmética dos valores obtidos nos testes, para cada um dos combustíveis rodados, ou seja, para o E22, gasolina comum adicionada com 22% de etanol anidro, conforme legislação, e o E100, etanol hidratado a 7%. As especificações destes dois combustíveis de referência, utilizados nos ensaios descritos na norma NBR 7024:2010, estão definidas na Resolução da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – ANP – n° 21 de 02 de julho de 2009 e na Resolução ANP n° 23 de 06 de julho de 2010, respectivamente.

A autonomia combinada é calculada em função do consumo de combustível (km/l), rodando 55% do tempo em ciclo urbano, conforme NBR 6601, e 45% do tempo em ciclo rodoviário, conforme NBR 7024.

O ciclo urbano é caracterizado por três fases distintas, representadas na figura 3:

a) **Fase 1:** chamada de fase fria, esta fase tem duração de 505 s (5,8 km).
b) **Fase 2:** é a fase transiente, estabilizada, que tem duração de 864 s (6,3 km).
c) **Parada:** também conhecido por *hot soak*, é o período entre as fases 2 e 3 onde há uma parada de 540 s mínimo a 660 s máximo.
d) **Fase 3:** é uma repetição da fase 1, porém a quente, com a mesma duração de 505 s (5,8 km).

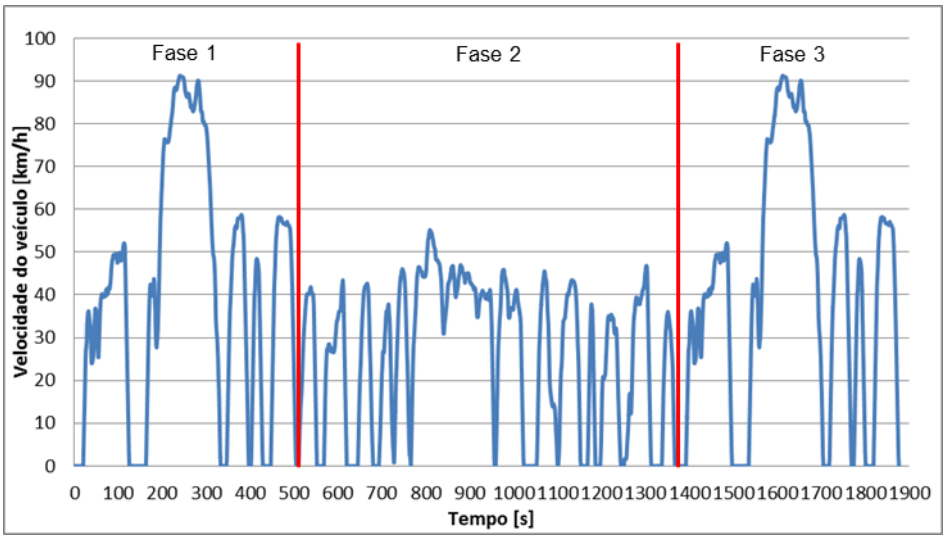

Figura 3 – Ciclo urbano – NBR 6601: fases 1, 2 e 3
Fonte: Autor “adaptado de” NBR 6601, 2012

O ciclo rodoviário é caracterizado por uma fase única de duração de 765 s (16,5km), representada na figura 4:

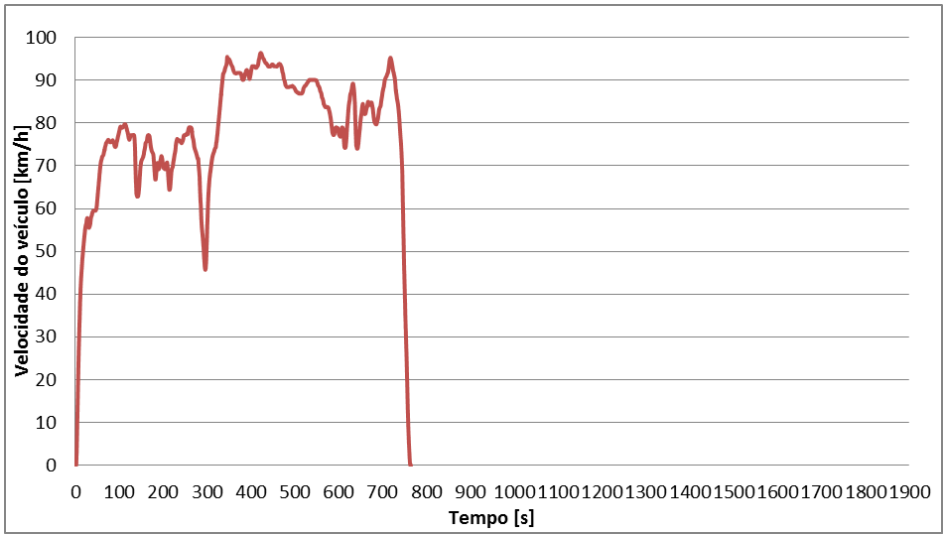

Figura 4 – Ciclo rodoviário – NBR 7024
Fonte: Autor "adaptado de" NBR 7024, 2006

A tabela 5 sumariza os dois ciclos de rodagem:

Tabela 5 – Sumário dos ciclos urbano e rodoviário

Ciclo	Duração [s]	Distância [km]	Velocidade média [km/h]	Velocidade máxima [km/h]
NBR 6601	1874	17,77	34,2	91,2
NBR 7024	765	16,50	77,7	96,4

Fonte: Autor "adaptado de" NBR 6601:2012 e NBR 7024:2006.

Tanto o ciclo urbano quanto o ciclo rodoviário são realizados com um veículo sobre um dinamômetro de chassis, conforme apresentado na figura 5. Logo, a análise da duração, distância, velocidades e emissões podem ser controladas. Um técnico especializado é o responsável por "dirigir" o veículo conforme os padrões de aceleração e desaceleração, velocidade e trocas de marcha pelo tempo, para os dois ciclos, enquanto as emissões do veículo são medidas. Caso a velocidade do veículo saia da tolerância especificada em norma, o teste é descartado e todo o processo de preparação do veículo pré-teste, que demanda algo em torno de 24 h, mais a rodagem dos dois ciclos, devem ser reiniciados. Vale ressaltar ainda que a carga dos rolos do dinamômetro é ajustada para refletir a aceleração inercial, a força resistiva ao rolamento e o arrasto deste veículo, conforme a norma NBR 10312 (2007).

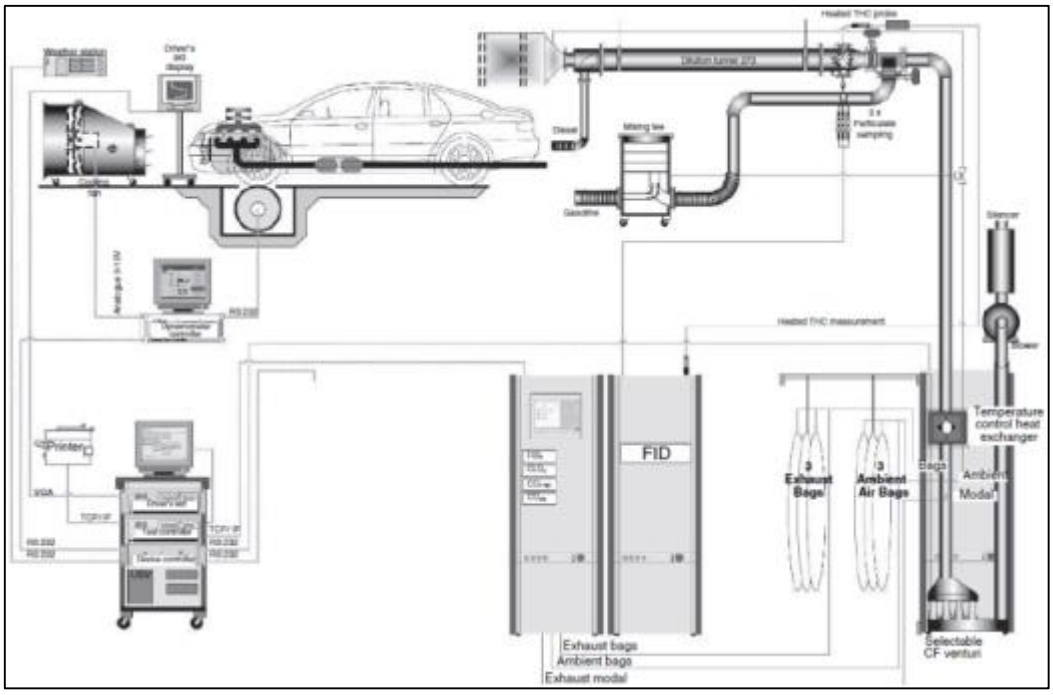

Figura 5 – Esquema de um dinamômetro de chassis para teste de emissões
Fonte: Martyr; Plint, 2007, p. 345

2.4.4 Indicadores de eficiência

Assim como ocorre nos demais países que controlam as emissões de poluentes e o consumo de combustível dos veículos comercializados, serão feitas comparações entre veículos de mesma categoria a partir de um indicador de consumo específico que demonstre ou o combustível consumido ou as emissões de gases pela distância percorrida. Portanto, é habitual ver indicadores de controle específicos como o de galões por milha (g/milha) nos Estados Unidos da América, ou o de litros para cada 100 km rodados (l/100 km) na China, ou ainda o de gramas de CO_2 por quilômetro (g CO_2/km) na União Europeia (IEMA, 2011).

No entanto, foi adotado no Brasil um indicador de eficiência energética que apresenta a distância que se pode percorrer com apenas uma unidade de combustível, o quilômetro por litro (km/l), também chamado de autonomia de combustível.

Entretanto, boa parte do combustível comercializado no Brasil possui uma quantidade de biomassa renovável, o etanol proveniente da cana-de-açúcar, que é adicionado à gasolina (E22) ou consumido na forma hidratada (E100). Portanto, visando a comparação entre veículos leves no Brasil, o INMETRO realiza a conversão energética dos combustíveis de maneira a trabalhar com o conteúdo energético dos mesmos, uma vez que o poder calorífico da gasolina é diferente do etanol, 38,92 MJ/kg e 24,80 MJ/kg respectivamente. Assim sendo,

o indicador utilizado para a classificação de veículos dentro de suas respectivas categorias será o nível de consumo energético expresso em mega Joule por quilômetro (MJ/km).

2.4.5 Metodologia do cálculo de redução da alíquota de IPI

Conforme Decreto n° 7.819 (2012), a empresa habilitada no Inovar-Auto deverá se comprometer a cumprir até 01 de outubro de 2017 a exigência de consumo energético menor ou igual ao valor máximo calculado conforme expressão 2.1:

$$CE_1 = 1{,}155 + 0{,}000593 \times (Mempresa\ habilitada) \quad (2.1)$$

Onde,

a) CE = consumo energético;
b) Mempresa habilitada = massa média em ordem de marcha (kg) de todos os veículos comercializados no Brasil pela empresa habilitada, ponderada pelas vendas ocorridas no período dos doze meses anteriores ao mês no qual será feito o cálculo. Esta massa é calculada conforme a norma NBR ISO 1176:2006;

Para se credenciar à redução de alíquota de dois pontos percentuais do IPI, a empresa deverá cumprir de 01 de outubro de 2016 até 01 de outubro de 2017 e, manter em medições anuais até 2020, o consumo energético menor ou igual ao valor máximo calculado de acordo com a expressão 2.2:

$$CE_2 = 1{,}067 + 0{,}000547 \times (Mempresa\ habilitada) \quad (2.2)$$

Para se credenciar à redução de alíquota de um ponto percentual do IPI, a empresa deverá cumprir de 01 de outubro de 2016 até 01 de outubro de 2017 e, manter em medições anuais até 2020, o consumo energético menor ou igual ao valor máximo calculado de acordo com a expressão 2.3:

$$CE_3 = 1{,}111 + 0{,}000570 \times (Mempresa\ habilitada) \quad (2.3)$$

Os cálculos de consumo energético apresentados acima geram o gráfico de consumo energético pela massa média em ordem de marcha, conforme a figura 6:

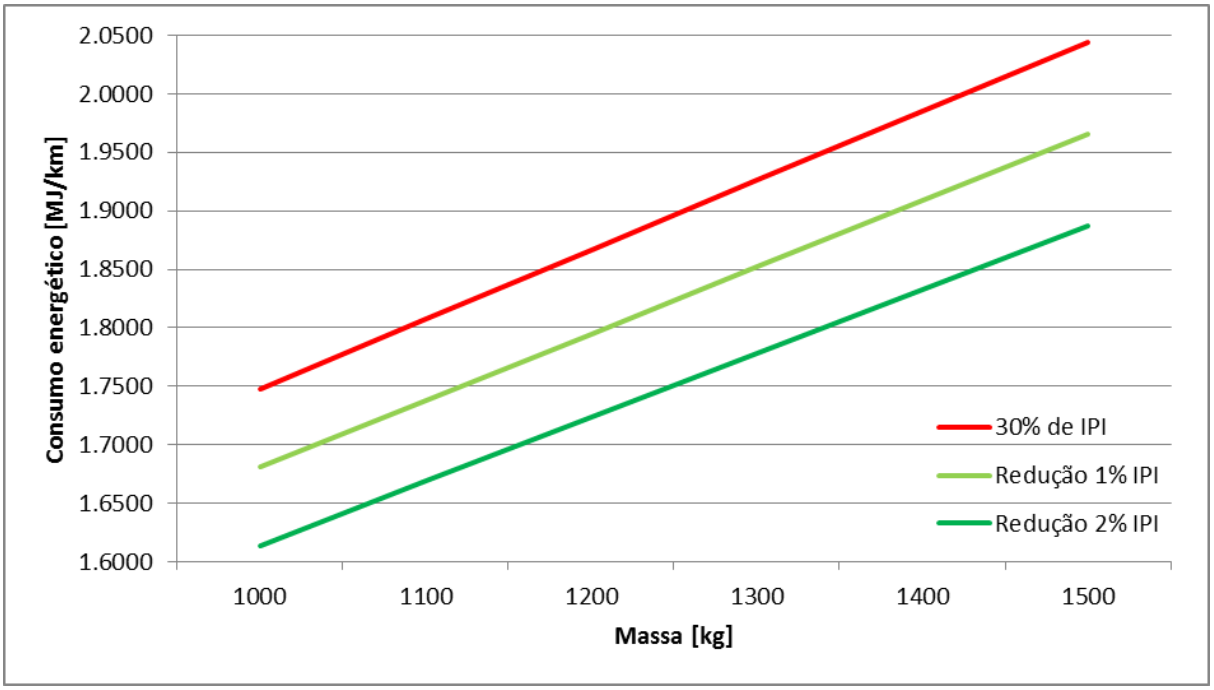

Figura 6 – Consumo energético pela massa média
Fonte: Autor "adaptado de" Decreto n° 7.819, 2012, p. 13

Para as empresas cujo valor de consumo energético pela massa média de sua produção estiver acima da linha vermelha haverá uma sobretaxação de 30% do IPI, colocando-as numa situação crítica quanto à competitividade dos seus produtos frente aos seus concorrentes. No entanto, se este valor estiver entre as linhas vermelha e verde-clara, não haverá qualquer alteração sobre o IPI aplicado. Já a empresa que se posicionar entre as linhas verde-clara e verde-escura poderá se beneficiar de uma redução de um ponto percentual de IPI e, a empresa que for além e se posicionar abaixo da linha verde-escura, irá se beneficiar de uma redução de dois pontos percentuais de IPI, colocando-a numa situação de referência energética e de preço frente a concorrência.

Segundo INMETRO (2012), apenas como referência, o consumo energético pela massa média em ordem de marcha das montadoras no Brasil em 2012 foi de 2,07 MJ/km a 1115,5 kg, conforme apresentado na figura 7:

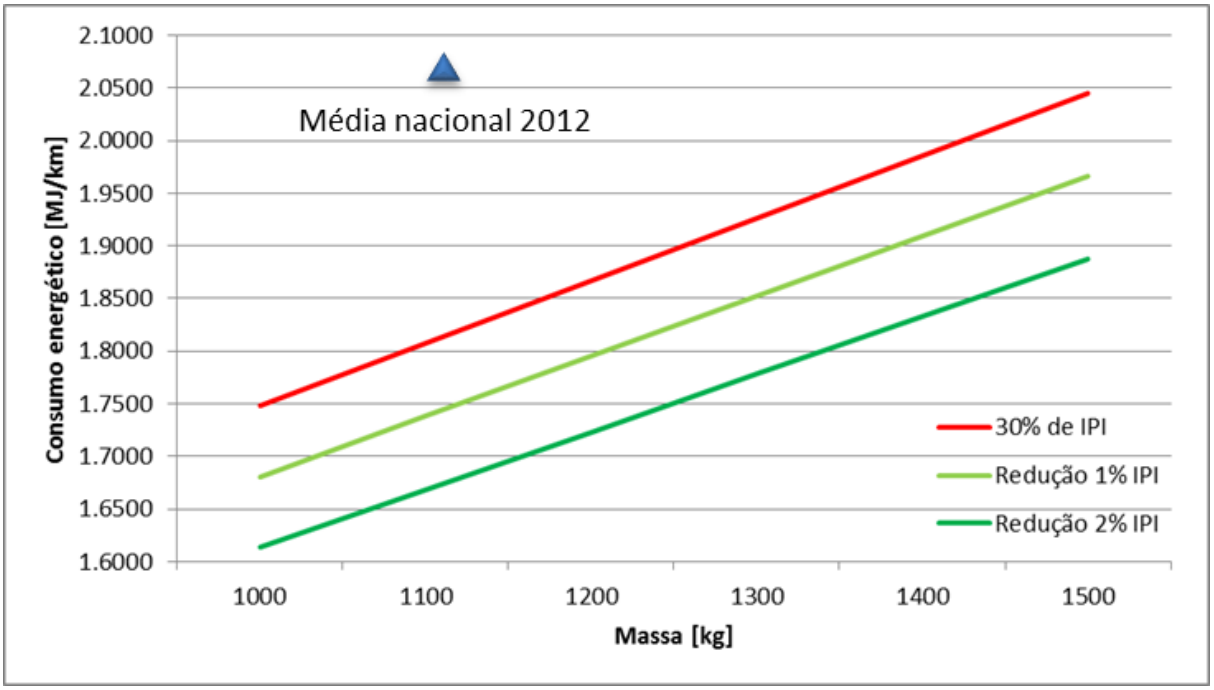

Figura 7 – Consumo energético pela massa média – média do mercado nacional 2012
Fonte: Autor “adaptado de” INMETRO, 2012

3 SUBSISTEMAS DO AUTOMÓVEL E A SUA IMPORTÂNCIA RELATIVA

3.1 Trem de força

O trem de força é o conjunto de componentes de um veículo responsável por gerar movimento e transferi-lo ao pavimento. Geralmente este movimento é gerado por um motor de combustão interna e a transmissão do movimento ao pavimento é feita por meio do sistema de transmissão, composto pela caixa de transmissão, pelo diferencial, pelos eixos de transmissão e pelos conjuntos roda-pneu.

A figura 8 apresenta o exemplo do trem de força de um veículo comercial com motor montado na frente do veículo e com tração traseira:

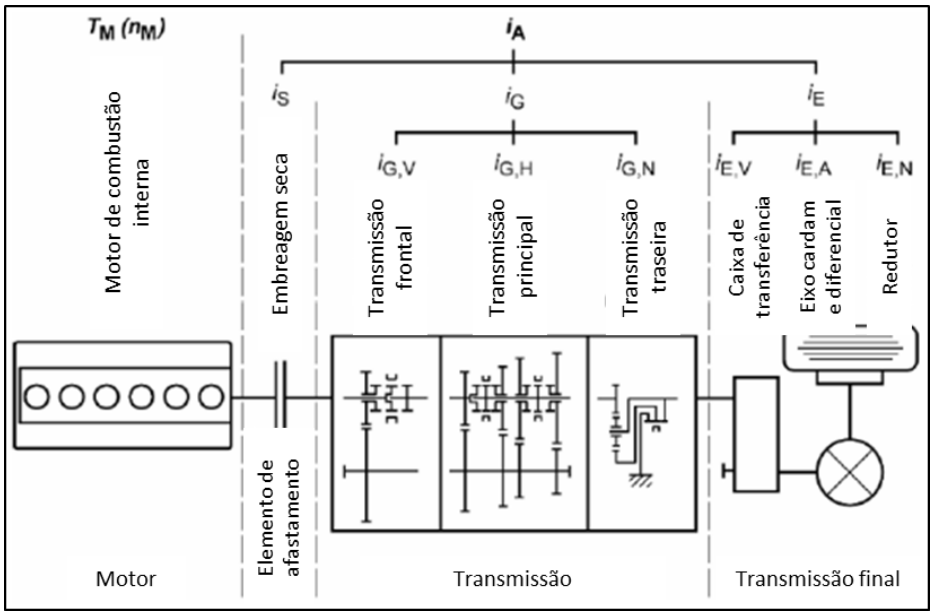

Figura 8 – Estrutura hierárquica da relação de transmissão de um trem de força
Fonte: Naunheimer et al., 2011, p. 101

3.1.1 Motor de combustão interna

Segundo Brunetti (2012), existem três classificações de motores de combustão interna: motores alternativos, motores rotativos e motores de impulso. Os motores alternativos são aqueles que transformam o movimento alternativo dos pistões em rotativo, por meio do sistema biela-manivela, conforme apresentado na figura 9. Estes motores são os mais comumente aplicados aos veículos.

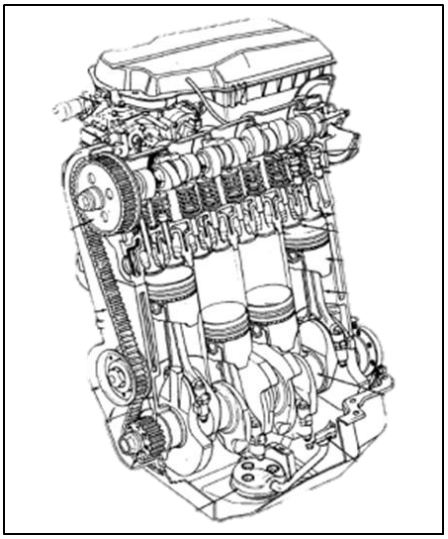

Figura 9 – Exemplo de um motor alternativo
Fonte: Heywood, 1988, p. 13

Os motores alternativos podem ser classificados quanto à ignição:

a) **Motor de ignição por faísca – Ciclo Otto:** neste ciclo, a mistura ar/combustível pode ser admitida previamente dosada nos dutos de admissão, no caso dos motores de injeção indireta de combustível ou *Port Fuel Injection* (PFI), figura 10, ou formada no interior da câmara de combustão, no caso dos motores de injeção direta de combustível ou *Gasoline Direct Injection* (GDI), figura 11. Esta mistura é então inflamada por uma faísca que ocorre entre os eletrodos de massa e central da vela de ignição, iniciando assim a combustão. Os motores do ciclo Otto são os mais comumente aplicados aos veículos de passageiros dado o seu menor custo de produção e de manutenção.

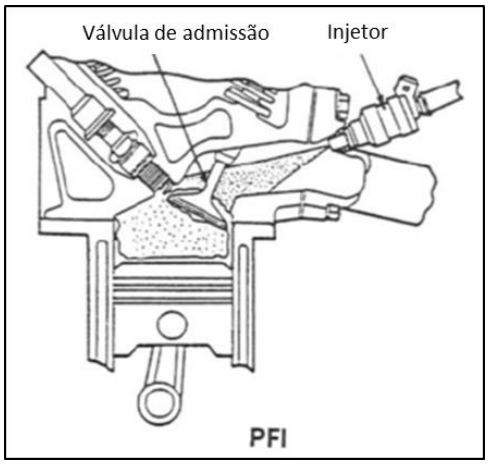

Figura 10 – Injeção indireta de combustível (PFI)
Fonte: Zhao, Lai, e Harrington, 1999, p. 441

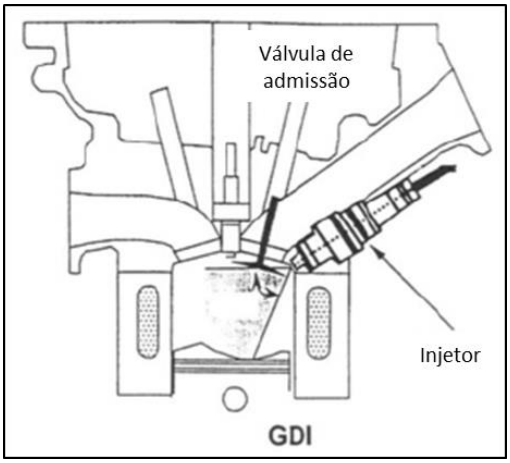

Figura 11 – Injeção direta de combustível (GDI)
Fonte: Zhao, Lai, e Harrington, 1999, p. 441

b) **Motor de ignição espontânea – Ciclo Diesel:** neste ciclo, o pistão comprime o ar até que este atinja uma temperatura suficientemente elevada. Quando o pistão está próximo do ponto morto superior (PMS), o combustível é injetado e o mesmo reage espontaneamente com o oxigênio presente no ar quente, sem a necessidade de uma faísca, figura 12. Os motores do ciclo Diesel são mais comumente aplicados aos veículos comerciais, no entanto eles são largamente aplicados aos veículos de passageiros na Europa, aplicação essa proibida por lei no Brasil. Este ciclo apresenta um rendimento energético superior ao ciclo Otto, no entanto o custo de produção e de manutenção destes motores é mais elevado além de demandar caros sistemas de pós-tratamento dos gases de escape para reduzir a emissão de poluentes e de material particulado.

Figura 12 – Ignição espontânea
Fonte: Atkins, 2009, p. 70

Os motores alternativos podem ainda ser classificados quanto ao número de tempos do ciclo:

c) **Motor a quatro tempos:** neste caso, o pistão percorre quatro cursos, o que corresponde a duas voltas do virabrequim, para completar um ciclo. O primeiro tempo é a admissão do ar ou da mistura ar/combustível (a), o segundo é a compressão do ar ou da mistura (b), o terceiro tempo é a expansão (d) após o início da combustão (c) e, por último, o escape dos gases queimados (e), conforme a figura 13. Os motores a quatro tempo são largamente aplicados aos veículos independentemente do ciclo escolhido. Eles geralmente apresentam melhor eficiência energética e menor emissão de poluentes.

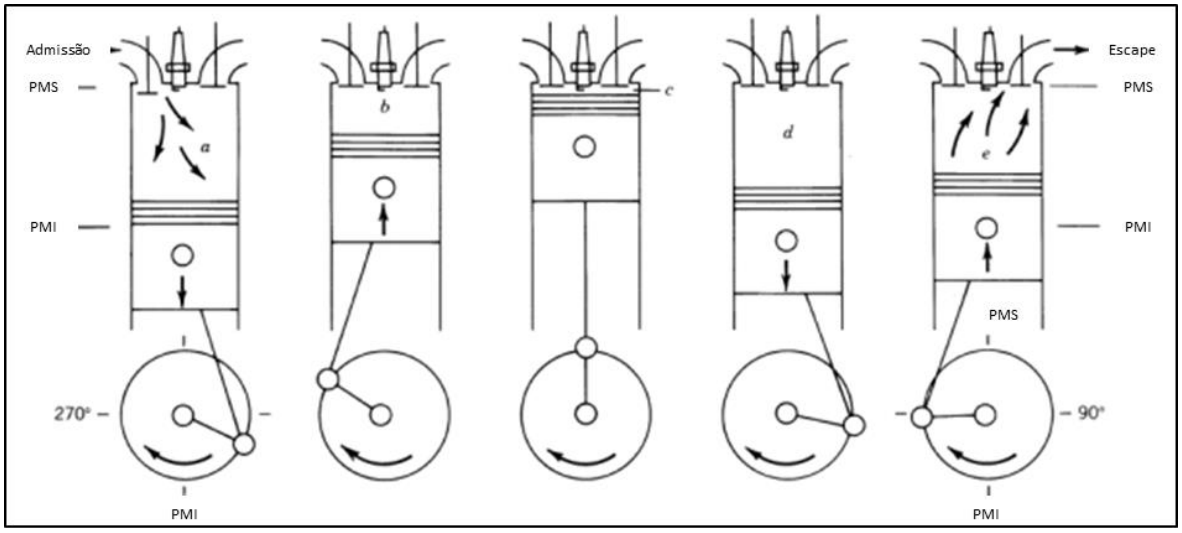

Figura 13 – Os quatro tempos de um motor alternativo a quatro tempos
Fonte: Kutz, 2006, p. 889

d) **Motor a dois tempos:** neste motor, o pistão percorre dois cursos, o que corresponde a somente uma volta do virabrequim, para completar um ciclo. Os mesmos processos do motor a quatro tempos são realizados no motor a dois tempos, no entanto, alguns deles se sobrepõem num mesmo curso. Assim, suponha que no primeiro tempo o pistão esteja em PMS comprimindo a mistura ar/combustível/lubrificante (b) e a faísca dá a ignição de combustão, movendo o pistão ao ponto morto inferior (PMI) (c). Durante este deslocamento, o pistão comprime a mistura ar/combustível/lubrificante no cárter do motor e, num determinado ponto deste deslocamento, é aberta a passagem de escape para que os gases queimados sejam expelidos (d). Na sequência, o pistão abre a passagem de admissão que comunica o cárter com a câmara de combustão, preenchendo-a com

uma mistura nova (e). No segundo tempo, durante o deslocamento do pistão do PMI ao PMS, o mesmo fecha primeiramente a passagem de admissão e depois a de escape, abrindo a passagem para uma nova mistura ar/combustível/lubrificante para o cárter por meio da depressão criada (a). Quando o pistão se aproxima do PMS ocorre uma nova faísca que inicia o ciclo anterior, figura 14. Os motores a dois tempos ainda podem ser encontrados em algumas aplicações de nicho como assopradores, cortadores de grama, serras de corrente e pequenos motores de competição, mas dado o seu alto nível de emissão de poluentes, a sua aplicação está caindo em desuso.

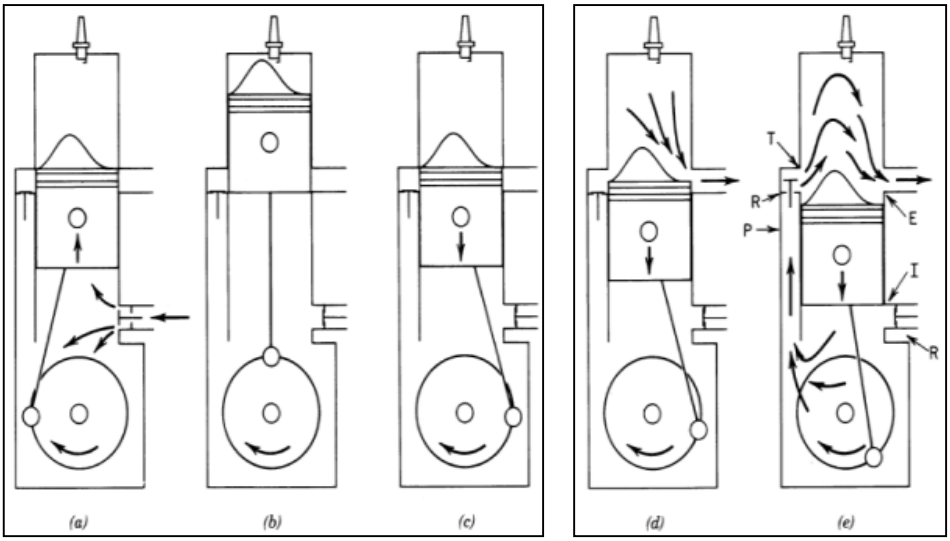

Figura 14 – Os dois tempos de um motor alternativo a dois tempos
Fonte: Kutz, 2006, p. 891

Finalmente, os motores alternativos podem ser classificados quanto à disposição interna dos cilindros. Eles podem estar em linha (a), em “V” (b) ou opostos/boxer (d), conforme a figura 15:

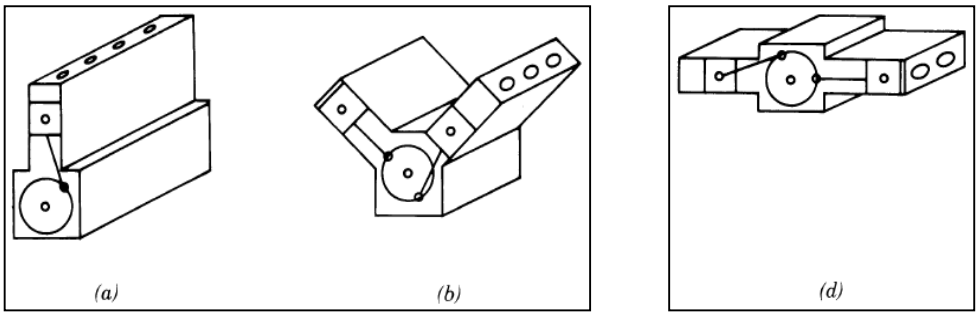

Figura 15 – Disposição interna dos cilindros para motores alternativos
Fonte: Kutz, 2006, p. 887

3.1.2 Transmissão

Segundo Naunheimer et al. (2011), o objetivo da transmissão é converter o torque disponível no motor em torque disponível nas rodas tratoras, levando em consideração as influências do veículo, do perfil do pavimento, do condutor e das condições ambientais. A transmissão é fundamental para o desempenho da condução e do transporte de pessoas e cargas, assim como desempenha um papel importante quanto à confiabilidade do veículo, o consumo de combustível, a facilidade de operação e a segurança viária.

Durante o desenvolvimento de uma transmissão, busca-se a ótima conversão do torque disponível no motor para a força de tração do veículo em todas as velocidades. Esta tarefa deve ser feita de tal forma que exista um compromisso favorável entre a definição do número de marchas, o desempenho de aceleração, a saída de rampa e o consumo de combustível. Outros pontos a serem considerados são a confiabilidade e a durabilidade do conjunto.

Existem, atualmente, diversas transmissões veiculares conforme segue:

a) **Transmissões manuais de múltiplas relações:** as transmissões manuais são aquelas nas quais o condutor troca as marchas manualmente. São as transmissões mais comumente aplicadas uma vez que apresentam um custo de produção e de manutenção menos elevado. As suas configurações podem ser de engrenamento deslizante (a), de engrenamento constante (b), de engrenamento sincronizado (c), de conversor de torque com embreagem acoplada (d) ou automatizada, também conhecida por robotizada (e), conforme a figura 16:

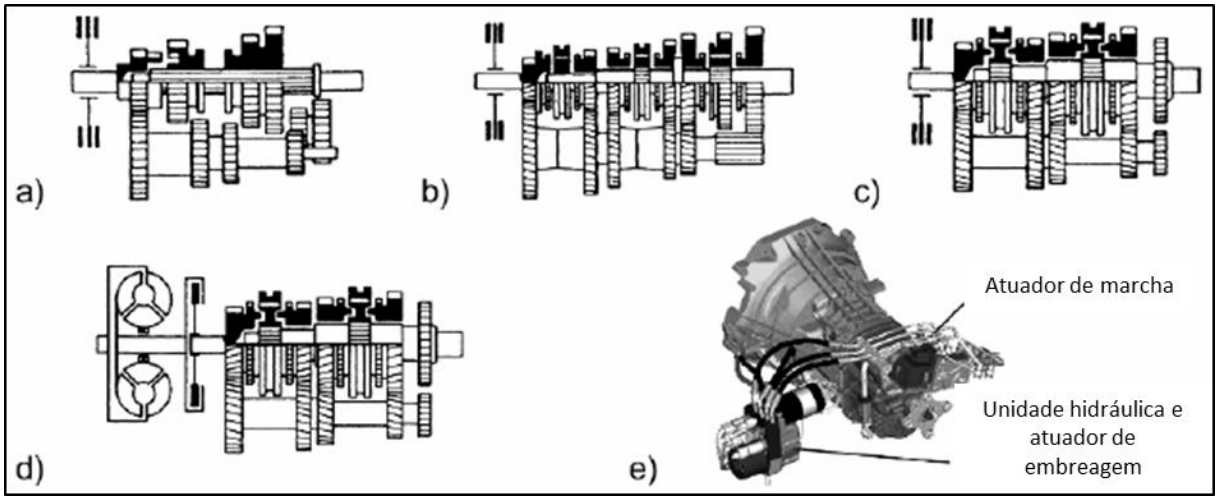

Figura 16 – Diversos tipos de transmissões manuais de múltiplas relações
Fonte: Naunheimer et al., 2011, p. 11

b) **Transmissões automáticas de múltiplas relações:** as transmissões automáticas são aquelas nas quais as trocas de marcha são realizadas automaticamente de acordo com a rotação e a carga do motor, a carga do veículo, o pavimento e as condições climáticas, por meio de um sistema hidráulico acionado por válvulas solenoides comandadas por uma central de controle. Estas transmissões, embora amplamente aplicadas, são mais caras e podem ser responsáveis por um maior consumo de combustível em relação às transmissões manuais. As suas configurações podem ser de contra eixo (a), convencional (b) ou de dupla embreagem, também conhecida por *Dual Clutch Transmission* (DCT) (c), de acordo com a figura 17:

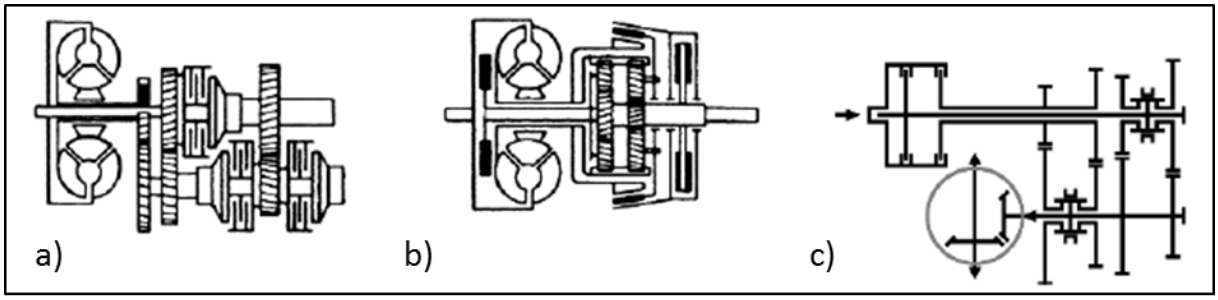

Figura 17 – Diversos tipos de transmissões automáticas de múltiplas relações
Fonte: Naunheimer et al., 2011, p. 11

c) **Transmissões continuamente variáveis:** as transmissões continuamente variáveis são automáticas, no entanto as suas relações são alteradas continuamente visando manter a melhor relação entre a tração e o consumo de combustível. Estas transmissões, por sua vez, vêm sendo aplicadas cada vez mais, pois o seu custo é similar ao das transmissões automáticas, porém o seu consumo de combustível é inferior ao das transmissões manuais. As suas configurações podem ser hidrostática com divisão de potência (a), continuamente variável por discos móveis em cunha e uma correia metálica, também conhecida por *Continuously Variable Transmission* (CVT) (b) ou por discos de fricção, também conhecida por Toroidal (c), como podem ser vistas na figura 18:

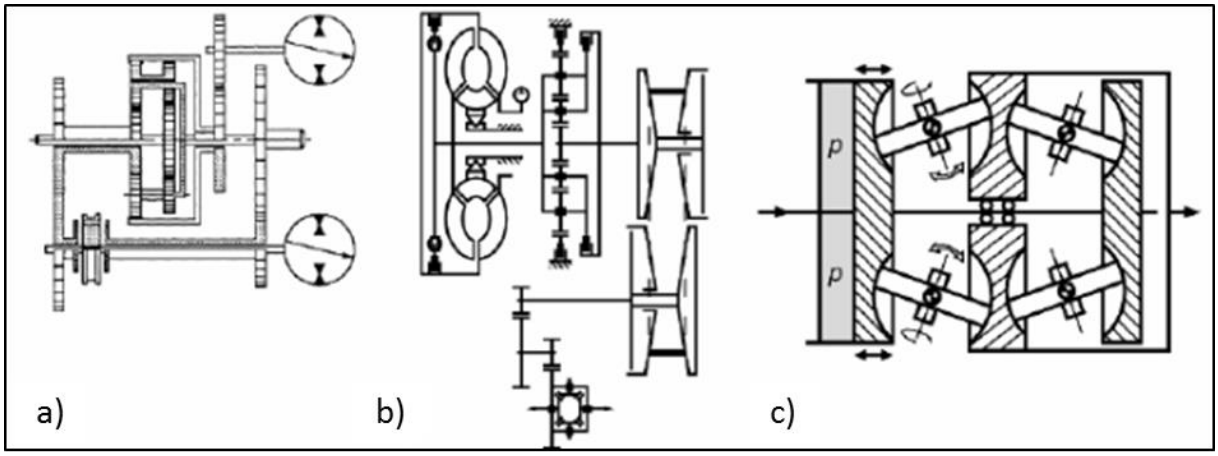

Figura 18 – Diversos tipos de transmissões continuamente variáveis
Fonte: Naunheimer et al., 2011, p. 11

3.1.2.1 Acoplamento entre motor e veículo

Conforme Naunheimer et al. (2011), o sistema de transmissão é responsável pela mediação entre o motor e o conjunto roda-pneu. Desta maneira, a transmissão adapta a transferência da potência disponível no motor à resistência à condução, ou seja, a todas as forças resistentes ao movimento do veículo:

a) Resistência ao rolamento;
b) Resistência aerodinâmica;
c) Resistência ao desnivelamento do pavimento (aclive ou declive);
d) Resistência à aceleração;

O motor apresenta três curvas características: a curva de torque, a de potência e a curva de frenagem, todas elas pela rotação do motor. A figura 19 apresenta o exemplo de uma curva de desempenho em plena carga de um motor de combustão interna:

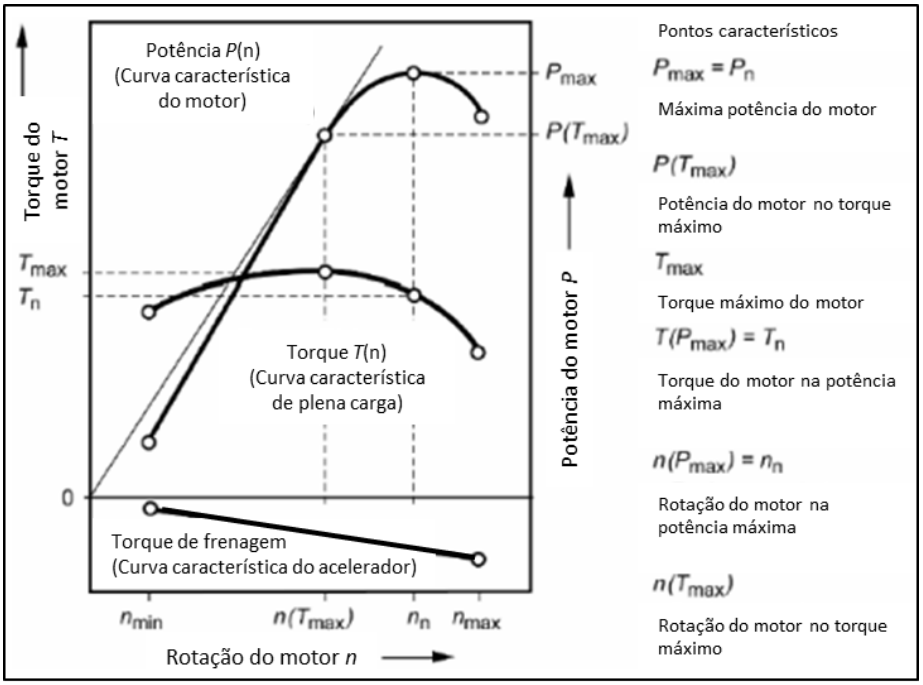

Figura 19 – Curva característica do motor em plena carga
Fonte: Naunheimer et al., 2011, p. 96

A curva de potência pela rotação do motor é denominada curva característica do motor. Já a curva de torque pela rotação do motor é denominada curva característica de plena carga. Finalmente, a curva da posição do pedal do acelerador pela rotação do motor (*braking torque*), ou curva característica do acelerador, evolui linearmente desde a rotação de marcha lenta do motor, n_{min} ou 0% de pedal, até a máxima rotação do motor, n_{max} ou 100% de pedal, reduzindo o torque de frenagem.

O condutor usa o pedal do acelerador para indicar a potência desejada do motor. Assim, o pedal completamente pressionado (100%) corresponde à curva de plena carga do motor. Contudo, quando o pedal não está pressionado (0%), temos a curva característica do acelerador, ou seja, o maior torque de frenagem. A figura 20 apresenta diversas posições de pedal para a curva de torque de um motor do ciclo Otto. O termo "ângulo de borboleta" é mais utilizado do que o termo "posição do pedal do acelerador" e ele corresponde à abertura da válvula do corpo de borboleta, ou seja, um ângulo de borboleta de 90° corresponde à abertura completa da válvula, ou 100% de pedal:

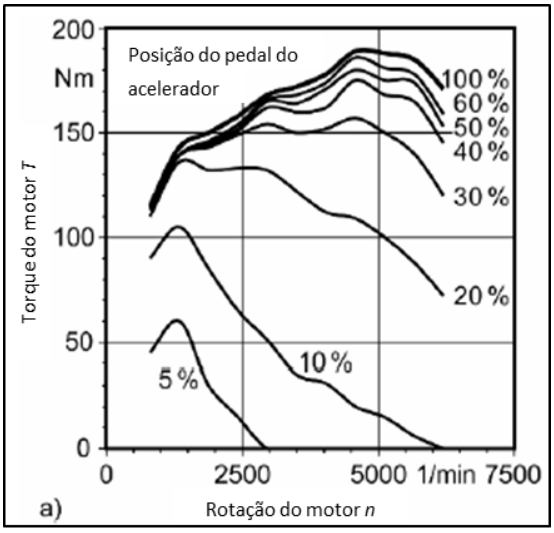

Figura 20 – Curva de torque pela rotação do motor para diversas posições de pedal
Fonte: Naunheimer et al., 2011, p. 97

Outra curva fundamental do motor é a curva de consumo específico de combustível ou ilhas de iso-rendimento. Nela, existe um ponto de mínimo consumo de combustível ($b_{e,min}$) logo abaixo da curva de plena carga do motor, nas rotações mais baixas do mesmo. A localização precisa deste ponto, bem como o valor do mesmo, varia de motor para motor. Num motor do ciclo Otto, por exemplo, este valor mínimo está em torno de 250g/kWh.

Assim como a curva característica do motor, o mapa de consumo específico de combustível é crucial para o acoplamento do motor, do sistema de transmissão e do veículo. Desta forma, cabe à transmissão explorar as zonas de maior eficiência de consumo de combustível do mapa do motor. A figura 21 apresenta as linhas de contorno de consumo de combustível constante (b_e), as chamadas ilhas de iso-rendimento, assim como as curvas de torque pela rotação a uma determinada constante de potência do motor, as hipérboles de potência (linha traço-dois pontos). Portanto, uma mesma potência do motor pode ser atingida em diferentes valores de torque e rotação, pontos 1 e 2 no mapa de consumo, em diferentes valores de consumo específico de combustível. O ponto de mínimo consumo de combustível pode ser encontrado em qualquer hipérbole de potência e a curva que liga estes pontos é denominada curva de mínimo consumo de combustível (linha grossa), conforme a figura 21:

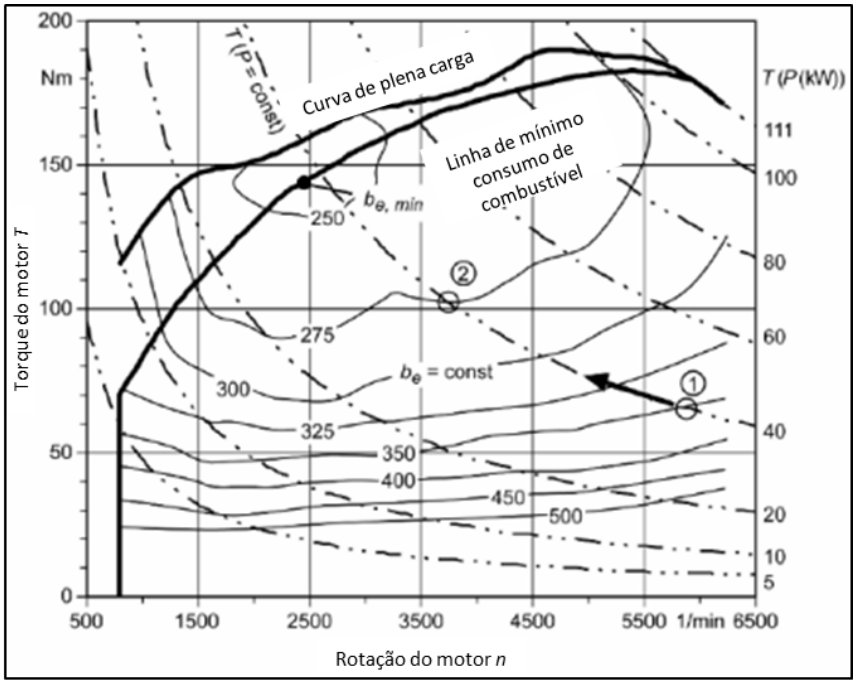

Figura 21 – Curva de consumo específico de um motor do ciclo Otto
Fonte: Naunheimer et al., 2011, p. 99

Entretanto, existem outros fatores que impactam o acoplamento entre motor e veículo além do consumo de combustível. Dentre estes fatores destacam-se as emissões, intimamente ligadas ao consumo de combustível, o conforto, relacionado ao nível de ruído e às vibrações, e o desempenho do veículo, todas elas antagônicas entre si.

O desempenho de um veículo é dado por sua velocidade máxima e por sua capacidade de subida e de aceleração. Ele pode ser determinado comparando-se a tração disponível e a tração exigida a qualquer momento conforme o balanço das forças tratoras menos as forças resistentes. O procedimento para a determinação da velocidade máxima, da aceleração e da tração de um veículo é definido pelas normas dos órgãos regulatórios de cada país.

É necessário, para a determinação da velocidade máxima do veículo, que algumas condições normalizadas sejam respeitas. Assim, a velocidade máxima (v_{max}) pode ser encontrada para cada marcha, a partir do diagrama de tração para vários desnivelamentos em função da velocidade do veículo, na intersecção da curva de tração exigida (curva mais fina) com a curva de tração disponível em cada marcha (curva mais grossa). Já a velocidade máxima final do veículo pode ser encontrada na intersecção da curva de tração disponível com a curva do nível plano (q’ = 0%), conforme a figura 22:

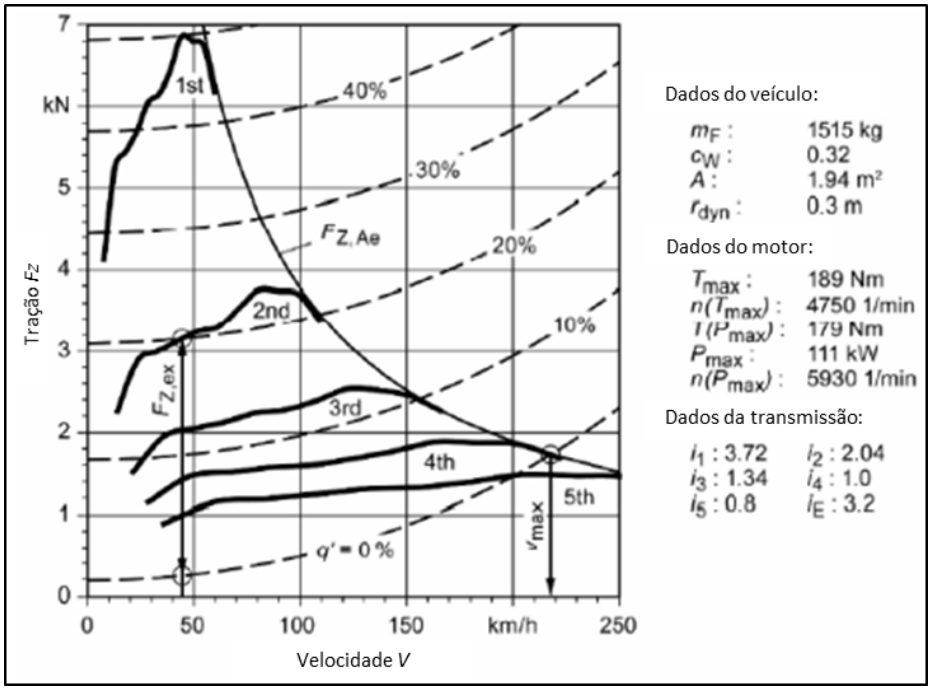

Figura 22 – Diagrama de tração pela velocidade para diferentes desnivelamentos
Fonte: Naunheimer et al., 2011, p. 117

O desempenho de subida é representado pela resistência ao aclive. Desta forma, uma velocidade uniforme (a = 0) é assumida durante a determinação do desempenho de subida de tal maneira que a tração excedente ($F_{z,ex}$ representado na figura 22) esteja disponível para vencer o aclive. A tração excedente em função da velocidade pode ser lida no diagrama de tração para cada marcha. Assim, o desempenho de subida pode ser calculado para cada marcha e plotado em função da velocidade, conforme a figura 23. Note que o aclive também pode ser representado pelo valor percentual de rampa.

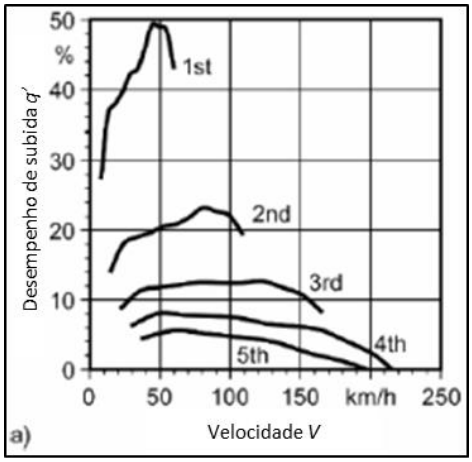

Figura 23 – Desempenho de subida por marcha pela velocidade do veículo
Fonte: Naunheimer et al., 2011, p. 128

O desempenho de aceleração, ou a máxima aceleração do veículo (a_{max}), é determinado no plano, em função da tração excedente pela massa do veículo e o momento de inércia de cada marcha. A figura 24 apresenta o desempenho de aceleração de um veículo de passeio pela velocidade:

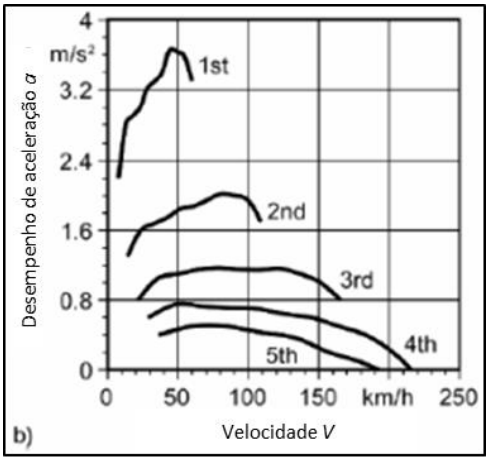

Figura 24 – Desempenho de aceleração por marcha pela velocidade do veículo
Fonte: Naunheimer et al., 2011, p. 128

Infelizmente, conforme mencionado anteriormente, o melhor consumo de combustível e o melhor desempenho do veículo são antagônicos. Desta maneira, durante o projeto de um veículo, no momento da definição do trem de força do mesmo, as hipóteses de base do projeto são cruciais para a definição do melhor acoplamento entre motor e veículo. Caso a hipótese de base do projeto seja desenvolver um veículo com o menor consumo de combustível, tanto as relações de marcha da transmissão quanto a transmissão final (diferencial), a serem apresentadas nas próximas seções, devem ser definidas de modo a privilegiar os pontos de mínimo consumo específico de combustível (linha grossa). No entanto, caso a hipótese de base do projeto seja desenvolver um veículo com alto desempenho, as relações de marcha deverão privilegiar a máxima aceleração e a máxima velocidade (linha grossa traço-ponto). Finalmente, caso a hipótese seja buscar um veículo mais equilibrado, uma razão de compromisso entre desempenho e consumo deverá ser encontrada (linha grossa tracejada), conforme a figura 25:

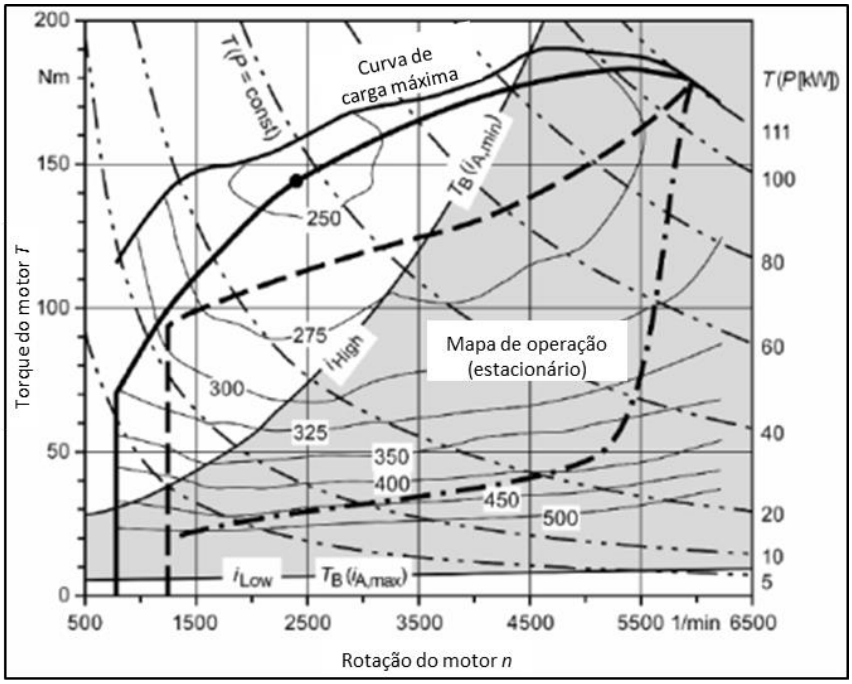

Figura 25 – Razão de compromisso entre o mínimo consumo e o máximo desempenho
Fonte: Naunheimer et al., 2011, p. 135

3.1.2.2 Relação de transmissão total

Conforme explicado na seção anterior, a definição da relação de marcha é fundamental para um projeto de veículo uma vez que cabe à transmissão adaptar o motor ao veículo. Logo, o sistema de transmissão deve oferecer uma relação entre a rotação do motor e a velocidade das rodas, habilitando o veículo a mover-se em condições de alta de demanda de tração (lama ou neve), a atingir a máxima velocidade especificada em projeto e a trabalhar nas regiões de ótima eficiência energética do mapa de desempenho do motor (NAUNHEIMER et al., 2011).

Atualmente, o maior controle sobre os limites de velocidade e o adensamento do trânsito nas grandes cidades vêm reduzindo a importância da máxima velocidade final. Em contrapartida, o desempenho de aceleração vem ganhando importância. Portanto, uma ampla relação de transmissão total do veículo tem se tornado importante já que ela necessita oferecer:

a) Uma relação de alta redução para o máximo torque de saída, no caso de uma alta demanda de tração, e para a aceleração.
b) Uma relação de alta desmultiplicação para as baixas rotações do motor a altas velocidades, também conhecidas por *overdrives*.

Define-se a relação de transmissão total como a relação entre a marcha mais longa e a mais curta. Ela depende da potência específica do veículo (máxima potência sobre a soma do peso do veículo mais carga, em kW/t), das rotações mínima e máxima do motor e da aplicação do veículo. Assim, veículos com baixa potência específica, como os veículos comerciais, necessitam de maiores relações totais. O mesmo ocorre com veículos de passeio equipados com motores Diesel, uma vez que estes apresentam menores rotações de motor.

3.1.2.3 Maior relação de marcha

A maior demanda por tração especificada para um veículo deve ser conhecida para a definição da relação da marcha de maior multiplicação de torque. O limite de escorregamento entre os pneus e o pavimento é um limitador físico que deve ser levado em consideração ao estabelecer a tração nos pneus. A resistência aerodinâmica é ignorada dada a baixa velocidade do veículo nesta marcha. Já para os pneus, um balanço deve ser realizado entre as máximas especificações de aceleração, porcentagem de rampa, pavimento e carga.

A maior relação de marcha, também conhecida por relação de máximo torque de saída, depende principalmente da potência específica do veículo. Duas condições extremas devem ser consideradas:

a) A máxima rampa que pode ser subida sem aceleração (a = 0), conforme o desempenho de subida da seção 3.1.2.1.
b) A maior aceleração no plano, conforme o desempenho de aceleração na seção 3.1.2.1.

3.1.2.4 Menor relação de marcha

A menor relação de marcha é definida assumindo que não haja escorregamento entre os pneus e o pavimento e que a máxima velocidade do veículo seja atingida próxima à máxima rotação do motor. Existem diversos fatores a serem considerados nesta definição, como o tempo percentual total de uso na marcha mais alta, a reserva de aceleração e o consumo de combustível.

O aumento da relação de transmissão total com o mesmo número de marchas cria grandes espaços entre elas, diminuindo o desempenho de aceleração. No entanto, aumentar a

relação final (diferencial, conforme a seção 3.1.3) sem alterar a relação de transmissão total reduz o máximo torque de saída, reduzindo assim o desempenho de subida e aumentando o desgaste da embreagem. Por esta razão, as montadoras estão aplicando uma marcha adicional às suas transmissões (*overdrive*), reduzindo a rotação do motor em até 20%.

3.1.2.5 Relações de marcha intermediárias

As relações de marchas intermediárias devem ser grandes o suficiente de forma que ao reduzir uma marcha, quando a rotação de máximo torque do motor é atingida pela marcha anterior, não ocorra sobre rotação. Os seguintes aspectos devem ser considerados para a definição das relações de marchas intermediárias:

a) Quanto maior for o número de marchas, melhor será explorada a eficiência do motor ao aderir à hipérbole de tração (figura 26). Entretanto, quanto maior for o número de marchas, maior será a quantidade de trocas de marcha e maior serão o peso e o tamanho das transmissões.
b) O percentual da distância percorrida nas menores marchas é baixo, principalmente no caso dos veículos de passeio.
c) O percentual da distância percorrida em cada marcha depende da potência específica do veículo, do perfil da rota percorrida, das condições de trânsito e do comportamento do condutor.
d) A troca de marcha será mais fácil e prazerosa quanto menor for o passo da troca de marcha entre duas marchas vizinhas.
e) A carga térmica dos anéis sincronizadores é proporcional ao quadrado do passo de troca de marcha.

Tendo em vista os aspectos contraditórios apresentados acima, um compromisso deve ser encontrado durante o projeto da transmissão. Desta maneira, dois métodos de cálculo do passo foram comprovados na prática:

a) **Passo geométrico (r = 1):** a aproximação à hipérbole de tração efetiva ($F_{Z,Ae}$ na figura 26) é boa em todas as marchas. A diferença em velocidade máxima entre as marchas aumenta consequentemente a cada troca até a última marcha. O passo geométrico é mais aplicado a veículos comerciais uma vez que a potência específica é baixa e o passo das marchas possui significância similar.

b) **Passo progressivo (r < 1):** este passo é largamente aplicado nos veículos de passeio, pois quanto maior for a marcha, menor será o seu passo. A figura 26 demonstra como a diferença entre a velocidade máxima de cada marcha permanece constante. Já no diagrama de tração, os espaços entre a hipérbole de tração efetiva e a tração disponível são reduzidos nas marchas mais altas. Isto se reflete num melhor conforto de troca de marcha e melhor desempenho de aceleração. No entanto, a grande quantidade de potência excedente disponível a baixas velocidades nos veículos de passeio permite aceitar maiores espaços na tração disponível.

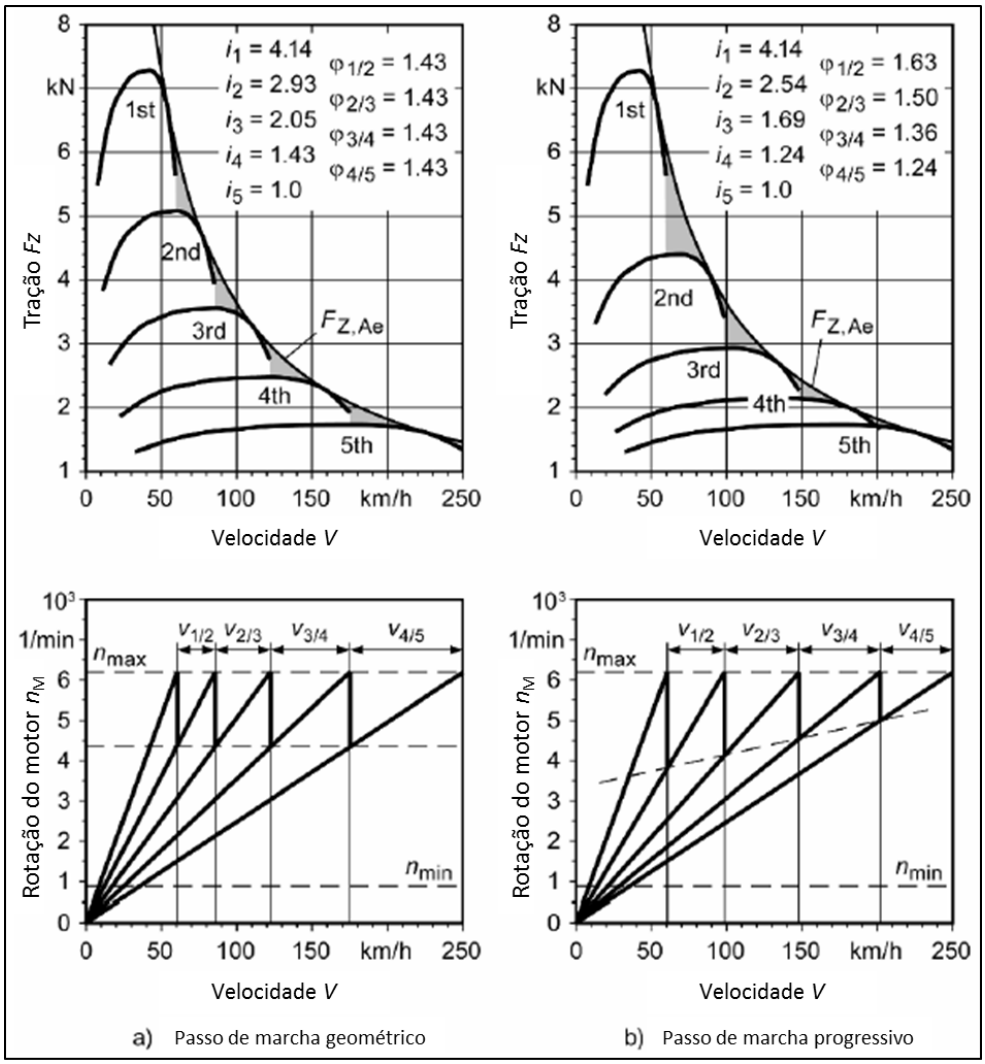

Figura 26 – Gráficos de tração e rotação do motor pela velocidade para os passos geométrico e progressivo
Fonte: Naunheimer et al., 2011, p. 112

3.1.3 Diferencial

Segundo Naunheimer et al. (2011), a transmissão final pode ser composta por diversos componentes:

a) Eixo de transmissão;
b) Diferencial;
c) Redutor;
d) Caixa de transferência (no caso de diversos eixos tratores);

A disposição da transmissão final depende do posicionamento do motor na direção de movimento do veículo, da posição do motor em relação à transmissão e da definição da relação de redução da transmissão, da caixa de transferência, do eixo e do redutor. Evidentemente, os sistemas de transmissão dos veículos de passeio diferem muito dos veículos comerciais dada a diferença de aplicação de ambos.

A transmissão final dos veículos de passeio é feita através da aplicação de um diferencial. A escolha de qual tipo de diferencial a aplicar a um veículo depende justamente da disposição do trem de força e da definição do eixo trator. Assim, um veículo com motor dianteiro transversal e com tração dianteira aplicará um diferencial paralelo à transmissão (a). Contudo, um veículo com motor dianteiro longitudinal e com tração traseira irá aplicar um diferencial no eixo traseiro, ligado à transmissão por um eixo de transmissão (b). A figura 27 apresenta as duas disposições mais comuns de trem de força dos veículos de passeio atuais:

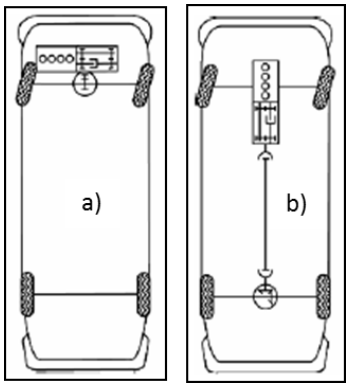

Figura 27 – Disposições mais comuns do trem de força dos veículos de passeio
Fonte: Naunheimer et al., 2011, p. 142

O diferencial tem a função de transmitir o torque e o movimento rotativo da transmissão aos semieixos e às rodas, reduzindo também a velocidade de rotação. Portanto,

quanto mais longa for a relação de diferencial aplicada, maior será a economia de combustível e pior será o seu desempenho de aceleração.

Existem, atualmente, três tipos de engrenamentos para o diferencial:

a) **Roda dentada:** é o tipo mais comum devido à popularidade dos veículos de motor dianteiro transversal, à sua dimensão compacta, ao custo de produção de suas engrenagens (helicoidais) e à manutenção barata. A roda dentada do diferencial pode ser acionada diretamente pelo eixo secundário da transmissão ou por uma engrenagem intermediária (figura 28a). Embora a disposição da transmissão seja paralela ao motor, o que é favorável, os eixos de transmissão geralmente possuem comprimentos diferentes, o que é desfavorável.

b) **Engrenagem cônica:** é aplicada nos trens de força quando o motor é longitudinal ou em veículos de tração nas quatro rodas, pois o diferencial é montado no eixo de tração. Assim, o diferencial é acionado por um eixo de transmissão e a transferência do torque e da rotação é feita a 90°. Seu engrenamento pode ser de dentes helicoidais (figura 28b), ou hipóide (figura 28c). Em ambos os casos, a sua capacidade de carga e o seu ruído são melhores do que a definição de roda dentada. A versão hipóide permite uma redução do diâmetro da coroa com o aumento do diâmetro do pinhão em relação à versão helicoidal, sendo mais compacta, permitindo também um aumento da capacidade de carga. A distância "a" entre centros permite ainda a montagem mais baixa do eixo de transmissão, diminuindo o tamanho do túnel de transmissão dentro do veículo. No entanto, o atrito de escorregamento entre os dentes na versão hipóide é muito superior à versão helicoidal, criando pressões superficiais muito grandes o que demanda óleos de lubrificação de alta resistência à pressão.

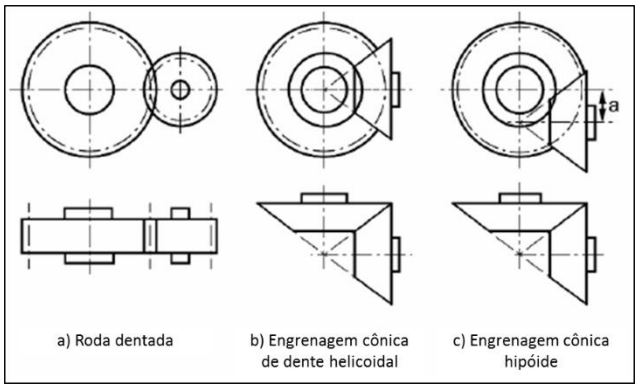

Figura 28 – Diversos tipos de engrenamentos para um diferencial
Fonte: Naunheimer et al., 2011, p. 223

O diferencial também tem a função de permitir que as rodas tratoras girem em rotações diferentes durante uma curva, ou seja, a velocidade de rotação das rodas depende da resistência à rotação a que estão submetidas. Isto é possível devido à aplicação de um sistema de engrenagens cônicas denominadas planetárias que são solidárias aos eixos de tração e engrenagens satélites que permitem a diferença de rotação entre as duas planetárias, como no caso de uma curva ou da perda de tração com o solo em uma das rodas. Caso não haja diferença entre a resistência à rotação das duas rodas, cada volta dada pelo satélite corresponde a uma volta dada pela planetária, como se as rodas estivessem ligadas por um eixo rígido. A figura 29 apresenta um exemplo de uma transmissão manual de cinco marchas, transversal, com diferencial acoplado:

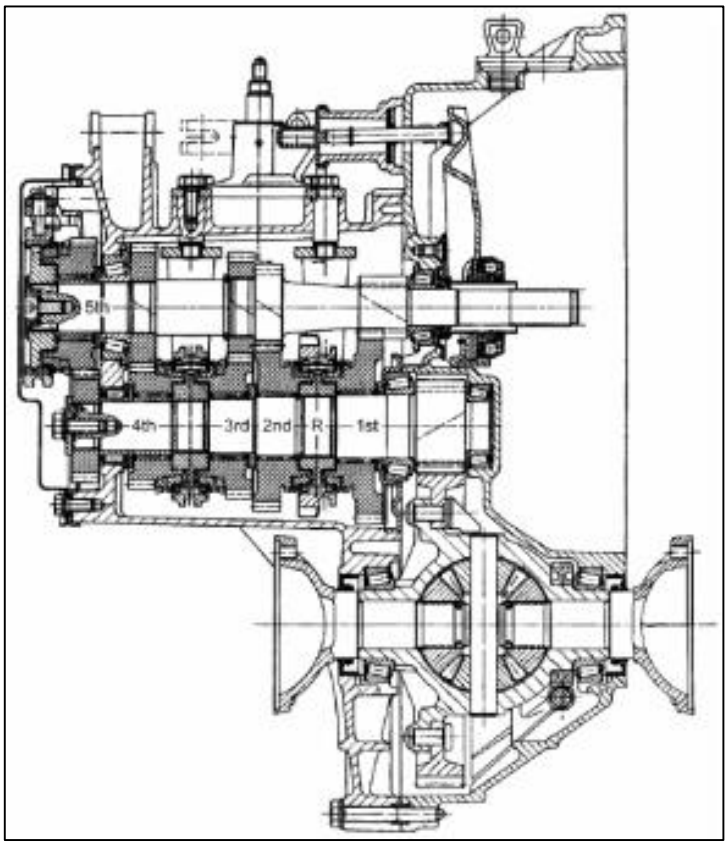

Figura 29 – Exemplo de uma transmissão manual de cinco marchas com diferencial
Fonte: Naunheimer et al., 2011, p. 482

3.1.4 Óleo lubrificante

Conforme Naunheimer et al. (2011), um sistema tribológico é constituído por dois corpos contrapostos, por exemplo o eixo virabrequim e um par de bronzinas, e um lubrificante

intermediário. Um destes corpos se movimenta sobre o outro enquanto a função do lubrificante é de mantê-los separados em todas as rotações e cargas. Independente da condição deste sistema, podem-se observar casos de lubrificação limítrofe (contato metal-metal), de lubrificação mista (contato entre os picos de rugosidade dos dois corpos) ou de lubrificação hidrodinâmica, conforme a curva de Stribeck (figura 30):

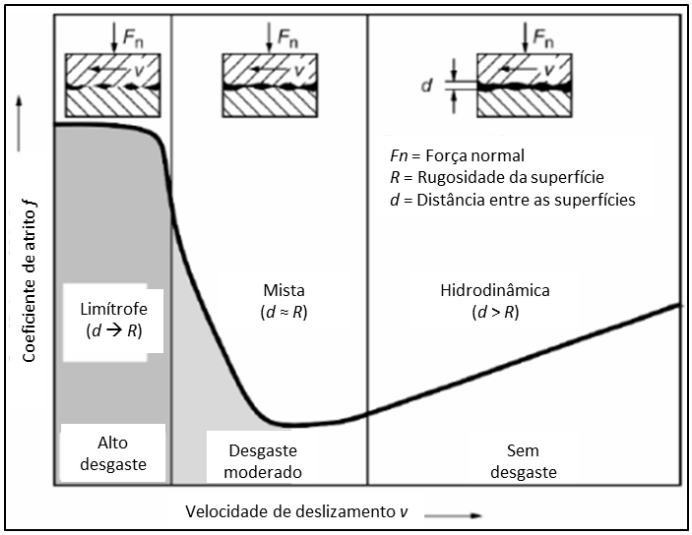

Figura 30 – Relação entre o coeficiente de atrito e a velocidade de deslizamento
Fonte: Naunheimer et al., 2011, p. 431

A cada ano que passa, as aplicações automotivas dos lubrificantes têm se tornado cada vez mais exigidas, tanto para os motores de combustão interna, quanto para os sistemas de transmissão. Eles devem suportar grandes variações de temperatura como, por exemplo, valores muito abaixo de 0°C em países frios durante a partida a frio e valores muito elevados em países quentes durante o funcionamento, e grandes variações de pressão como, por exemplo, de contato, de esmagamento ou de cisalhamento. Além disto, o processo de diminuição do peso e do tamanho dos motores e das transmissões, mantendo o mesmo desempenho, também conhecido por *downsizing*, demanda a redução do volume de óleo aplicado e, consequentemente, a redução do volume "consumível". Adicionalmente, existe a demanda pela redução do passo de troca de óleo durante o ciclo de vida do motor no pós-venda ou, em alguns casos mais extremos de aplicações de transmissão, que óleo jamais venha a ser trocados. Todas estas demandas têm levado os lubrificantes ao topo do desenvolvimento tecnológico.

No entanto, o lubrificante não cumpre mais a função de somente lubrificar, mas sim uma lista extensa de outras funções, como segue:

a) Redução do atrito e do desgaste (economia de combustível);
b) Dissipação de calor;
c) Lubrificação hidrodinâmica de mancais por efeito cunha;
d) Formação de barreiras de vedação nas zonas de lubrificação mista (ex.: entre a câmara de combustão e o cárter, através dos anéis e dos cilindros);
e) Limpeza de superfícies;
f) Limpeza de impurezas para o filtro de óleo;
g) Proteção contra a oxidação do óleo;
h) Proteção contra a corrosão de componentes;
i) Proteção contra a emulsão do óleo;
j) Proteção contra ataques químicos (ex.: utilização do etanol);
k) Inibição de formação de depósitos (carbonização e borra);
l) Compatibilidade com peças em elastômero e peças pintadas;
m) Solubilidade com gasolina e outras substâncias;
n) Separação da água;
o) Estabilidade em baixas e altas temperaturas (viscosidade);
p) Resistência ao envelhecimento;
q) Acionamento hidráulico de sistemas (abertura variável de válvulas, compensação de folga de válvulas, etc.);

Durante o funcionamento normal de um motor de veículo de passeio, a temperatura do óleo no cárter varia entre 80 e 90°C, podendo chegar a 110°C em condições extremas e entre 150 e 170°C nos mancais hidrodinâmicos.

De acordo com Martins (2006), a característica mais importante do óleo é o índice de viscosidade. Ele representa a relação entre a viscosidade e a temperatura específica do óleo. Atualmente, segundo a *Society of Automotive Engineers* – SAE, os óleos são classificados como *multigrade*, ou seja, eles apresentam características diferentes de viscosidade a baixas e altas temperaturas. Desta forma, estes óleos apresentam viscosidade relativamente baixa em baixas temperaturas, facilitando a partida e a lubrificação durante o aquecimento do motor e ainda mantém a viscosidade necessária em altas temperaturas para a perfeita lubrificação e menor consumo de combustível a quente.

O sufixo W (*Winter*) da classificação SAE refere-se à utilização em baixas temperaturas. Desta maneira, por exemplo, um óleo de classificação SAE 5W-30 tem as características de um óleo 5W a baixa temperatura (-20°C) e de um óleo SAE 30 a 100°C.

Entretanto, outros parâmetros também são importantes para a escolha da viscosidade além da temperatura, como, por exemplo, a carga e a velocidade. Logo, quanto maior for a carga, maior deverá ser a viscosidade para uma mesma velocidade e, quanto maior for a velocidade, menor deverá ser a viscosidade. A figura 31 apresenta uma comparação dos diversos sistemas de classificação de viscosidade, onde a classificação *International Organization for Standardization* – ISO – é aplicada para óleos industriais e para engrenagens:

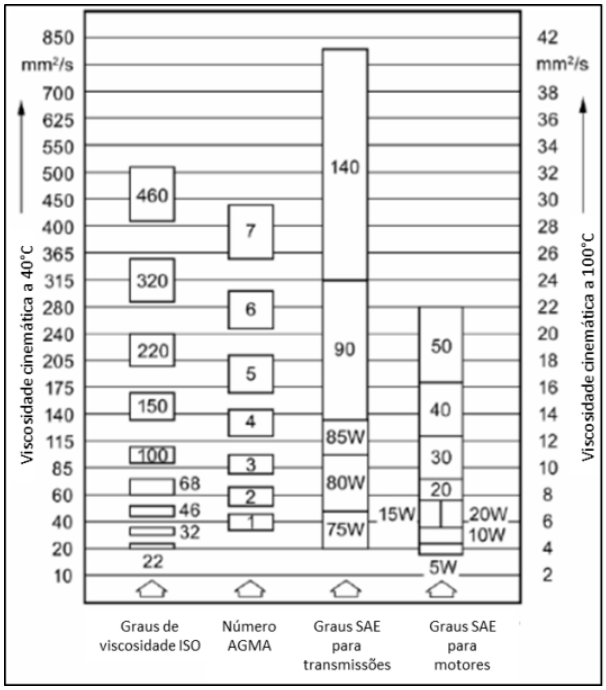

Figura 31 – Comparação dos vários sistemas de classificação da viscosidade
Fonte: Naunheimer et al., 2011, p. 431

3.1.4.1 Composição do óleo lubrificante

Segundo Brunetti (2012), os lubrificantes atuais são compostos por diversos constituintes, ou seja, um óleo de base e um pacote de aditivos.

Os óleos de base são classificados em:

a) **Óleo mineral:** é obtido a partir de frações do petróleo. Este óleo passa por processos de refino mais simples, como a extração de ceras (óleos do grupo I), resultando numa mistura não uniforme de hidrocarbonetos com diferentes tamanhos de cadeias moleculares com significativa quantidade de parafinas e ceras. Podem passar também por processos mais sofisticados, como os

hidrotratamentos a baixa e alta temperatura (óleos dos grupos II e III, respectivamente), quebrando as moléculas de parafina e cera em moléculas de óleo mineral (grupo II) ou removendo impurezas como enxofre, parafinas e ceras, atingindo assim boa uniformidade e estabilidade molecular (grupo III).

b) **Óleo semissintético:** trata-se, geralmente, de um óleo do grupo III misturado com um pacote de aditivos de desempenho e de melhorador de índice de viscosidade.

c) **Óleo sintético:** é obtido a partir de derivados do petróleo por processos petroquímicos que permitem o controle da estrutura molecular dos componentes das bases e total isenção de moléculas sulfuradas e nitrogenadas. São estruturas mais homogêneas e mais resistentes à oxidação. As bases mais aplicadas na indústria automobilística são as polialfaolefinas (PAO) obtidas pela oligomerização do etileno numa planta química. Assim, o tamanho das moléculas é mais homogêneo e menor, garantindo um óleo de base de baixo coeficiente de atrito interno para lubrificantes de baixa viscosidade. Infelizmente, esta é uma base muito cara.

Conforme Brunetti (2012), o processo de refino do óleo de base elimina componentes indesejáveis do óleo, mas também elimina compostos fundamentais para a boa lubrificação, principalmente no refino por solventes. Os motores de combustão interna e os sistemas de transmissões atuais são duramente solicitados, impedindo a aplicação de óleos minerais puros que não são capazes de suportar tais solicitações. Portanto, os óleos atuais passam por diversos processos de refino e são tratados com aditivos químicos que lhes conferem as propriedades desejadas.

Os aditivos têm por objetivo não só conferir uma propriedade inexistente ao óleo de base, mas também melhorar algumas propriedades já existentes, porém insuficientes para a aplicação final. Entretanto, a escolha de um aditivo é complexa já que ele pode melhorar uma característica e ao mesmo tempo piorar outra.

O desenvolvimento de aditivos para lubrificantes é caro e demorado, sendo monopolizado por algumas poucas companhias no mundo. Geralmente, eles representam de 15 a 20% em peso do lubrificante. Eles são vendidos às fábricas de lubrificantes e são misturas de compostos nas formas sólida ou líquida, chamados agentes. Na maior parte dos casos, estes agentes são misturados às bases do grupo III ou PAO e, por possuir mais de um agente, também são conhecidos por pacotes de aditivos. Existem agentes que apresentam mais

de uma função, os aditivos multifuncionais, que são preferidos por terem um custo menor e por reduzirem possíveis interações que possam existir em diferentes componentes.

Os aditivos são divididos em três classes em função do seu modo de ação:

a) Aqueles que têm um papel físico, melhorando certas propriedades físicas do lubrificante ou lhe conferindo novas características, afetando a reologia do mesmo a baixas e altas temperaturas.
b) Aqueles que têm uma ação protetora nas interfaces (ex.: óleo-água ou óleo-combustível), limitando a deterioração ou as alterações químicas do lubrificante durante o período de utilização (até a próxima troca).
c) Aqueles que atuam quimicamente para proteger os componentes contra o desgaste ou contra o ataque de contaminantes agressivos.

Os aditivos conferem ao lubrificante a maior parte das características listadas na seção 3.1.4. Dentre estas características, destacam-se:

a) **Pressão extrema:** para melhorar as características a altas pressões (contatos entre dentes de engrenagens e mancais hidrodinâmicos).
b) **Inibidores de corrosão:** para inibir a formação de ferrugem e subprodutos da oxidação dos componentes.
c) **Detergentes e dispersantes:** para limpar as superfícies dos componentes, remover depósitos e dispersar a borra de óleo.
d) **Modificadores de atrito:** para reduzir o atrito e o desgaste (menor consumo de combustível).
e) **Modificadores do índice de viscosidade:** para melhor desempenho a baixas e altas temperaturas.

O óleo também desempenha um papel fundamental na melhoria da eficiência energética de um veículo uma vez que, ao incorporar os modificadores de atrito em sua composição, ele é capaz de reduzir o coeficiente de atrito nas interfaces dos componentes do motor e da transmissão, contribuindo para a redução do consumo de combustível. Adicionalmente, a vida útil destes óleos é mais elevada propiciando o aumento do passo de troca no pós-venda. Assim, apesar destes óleos serem mais caros, eles são trocados menos vezes e ajudam a reduzir o consumo de combustível durante este período. Portanto, como a sua relação custo-benefício é muito atraente, também considerado como um ganho rápido ou *quick win*, os óleos de baixo atrito vêm sendo aplicados cada vez mais nos veículos atuais.

3.1.5 Pneus

De acordo com Gillespie (1992), outro fator principal de resistência ao movimento de um veículo no plano é a resistência de rolamento dos pneus, conforme apresentado na seção 3.1.2.1. A resistência ao rolamento em pavimentos duros a baixas velocidades é o principal fator de resistência ao movimento do veículo, uma vez que a força de arrasto do veículo só se igualará à força de resistência ao rolamento a partir de 100 km/h, a ser explicado na seção 3.2.

Diferentemente das outras forças de resistência ao movimento do veículo que só atuam em condições específicas, a resistência ao rolamento se manifesta a partir do início do movimento do pneu. Além disto, boa parte da potência gasta por um pneu em movimento é transformada em calor para o próprio pneu. Desta maneira, as resistências à abrasão e à fadiga do pneu são reduzidas à mesma proporção em que o pneu aquece, limitando o desempenho e a vida útil do mesmo. Segundo Gillespie (1992), existem pelo menos sete mecanismos responsáveis pela resistência ao rolamento:

a) Perda de energia por deflexão na lateral do pneu, próximo à área de contato;
b) Perda de energia por deflexão da banda de rodagem do pneu;
c) Perda de energia nas lombadas;
d) Deslizamento da área de contato;
e) Escorregamento longitudinal e lateral do pneu;
f) Deflexão da superfície do pavimento;
g) Arrasto aerodinâmico nas partes internas e externas do pneu;

3.1.5.1 Resistência ao rolamento

A resistência ao rolamento de um veículo é a soma das resistências em todos os pneus:

$$F_{rr} = C_{rr} N \tag{3.4}$$

Onde,

a) F_{rr} = força de resistência ao rolamento (N);
b) C_{rr} = coeficiente de resistência ao rolamento (adimensional);
c) N = força normal do veículo (N);

Diversos fatores impactam a resistência ao rolamento:

a) A temperatura do pneu;
b) A pressão do pneu;
c) A velocidade do pneu;
d) A composição química e o *design* do pneu;
e) O escorregamento do pneu.

Os pneus são responsáveis por $^{1}/_{5}$ do consumo de combustível total do veículo devido às distorções em curva (histerese do pneu) e à deflexão durante a rodagem, fatores estes que geram o aquecimento do pneu, como apresentado anteriormente. Desta maneira, visando diminuir o consumo de combustível nos veículos modernos, pneus com menor Crr, também conhecidos por pneus "verdes", vêm sendo aplicados com maior frequência.

Conforme Barbosa (2013), os pneus "verdes" se diferenciam dos demais no seu *design* e em sua composição química, apresentando maiores proporções de sílica e a aplicação de polímeros funcionais, gerando um composto de menor peso e histerese. A redução do consumo de combustível com a adoção destes pneus pode chegar até a 8%. No entanto, estes pneus podem apresentar uma queda de até 20% em durabilidade e um sobre custo de até 10%. No balanço final, a redução do consumo de combustível obtida durante a vida do pneu é o suficiente para pagá-lo mais do que três vezes, sendo então considerado como mais um ganho rápido (*quick win*).

A figura 32 apresenta a força total de rodagem de um veículo de passeio em função da velocidade: nota-se que a resistência ao rolamento permanece constante ao passo que o arrasto aerodinâmico começa a ser importante a partir dos 100 km/h (~60 mph):

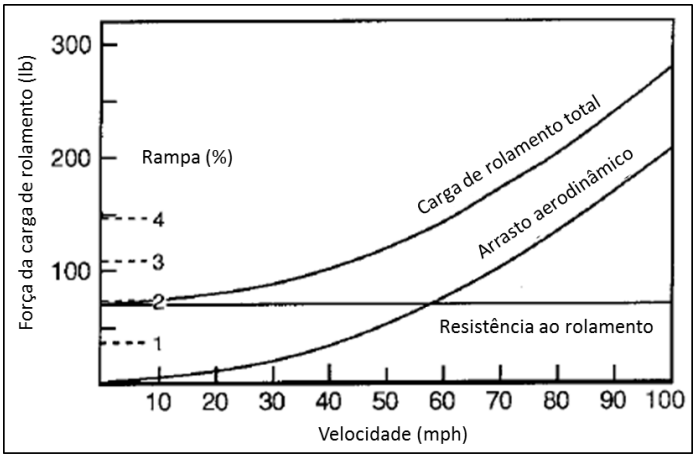

Figura 32 – Força total de rodagem de um veículo de passeio pela velocidade no plano
Fonte: Gillespie, 1992, p. 119

A figura 33 apresenta a porcentagem total de trabalho do motor consumida para vencer as forças de arrasto, de resistência ao rolamento e de aceleração para um veículo de passeio compacto em diversos ciclos de teste, onde o "EUA urbano" equivale à NBR 6601, o "EUA rodoviário" equivale à NBR 7024 e o "EUA combinado" equivale ao ciclo combinado:

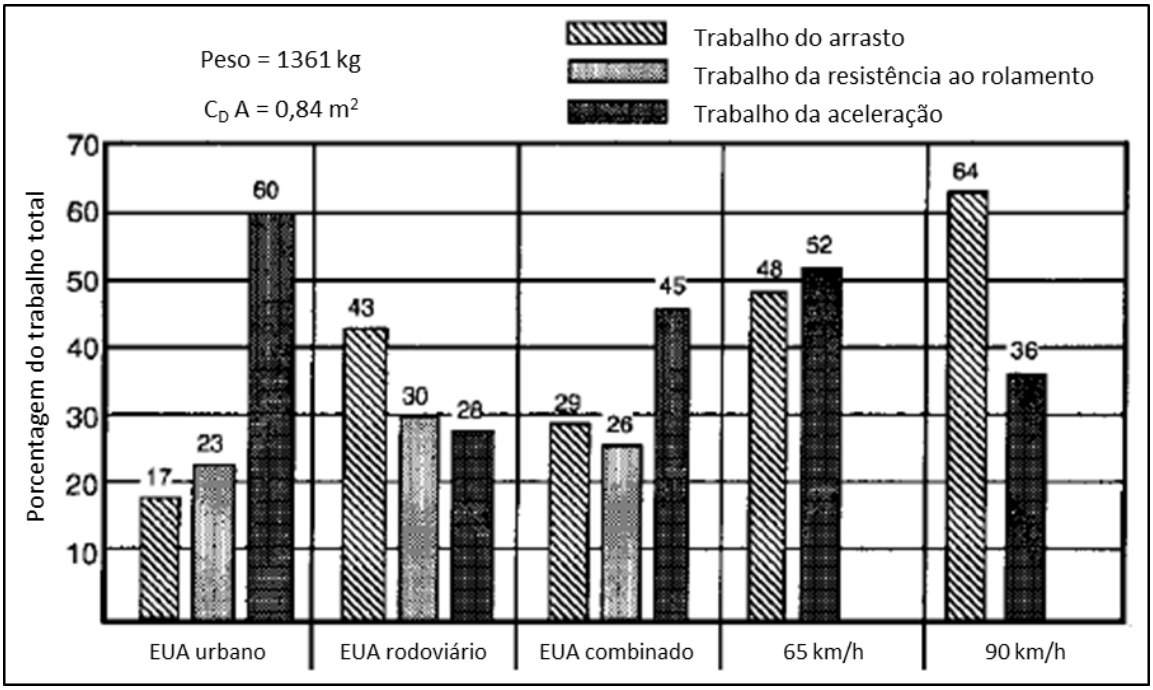

Figura 33 – Subdivisão do trabalho em diversos ciclos de teste para um veículo compacto
Fonte: Gillespie, 1992, p. 120

3.2 Aerodinâmica

De acordo com Gillespie (1992), outro fator importante de resistência ao movimento de um veículo é o arrasto aerodinâmico. As forças aerodinâmicas interagem com o veículo causando arrasto, cargas de levantamento ou rebaixamento, forças laterais, momentos de arfagem, rolamento ou guinada, além do ruído.

3.2.1 Força de arrasto

A aerodinâmica de um veículo pode apresentar um grande impacto ao consumo de combustível. Dentre as forças aerodinâmicas, a força de arrasto que atua longitudinalmente ao

veículo (momento de rolamento), da frente para trás, contra o movimento do mesmo, é a força mais importante e a de maior impacto.

A equação da força de arrasto e dada por:

$$D_A = \frac{1}{2}\rho V^2 C_D A \tag{3.5}$$

Onde,

a) D_A = força de arrasto aerodinâmico (N);
b) ρ = massa específica do ar (kg/m^3);
c) V = velocidade do veículo (m/s);
d) C_D = coeficiente de arrasto aerodinâmico (adimensional);
e) A = área frontal do veículo (m^2);

A carroceria do veículo é a responsável pela maior parte do arrasto gerado. Logo, algumas modificações podem ser aplicadas visando diminuir este arrasto, como por exemplo, a adição de apêndices aerodinâmicos (como saias, *spoilers*, etc.) e leves alterações dos componentes externos do veículo visando reduzir a área frontal de tal forma que se obtenha um ganho em consumo de combustível.

O coeficiente de arrasto aerodinâmico é determinado experimentalmente em testes de túnel de vento ou em testes veiculares conhecidos por *coastdown*. Este coeficiente varia em função da forma dos corpos, conforme apresentado na figura 34:

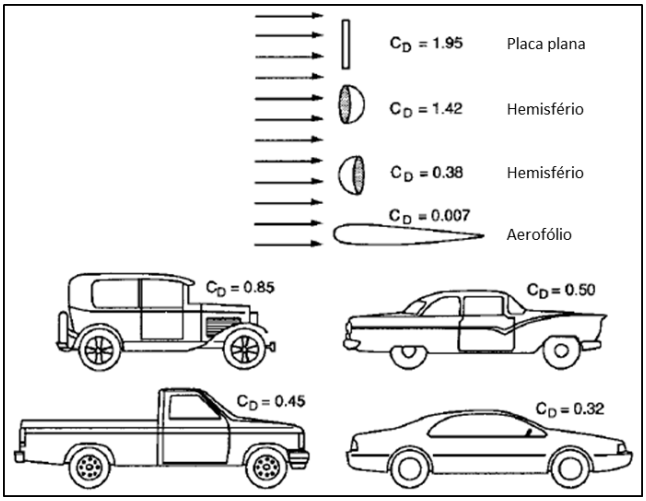

Figura 34 – Coeficiente de arrasto aerodinâmico para vários corpos
Fonte: Gillespie, 1992, p. 98

3.3 Massa

Segundo Morello et al. (2011), a massa de um veículo é uma característica que impacta fortemente o seu consumo de combustível e o seu desempenho de aceleração. Com o passar dos anos, novas gerações de veículos foram sendo apresentadas pela indústria automobilística mundial e, a cada nova geração, mais massa é adicionada ao novo modelo em relação ao seu predecessor devido a inserção de novos equipamentos de segurança (ativa e passiva), de entretenimento, de conforto e de desempenho.

No entanto, diminuir o peso de um veículo não é uma tarefa fácil: depende da aplicação de novos processos de fabricação e de novos materiais, da alteração de componentes estruturais, de componentes internos de acabamento, bem como da aplicação de sistemas automotivos mais modernos e, portanto, mais leves. Não importa qual alteração a aplicar, o custo envolvido será sempre elevado em comparação às demais propostas de melhoria de eficiência energética.

Se alterar um veículo existente é uma tarefa difícil e custosa, o ideal seria então projetar um novo veículo a partir de uma folha em branco com o objetivo de reduzir ao máximo a massa do mesmo. Portanto, os últimos desenvolvimentos veiculares vêm levando este tema muito a sério, aplicando plataformas modulares, materiais de alta resistência e de baixo peso e estruturas com deformações programáveis que permitem aliviar a estrutura do veículo. Adicionalmente, materiais orgânicos e reciclados vêm sendo aplicados com maior frequência, bem como o estepe de tamanho convencional vem sendo substituído pelos estepes finos, contribuindo para a redução da massa total.

3.3.1 Massa em ordem de marcha

De acordo com a NBR 1176 (2006), a massa em ordem de marcha (MOM) de um veículo refere-se à massa total do mesmo, ou seja, a massa do veículo com carroceria, dotado de todos os equipamentos elétricos e auxiliares necessários para o funcionamento normal do mesmo, acrescida da massa dos itens de série e opcionais, bem como:

a) Lubrificantes;
b) Líquido de arrefecimento;
c) Líquido do lavador de para-brisa;

d) Combustível (reservatório abastecido, no mínimo, com 90% da capacidade especificada pela montadora);
e) Roda sobressalente;
f) Extintor de incêndio;
g) Jogo de ferramentas;
h) Macaco;
i) Etc;

3.3.2 Classes de inércia

Conforme a NBR 6601 (2012), a massa do veículo para ensaio deve ser a MOM acrescida de 136 kg, referente à massa do motorista mais passageiro ou bagagem, com tolerância de ± 10%. Esta massa deverá ser comparada à lista de massas da tabela 2 da referida norma de modo a encontrar a classe de inércia equivalente.

Por exemplo, um veículo de massa para ensaio de 1336 kg, ou seja, um veículo de 1200 kg mais 136 kg, entrará na linha de massa de 1333 a 1389 kg, tendo assim uma classe de inércia de 1361 kg (valor da massa média), conforme a tabela 6:

Tabela 6 – Classe de inércia em função da massa do veículo para ensaio

Massa do veículo para ensaio [kg]	Classe de inércia [kg]
1220 a 1276	1247
1277 a 1332	1304
1333 a 1389	**1361**
1390 a 1446	1417

Fonte: NBR 6601, 2012, p. 25.

3.4 Consumo de combustível

O consumo de combustível está cada vez mais em evidência devido ao esgotamento das reservas de combustíveis de origem fóssil e às emissões de poluentes provenientes da combustão dos veículos equipados com motores de combustão interna. Desta forma, os órgãos regulatórios de diversos países vêm restringindo as emissões de poluentes, buscando o desenvolvimento de veículos e de trens de força cada vez mais eficientes que,

consequentemente, diminuem o consumo médio de combustível a cada nova legislação. Assim, os veículos e os seus trens de força passaram a ser classificados por suas eficiências energéticas.

3.4.1 Eficiência energética

Segundo a NBR 7024 (2006), a eficiência energética de um veículo é dada pela autonomia de combustível em km/l, ou seja, a distância em quilômetros percorrida pelo veículo com 1 litro de combustível.

3.4.1.1 Cálculo da autonomia de combustível combinada

A autonomia de combustível combinada é a média das autonomias de combustível urbano e rodoviário na proporção de 55% e 45%, respectivamente, conforme a expressão 3.6:

$$A_{com} = \frac{1}{\left(\frac{0,55}{A_{urb}}\right) + \left(\frac{0,45}{A_{rod}}\right)} \tag{3.6}$$

Onde,

a) A_{com} = autonomia de combustível combinada (km/l);
b) A_{urb} = autonomia de combustível urbano (km/l);
c) A_{rod} = autonomia de combustível rodoviário (km/l);

3.4.2 Consumo energético

De acordo com a Portaria n° 377 (2011), o consumo energético de um veículo é dado pelo consumo de energia por quilômetro percorrido, ou seja, MJ/km.

3.4.2.1 Cálculo do consumo energético

Uma vez calculada a autonomia de combustível combinada, para cada combustível e para a aplicação *Flex Fuel*, podemos calcular o consumo energético combinado. Para isto, a autonomia de combustível deverá ser dividida pela densidade energética de cada combustível, sendo 28,99 MJ/l e 20,09 MJ/l para o E22 e para o E100, respectivamente, conforme a expressão 3.7:

$$CE_{FF} = \frac{\left(\left(\frac{28{,}99}{A_{comE22}}\right) + \left(\frac{20{,}09}{A_{comE100}}\right)\right)}{2} \tag{3.7}$$

Onde,

a) CE_{FF} = consumo energético combinado *Flex Fuel* (MJ/km);
b) A_{comE22} = autonomia de combustível combinada para o E22 (km/l);
c) $A_{comE100}$ = autonomia de combustível combinada para o E100 (km/l);

4 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

4.1 Simulação de um modelo de acoplamento trem de força / veículo

Devido à grande competitividade do ramo automotivo e, visando maximizar a rentabilidade dos novos projetos, existe já há algum tempo a necessidade de se reduzir o tempo e os recursos despendidos durante o desenvolvimento de um novo veículo. Logo, novas ferramentas e metodologias se fazem necessárias, abrindo assim oportunidades para o desenvolvimento de novos códigos de simulação numérica.

Conforme Ciesla, Keribar e Morel (2000), apesar de existirem códigos de simulação da dinâmica dos fluidos computacional unidimensional (1D), ou 1D *Computational Fluid Dynamics* (CFD), aplicados largamente na indústria desde a década de 60 para a simulação do desempenho de um motor por meio do processo de troca dos gases de admissão e de escape do mesmo, muitos destes códigos não são conectados a outros também importantes para o desenvolvimento de veículos, como os códigos para a simulação de sistemas e do controle motor, gerando assim perda de precisão e de produtividade. Portanto, se faz necessário aplicar códigos para a simulação da integração dos diversos sistemas de um veículo como o motor, o trem de força e, finalmente, o próprio veículo.

Hoje em dia, existem no mercado alguns poucos códigos comerciais capazes de simular o acoplamento do trem de força a um veículo, aplicados principalmente com o objetivo de simular a otimização de componentes e sistemas, bem como simular o desempenho, o consumo de combustível e, consequentemente, as emissões de um veículo sem a necessidade de produzir e testar diversos protótipos.

Para explicar a simulação de um modelo de acoplamento do trem de força com o veículo, serão apresentados a seguir dados do código comercial GT-Suite® da Gamma Technologies, aplicado neste trabalho. Trata-se de um código de simulação dinâmica que pode ser baseado num cálculo cinemático para seguir um ciclo regulatório de teste visando medir as emissões e o consumo do veículo. Este código foi escolhido para este trabalho, pois é o código de simulação veicular mais aplicado no mundo pelas montadoras e pelos sistemistas atualmente.

4.1.1 Modelamento do motor

O modelamento do motor no GT-Suite® pode ser realizado de três maneiras distintas:

4.1.1.1 Modelamento completo do motor

Nesta modalidade é criado um modelo detalhado do motor, desde a admissão de ar, passando pela a combustão completa, pelas emissões até a troca de calor dos componentes. Para isto, utiliza-se um código especializado do GT-Suite® que se chama GT-Power®.

O GT-Power®, assim como o GT-Suite®, possui uma biblioteca de componentes que podem ser montados no ambiente de simulação e, para cada um dos componentes escolhidos e montados, deve-se inserir as características técnicas e de funcionamento dos mesmos.

A figura 35 apresenta um exemplo de um motor quatro cilindros em linha, com turbo compressor, onde bloco numerado é uma discretização do sistema, ou seja, são detalhes inseridos no código para caracterizar os componentes quanto à perda de carga e à restrição ao fluxo de admissão ou de escape, diâmetros e comprimentos dos dutos intermediários e dos coletores, etc. Neste exemplo, é possível observar o detalhamento desde o bocal de admissão de ar, passando pelo ressonador, pelo filtro de ar, pelo corpo de borboleta, pelo turbo compressor, entrando no pleno do coletor de admissão, passando pelos dutos de admissão do coletor e do cabeçote, a combustão nos quatro cilindros, a passagem dos gases de escape pelos dutos do cabeçote e do coletor, pelo turbo compressor e chegando finalmente no catalisador:

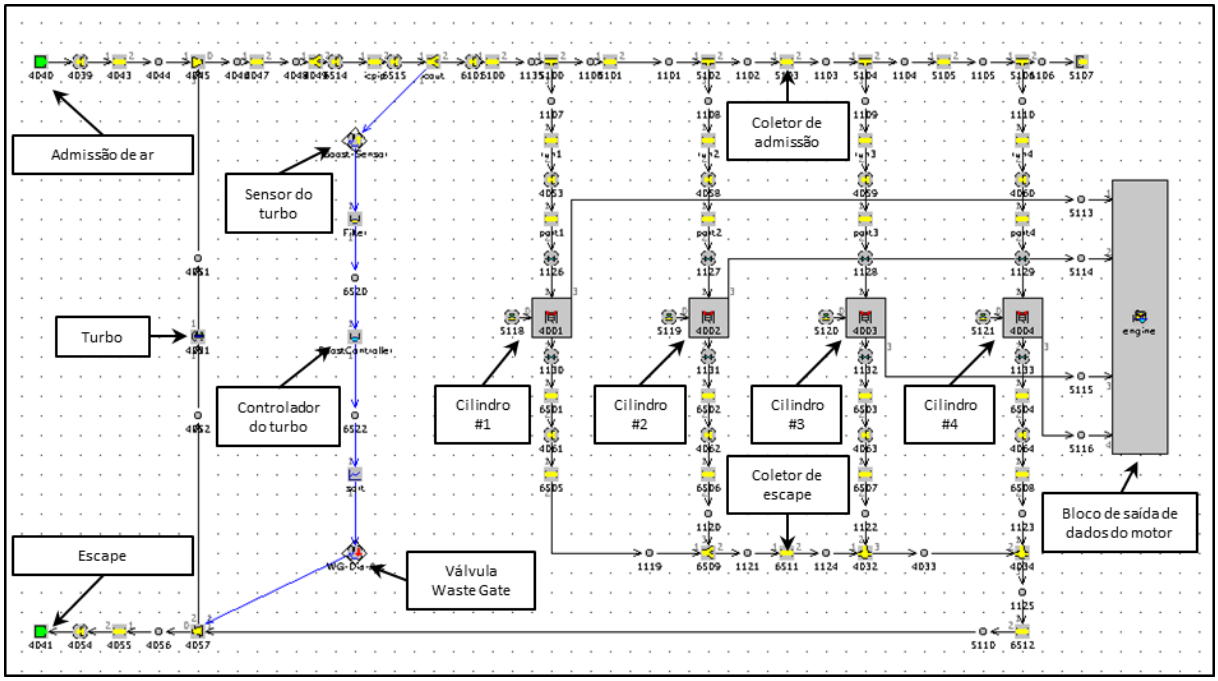

Figura 35 – Exemplo de um modelamento completo do motor
Fonte: Gamma Technologies, 2011, p. 13

Este modelo é indicado para a otimização da concepção dos componentes e dos sistemas, assim como para análises detalhadas da combustão, das emissões e da acústica da admissão e do escape. No entanto, esta simulação demanda muitas horas de cálculo para apresentar os resultados além de demandar grande conhecimento de modelamento de motores e o seu funcionamento.

4.1.1.2 Modelamento parcial do motor

Nesta modalidade é aplicada a metodologia zero-dimensional, ou *Mean-Value* (MVL), que é um compromisso entre o modelamento detalhado do motor, apresentado acima, e o modelamento simplificado do motor, a ser apresentado na sequência. Portanto, o modelo completo de um cilindro é substituído por funções empíricas do torque, do fluxo de massa de admissão, entalpia dos gases de escape, do consumo de combustível, das emissões, etc.

Assim como no caso anterior, existem discretizações do sistema que são menos numerosas, pois se trata da simulação de apenas um cilindro, porém são tão detalhadas quanto o modelamento completo apresentado anteriormente, conforme a figura 36:

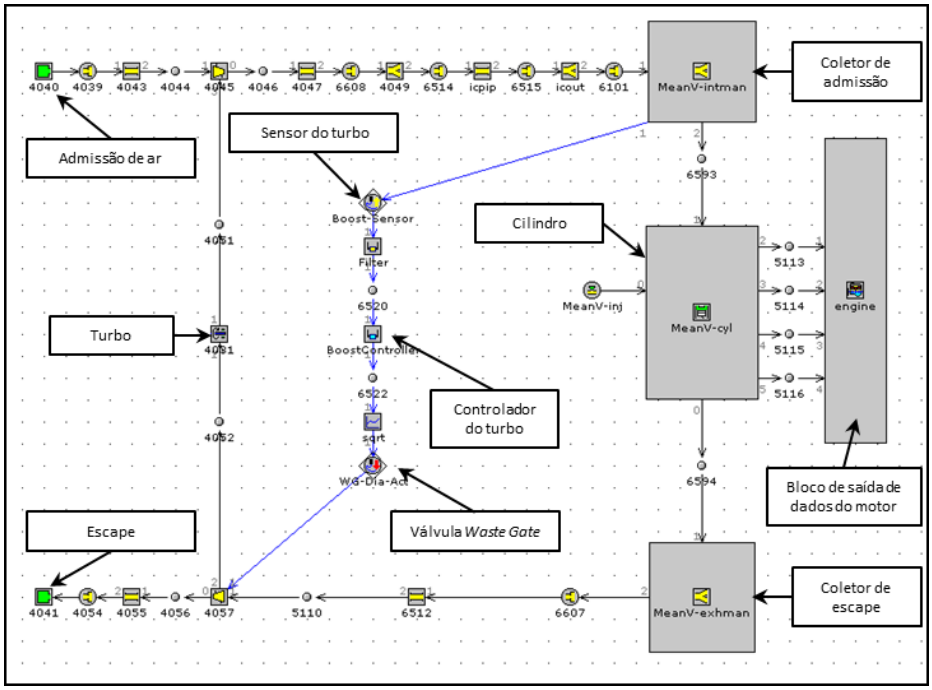

Figura 36 – Exemplo de um modelamento parcial do motor
Fonte: Gamma Technologies, 2011, p. 13

Este modelo não possui os detalhes que permitem a otimização de componentes, porém ele permite a análise de apenas um cilindro visando compreender os impactos da variação da rotação do motor, da carga, da relação ar/combustível, do tempo de ignição, do tempo de abertura de válvulas, etc., que podem afetar o consumo de combustível e o enchimento do motor. Sua simulação é cinquenta vezes mais rápida do que a do modelo detalhado.

4.1.1.3 Modelamento simplificado do motor

Nesta modalidade, os resultados são calculados diretamente a partir dos mapas do motor medidos experimentalmente em função da rotação do motor e a posição do pedal do acelerador (carga do motor). A diferença para o modelo parcial é que os mapas do modelo simplificado compreendem o motor completo e não somente um cilindro.

Como a sua simulação é mais rápida do que a simulação do modelo parcial e, os seus resultados dos transientes do modelo não são muito fiéis, ele é indicado para a simulação de eventos de maior escala de tempo como os ciclos de rodagem de um veículo para a análise do consumo de combustível, das emissões e do desempenho, quando acoplado a um modelo veicular.

4.1.2 Modelamento do acoplamento trem de força / veículo

Este modelamento permite que o usuário defina todos os componentes que irão transferir o movimento gerado pelo motor até o pavimento e as suas características de funcionamento, bem como as características do veículo, como segue:

a) **Embreagem seca:** é modelado pela máxima força de acoplamento ou torque transmitido, pela tabela da força de acoplamento normalizada versus o posicionamento (o que permite a histerese) e o mapa do coeficiente de atrito da embreagem versus a rotação de escorregamento e força de acoplamento.

b) **Conversor de torque:** é modelado pela descrição das características de transmissão de torque e perda de potência, por meio de tabelas de relação de torque versus o fator de escorregamento e capacidade de carga versus escorregamento.

c) **Transmissão:** é modelado por meio de um sistema de dupla massa conectado por engrenagens, levando em consideração as relações de marcha, as eficiências dos engrenamentos e as inércias (a relação de marchas pode ser controlada pelo modelo do condutor explicado na sequência).

d) **Freios:** são modelados por um mapa de torque que relaciona o torque de frenagem na roda à velocidade rotacional da roda e à posição do pedal de freio.

e) **Veículo:** o veículo é caracterizado pelo seu peso, pelos pesos de seus ocupantes e carga e pelas suas propriedades aerodinâmicas. Um trailer pode ser acoplado a este veículo caso sejam conhecidas as suas características de peso e de aerodinâmica.

f) **Condições ambientais:** a pressão e a temperatura ambiente em conjunto com as características de arrasto do veículo e vento frontal são usadas para calcular a massa específica do ar e a força de resistência aerodinâmica.

g) **Pavimento:** o modelo do pavimento permite a especificação de uma classe como constante ou uma função de distância a ser percorrida pelo veículo. O coeficiente de resistência ao rolamento e a tração podem ser amplificados ou atenuados por uma constante ou por multiplicadores de distância que podem ser usados para representar pavimentos não normalizados ou fora de estrada ou condições variáveis de clima.

h) **Condutor:** o modelo de condutor pode ser aplicado para o controle manual do acelerador, do freio, da embreagem e da troca de marcha, ou para o controle

manual do acelerador e do freio mais o controle automático da embreagem e da troca de marcha, ou ainda para o controle completamente automático onde o condutor segue um cronograma de rotação especificado pelo usuário, como no caso da especificação de um ciclo de teste. Outras características do condutor também podem ser especificadas, como o tempo para a troca de marcha, a rotação do motor para a troca de marcha para cima ou para baixo, a velocidade do veículo para estas trocas de acordo com a posição do pedal do acelerador, assim como o comportamento de acionamento da embreagem e do acelerador durante as trocas.

i) **Funções de força externa:** podem ser especificadas algumas funções de forças externas como o torque da embreagem ou do conversor de torque, o cronograma da posição do pedal do acelerador ou da abertura do corpo de borboleta, arrasto aerodinâmico ou força resistente ao movimento do veículo, classe e qualidade do pavimento, cronograma de troca de marcha ou troca automática de acordo com a rotação e carga, cronograma de acionamento da embreagem e do freio.

O modelamento do acoplamento do trem de força a um veículo no GT-Suite® pode ser realizado de duas maneiras distintas:

4.1.2.1 Modelamento completamente configurável

Nesta modalidade, o usuário é capaz de configurar completamente o sistema de transmissão e o veículo, combinando diversos elementos disponíveis na biblioteca do código. Adicionalmente às configurações tradicionais listadas anteriormente, esta modalidade apresenta múltiplos graus de liberdade devido ao escorregamento e/ou aos elementos elásticos. Desta forma, é permitido o modelamento de eixos e semieixos elásticos, das características de dureza e amortecimento que podem ser definidos ou calculados a partir das propriedades dos materiais escolhidos. Os pneus também são modelados a partir do raio, do coeficiente de resistência ao rolamento e dos mapas de tração que correlacionam o coeficiente de atrito entre o pneu e o pavimento para a velocidade de escorregamento. É ainda possível configurar o comportamento da suspensão, a distribuição de carga e o centro de gravidade (CG) do veículo, conforme a figura 37.

Esta modalidade é indicada para o estudo das vibrações torcionais do sistema de transmissão, para o desempenho de aceleração e frenagem, os efeitos de tração dos pneus,

bem como estudos específicos das diversas configurações de tração do veículo (tração dianteira, traseira ou 4x4).

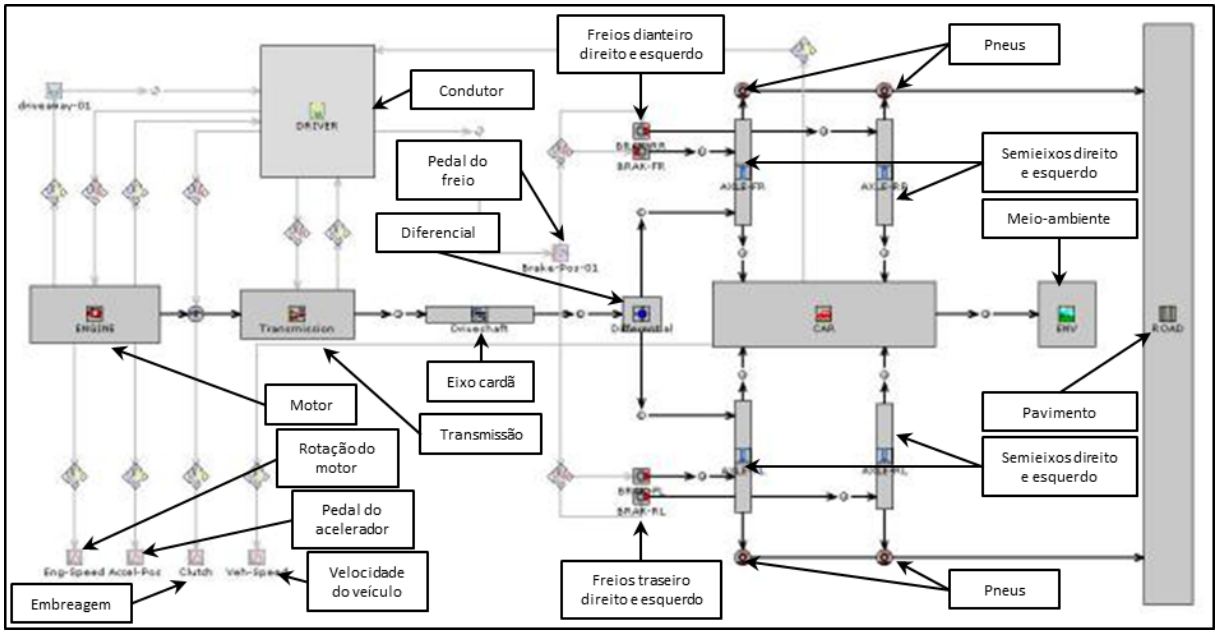

Figura 37 – Exemplo de um modelo completamente configurável
Fonte: Ciesla, Keribar e Morel, 2000, p. 8

4.1.2.2 Modelamento pré-programado

Nesta modalidade, um modelo pré-programado de veículo pode ser aplicado visando facilitar a utilização do mesmo. O sistema de transmissão, o veículo e o pavimento estão conectados cinematicamente permitindo que o sistema seja representado por somente um grau de liberdade e uma inércia efetiva, conforme a figura 38. Este modelamento se difere do anterior ao apresentar somente eixos rígidos, ausência de escorregamento do pneu e a ausência de suspensão e os seus graus de liberdade.

Esta modalidade, por apresentar um modelo mais “leve” e, portanto, de simulação mais rápida, é indicada para o estudo do desempenho de aceleração ou de condução, para o acoplamento entre trem de força e veículo, para a definição das estratégias de troca de marcha, assim como a avaliação do consumo de combustível e emissões durante os transientes do veículo ou ciclos de teste regulatórios.

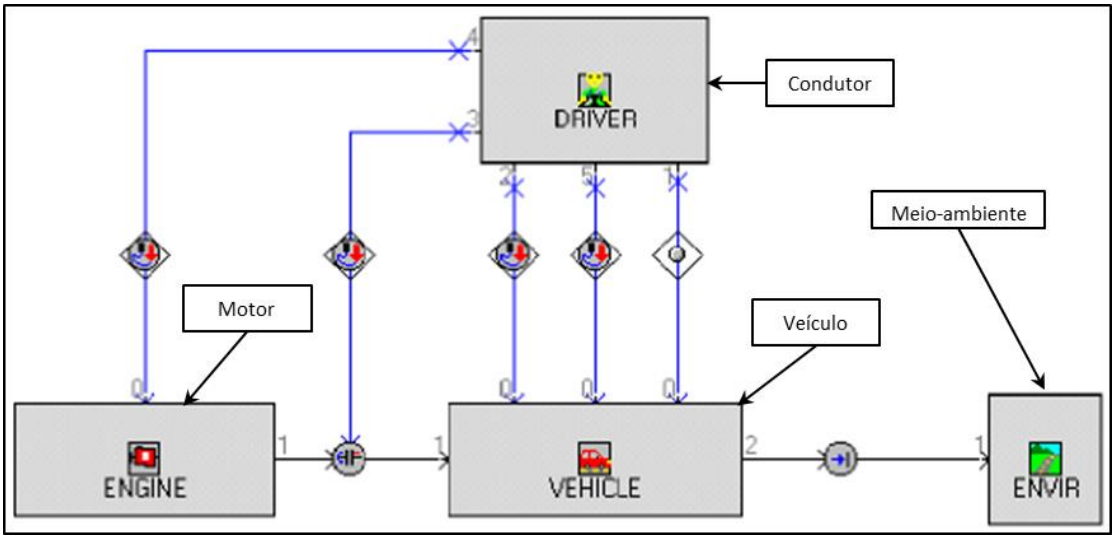

Figura 38 – Exemplo de um modelo pré-programado
Fonte: Ciesla, Keribar e Morel, 2000, p. 8

4.1.3 Simulação do consumo de combustível e do desempenho do veículo

Uma das análises mais aplicadas a um modelo de acoplamento trem de força / veículo é a simulação do transiente do veículo durante um ciclo regulatório de teste visando prever as emissões e a economia de combustível instantânea e média, assim como os detalhes de funcionamento do motor e o seu desempenho de aceleração. Para estas aplicações, utiliza-se o modelo simplificado de motor que é rodado em modo cinemático.

Neste modo de simulação, o usuário deve especificar a rotação do motor versus o tempo ou a distância percorrida, a estratégia de troca de marcha, o corte de combustível (*fuel shut-off*), as estratégias de frenagem e a classe de inércia do veículo. Tanto o sistema de transmissão quanto os pneus são considerados rígidos, sem escorregamento. O usuário pode ainda adicionar acessórios ou outras cargas externas ao modelo. Assim, espera-se que o resultado do motor seja completamente controlado para se adequar à carga instantânea.

É normal na indústria automobilística, durante a fase de engenharia avançada e de definição dos objetivos de um projeto de veículo, definir objetivos antagônicos, como o consumo de combustível e o desempenho, de tal maneira que uma análise de compromisso entre os dois seja realizada, levando em consideração uma série de propostas técnicas, visando desenvolver o produto mais adequado para uma determinada aplicação. A figura 39 apresenta o exemplo de um compromisso entre o consumo energético e o desempenho de aceleração de

um veículo, onde o objetivo de projeto é de estar abaixo de um consumo energético de 1,95 MJ/km e com uma aceleração de 0 a 100 km/h menor do que 11,5 s:

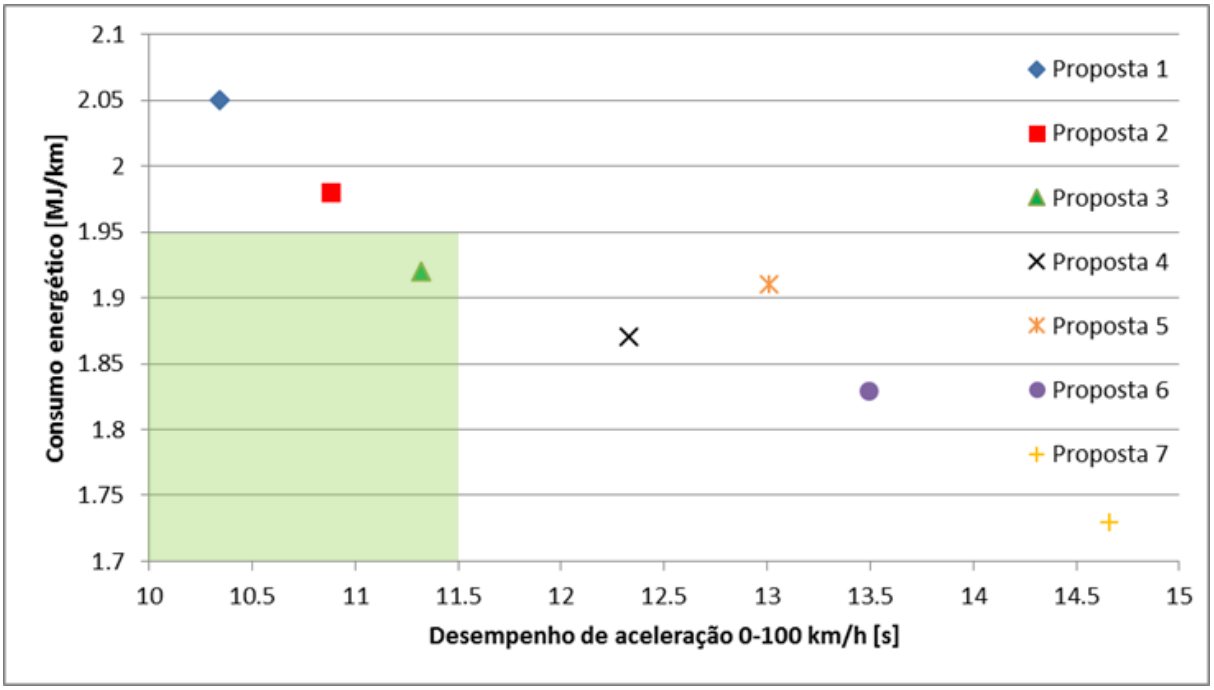

Figura 39 – Exemplo de uma razão de compromisso entre objetivos antagônicos em projetos
Fonte: Autor

5 ESTUDO DE CASO

Conforme apresentado na seção 1.1, o objetivo deste trabalho é analisar a eficiência energética de um veículo *Flex Fuel* e propor a melhoria de sua eficiência utilizando-se de um código de simulação numérica para realizar uma análise de sensibilidade da relação de compromisso entre o consumo de combustível e o desempenho de aceleração desse veículo.

As seções seguintes descrevem como o modelo matemático do veículo foi criado e validado e como as análises foram realizadas para atingir o objetivo do trabalho.

5.1 Criação do modelo matemático do veículo

Tratando-se de uma análise do consumo de combustível e desempenho de aceleração em determinados ciclos regulatórios de teste, foram selecionados os modelos: simplificado para o motor e pré-programado para o acoplamento trem de força / veículo, visando criar o modelo matemático do veículo. Em seguida, os dados de entrada e as hipóteses de configuração dos módulos do veículo foram inseridos.

5.1.1 Dados de entrada

Os seguintes dados de entrada foram inseridos no código:

a) **Veículo:**
   - Veículo compacto;
   - Cinco portas;
   - Tração dianteira;
   - Entre eixos = 2,467 m;
   - Coeficiente de arrasto aerodinâmico = 0,31;
   - Área frontal = 2,225 m^2;
   - MOM = 1139 kg;
   - Massa do veículo para ensaio = 1275 kg;
   - Classe de inércia = 1247 kg;

b) **Motor:**
   - Transversal;

- 1,6l, 16 válvulas, quatro cilindros em linha;
- Marcha lenta = 800 rpm;
- Inércia = 0,12 kgm^2;

c) **Transmissão:**

- Transversal;
- Manual de cinco marchas com diferencial acoplado;
- Relações de marcha progressivas (rendimento e inércia):
    - 1ª: 3,636 (97,04% e 0,001 kgm^2);
    - 2ª: 1,950 (97,76% e 0,001 kgm^2);
    - 3ª: 1,281 (97,53% e 0,001 kgm^2);
    - 4ª: 0,975 (97,52% e 0,001 kgm^2);
    - 5ª: 0,750 (97,41% e 0,001 kgm^2);
    - Diferencial: 4,286 (97% e 0,001 kgm^2);

d) **Semieixos:**

- Dianteiro direito:
    - MIx = 2557.62 $kgmm^2$;
    - MIy = 417042.58 $kgmm^2$;
    - MIz = 417051.09 $kgmm^2$;
- Dianteiro esquerdo:
    - MIx = 2415.88 $kgmm^2$;
    - MIy = 223757.49 $kgmm^2$;
    - MIz = 223765.39 $kgmm^2$;

e) **Pneu:**

- 195/60R15;
- Raio de rolamento = 0,2987 mm;
- Crr = 0,0093;

f) **Combustíveis:**

- Massa específica:
    - E22 = 745 kg/m^3;
    - E100 = 810 kg/m^3;
- Poder calorífico:
    - E22 = 38,92 MJ/kg;
    - E100 = 24,80 MJ/kg;

g) **Condições ambientais:**

- Temperatura ambiente = 25°C;
- Pressão ambiente = 0,913 bar;

5.1.2 Modelo matemático do veículo

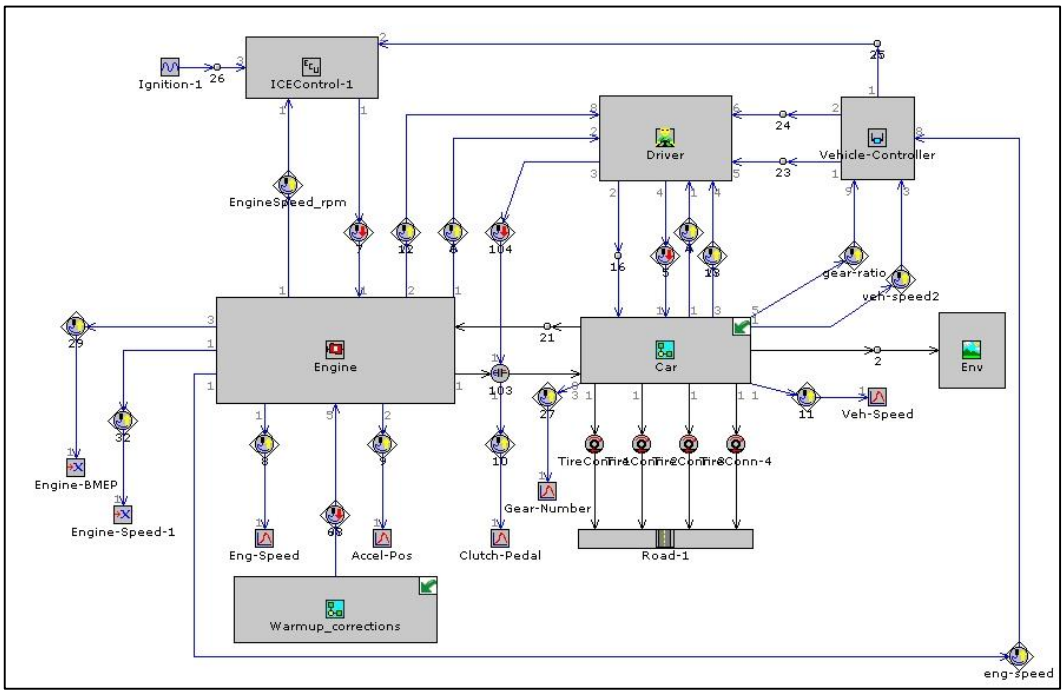

Figura 40 – Modelo matemático do acoplamento trem de força / veículo
Fonte: Autor

A figura 40 apresenta o modelo matemático criado para o veículo. Esse modelo está divido em sete módulos, conforme explicado a seguir:

a) **Motor:** além dos dados de entrada listados acima, foram inseridos também os mapas do motor medidos em dinamômetro com as curvas de potência, torque e posição de pedal do acelerador.

b) **Veículo:** foram inseridos os dados do veículo, da transmissão, do diferencial, dos semieixos e dos pneus, conforme a figura 41:

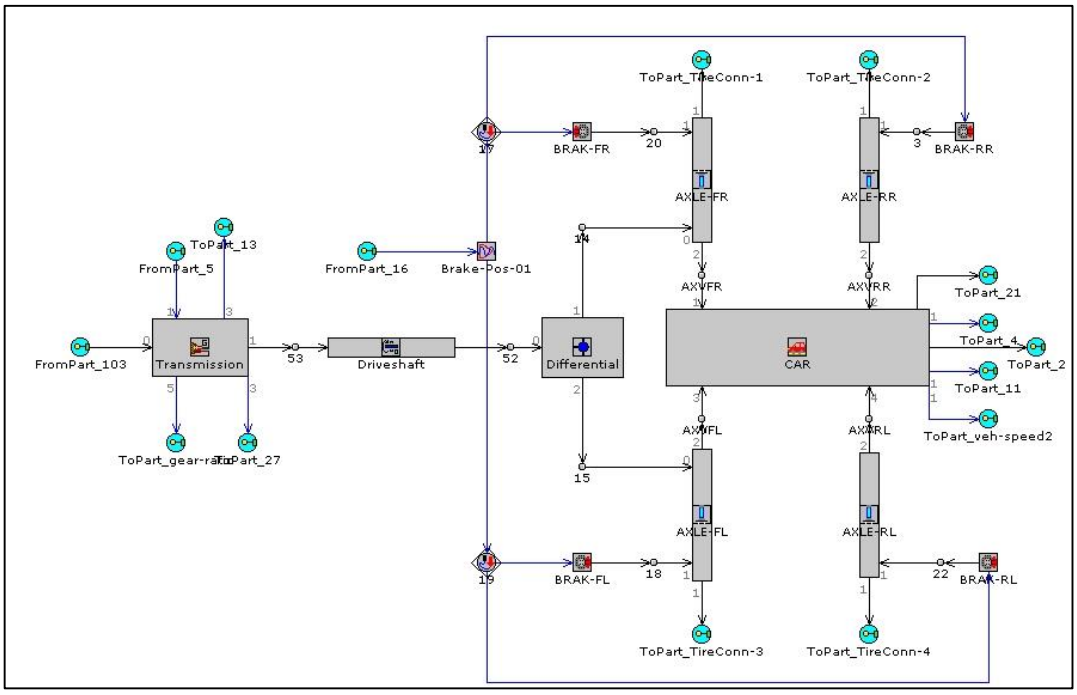

Figura 41 – Modelo matemático do veículo
Fonte: Autor

c) **Correção de aquecimento do motor:** trata-se de uma função matemática, ou seja, é um fator que multiplica a quantidade de combustível a frio já que existe uma maior diferença de evaporação do combustível a frio, principalmente no caso do E100, visando fornecer maior quantidade de combustível para uma combustão correta (mistura estequiométrica), conforme a figura 42:

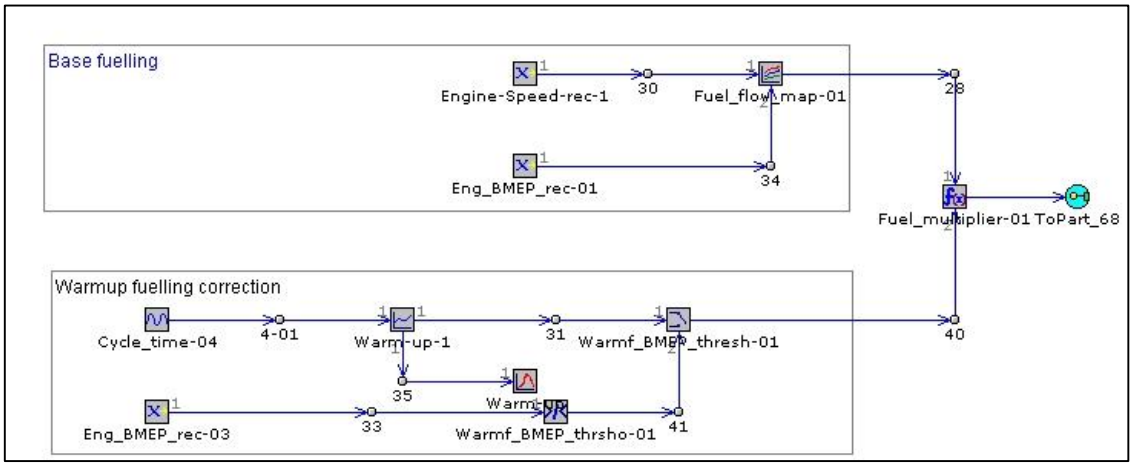

Figura 42 – Correção de aquecimento do motor
Fonte: Autor

d) **Condutor:** foi usado um controlador proporcional, integral e derivativo (PID) para o controle do acelerador, do freio e da embreagem. Ele é o responsável pelo

comando desses pedais durante a rodagem dos ciclos de teste e também pelas trocas de marcha, para cima ou para baixo, assim como pelo controle dos tempos de troca de marcha.

e) **Controlador do veículo:** trata-se de um controle dinâmico, baseado nos ciclos de teste (NBR 6601 e NBR 7024), que o condutor segue a partir de cálculos cinemáticos, em função da rotação do motor, da aceleração e do tempo, com a ajuda dos demais controladores.
f) **Controlador do motor:** é responsável por simplificar os controles externos do motor, como, por exemplo, a rotação de marcha lenta e o modelamento do corte de combustível (*fuel shut-off*) em desaceleração, conforme a calibração do motor, fundamental para a redução do consumo de combustível.
g) **Condições ambientais:** são as especificações ambientais inseridas na simulação conforme a NBR 6601 (temperatura, pressão, altitude, umidade, etc.).

5.2 Validação do modelo matemático do veículo

O veículo foi testado num dinamômetro de chassis conforme a norma NBR 10312, explicada na seção 2.4.3, de modo a avaliar experimentalmente as curvas de consumo de combustível e de emissões nos ciclos urbano e rodoviário, conforme as normas NBR 6601 e NBR 7024. Estes dados aquisitados são utilizados para homologar o veículo junto aos órgãos regulatórios governamentais.

Portanto, com o objetivo de validar o modelo matemático do veículo, o modelo foi simulado nos ciclos urbano e rodoviário e os seus resultados foram comparados aos resultados aquisitados experimentalmente no dinamômetro de chassis, como segue:

5.2.1 Validação com o E22

As figuras 43 a 46 apresentam os resultados comparativos entre o teste em dinamômetro de chassis e a simulação do veículo para a integral da massa de combustível consumida. Os demais resultados obtidos com o E22 encontram-se no apêndice A.

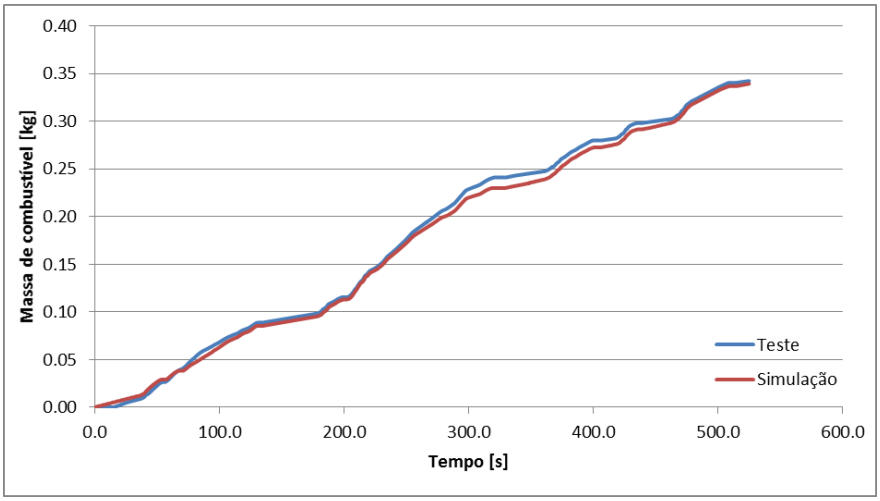

Figura 43 – NBR 6601 – Fase 1 – E22 – Integral da massa de combustível consumida
Fonte: Autor

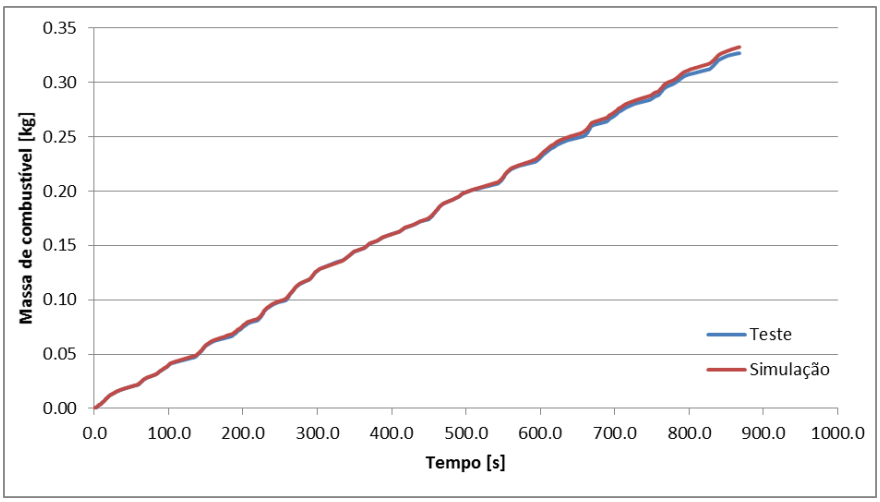

Figura 44 – NBR 6601 – Fase 2 – E22 – Integral da massa de combustível consumida
Fonte: Autor

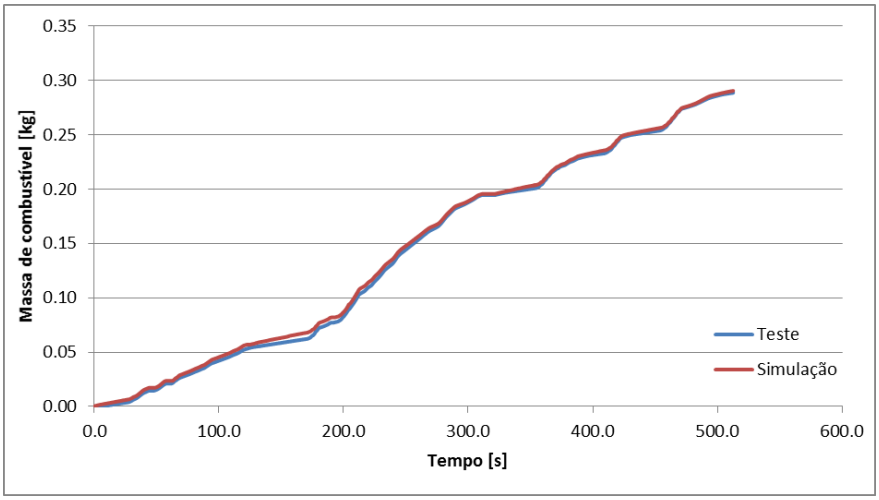

Figura 45 – NBR 6601 – Fase 3 – E22 – Integral da massa de combustível consumida
Fonte: Autor

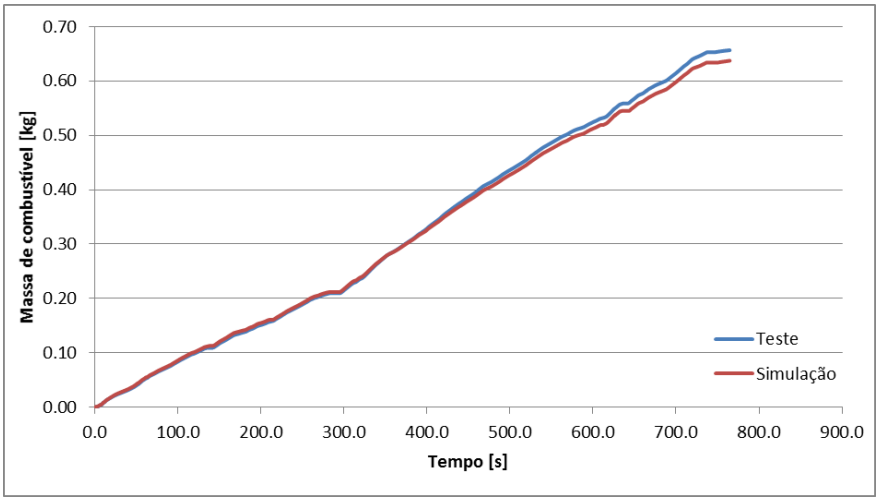

Figura 46 – NBR 7024 – E22 – Integral da massa de combustível consumida
Fonte: Autor

A aderência dos resultados simulados aos resultados experimentais apresentados nas figuras 43 a 46 demonstra a grande proximidade do modelo matemático ao veículo, principalmente nas fases a quente. No entanto, para validar esse modelo, uma avaliação da eficiência energética dos dois se faz necessária. A tabela 7 sumariza as diferenças percentuais de eficiência energética observadas para cada ciclo:

Tabela 7 – Sumário da eficiência energética para cada ciclo – E22

	NBR 6601			NBR 7024
	Fase 1	Fase 2	Fase 3	
Diferença [%]	9,8	6,3	4,6	5,6

Fonte: Autor.

A diferença percentual da eficiência energética na Fase 1 do ciclo urbano é maior devido à dificuldade em modelar as situações de pós-partida e de aquecimento do motor a frio, mesmo tendo sido utilizado um fator de correção de aquecimento do motor (algoritmo). Ainda contribuem para o aumento da diferença percentual entre a simulação e o teste, o nível de calibração do veículo no momento do teste no dinamômetro de chassis e a precisão do condutor ao seguir o ciclo de teste.

Em síntese, com exceção da Fase 1 do ciclo urbano, as diferenças percentuais apresentadas acima estão dentro dos valores aceitáveis do ponto de vista da Engenharia para uma simulação numérica desta ordem, em torno de 6%, validando assim este modelo com o E22 (ZOTTIN, 2010).

5.2.2 Validação com o E100

As figuras 47 a 50 apresentam os resultados comparativos entre o teste em dinamômetro de chassis e a simulação do veículo para a integral da massa de combustível consumida. Os demais resultados obtidos com o E100 encontram-se no apêndice B.

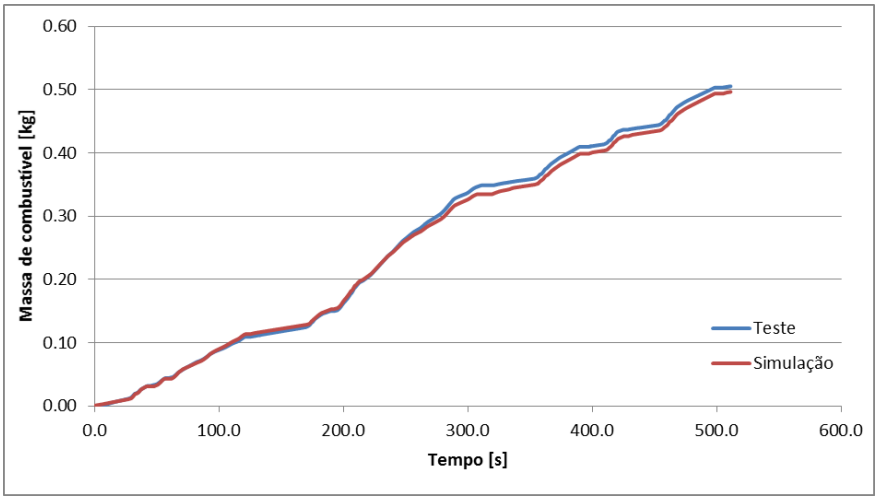

Figura 47 – NBR 6601 – Fase 1 – E100 – Integral da massa de combustível consumida
Fonte: Autor

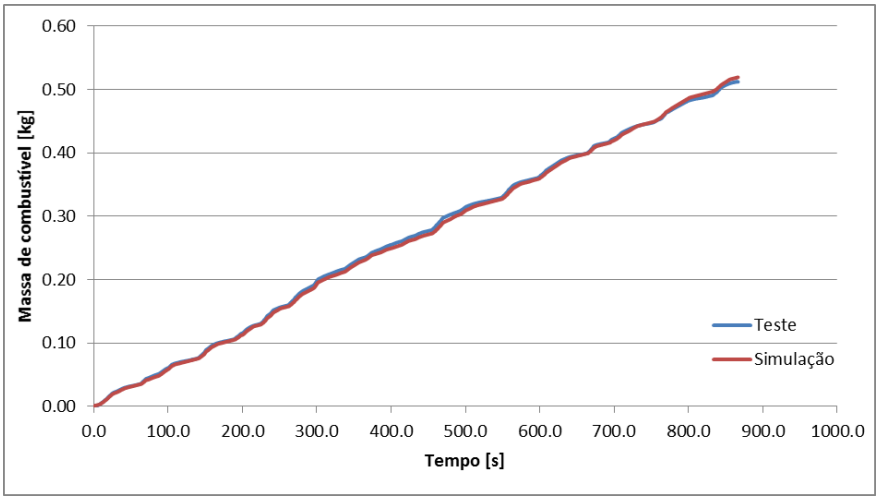

Figura 48 – NBR 6601 – Fase 2 – E100 – Integral da massa de combustível consumida
Fonte: Autor

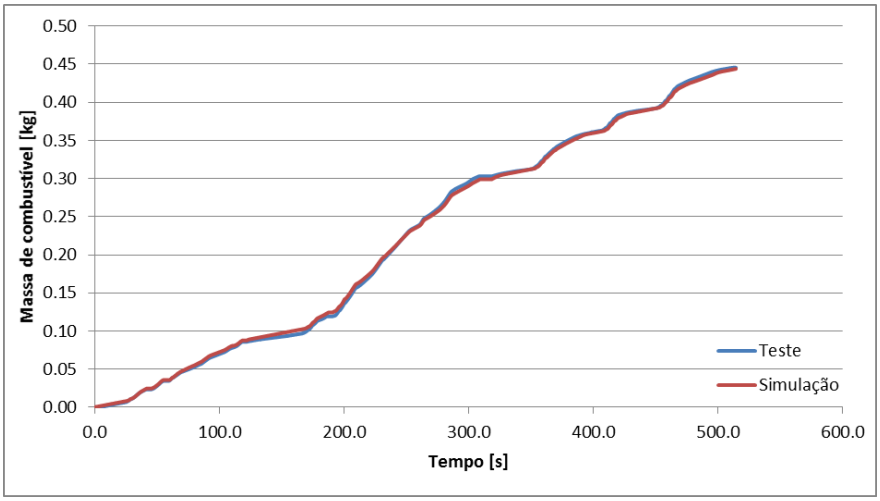

Figura 49 – NBR 6601 – Fase 3 – E100 – Integral da massa de combustível consumida
Fonte: Autor

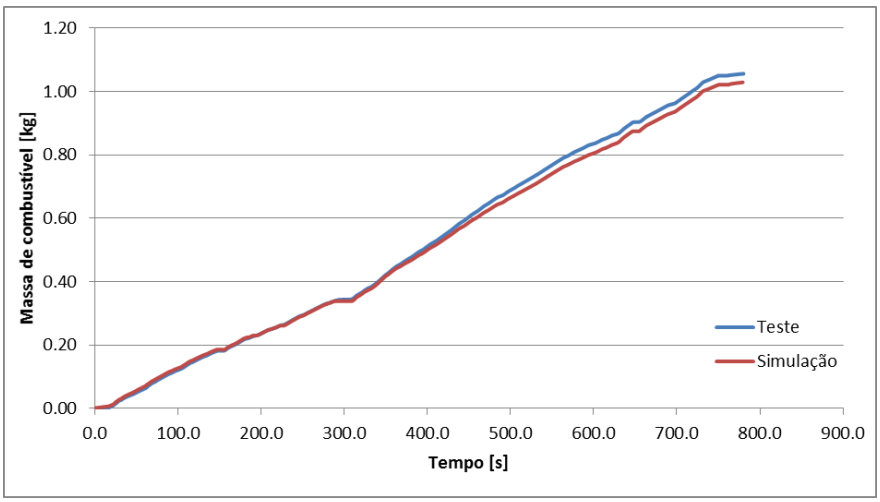

Figura 50 – NBR 7024 – E100 – Integral da massa de combustível consumida
Fonte: Autor

Assim como no caso do E22, a aderência dos resultados simulados aos resultados experimentais demonstra a grande proximidade do modelo matemático ao veículo. Da mesma forma, para validar esse modelo, a avaliação da eficiência energética dos dois se faz necessária. A tabela 8 sumariza as diferenças percentuais de eficiência energética observadas para cada ciclo:

Tabela 8 – Sumário da eficiência energética para cada ciclo – E100

	NBR 6601			NBR 7024
	Fase 1	Fase 2	Fase 3	
Diferença [%]	7,8	1,8	2,7	0,9

Fonte: Autor.

Novamente, a diferença percentual da eficiência energética na Fase 1 do ciclo urbano é maior, conforme explicado na seção anterior, porém os valores simulados estão mais próximos dos valores medidos empiricamente no caso do E100.

Em síntese, com exceção da Fase 1 do ciclo urbano, as diferenças percentuais apresentadas acima estão dentro dos valores aceitáveis do ponto de vista da Engenharia para uma simulação numérica desta ordem, em torno de 6%, validando assim este modelo também com o E100 (ZOTTIN, 2010).

5.2.3 Cálculo do consumo energético combinado

Uma vez validado o modelo matemático do veículo, foram calculadas as autonomias de combustível combinadas para ambos os combustíveis e para a aplicação *Flex Fuel*, conforme a tabela 9:

Tabela 9 – Sumário da autonomia de combustível combinada

	Urbano	Rodoviário	Combinado
A_{comE22} [km/l]	13,522	19,571	15,707
$A_{comE100}$ [km/l]	9,109	13,090	10,554
A_{comFF} [km/l]	---	---	13,130

Fonte: Autor.

Na sequência do cálculo das autonomias de combustível combinadas, foram calculados os consumos energéticos por combustível e para a aplicação *Flex Fuel*, conforme explicado na seção 3.4.2.1. A tabela 10 apresenta a síntese destes resultados:

Tabela 10 – Sumário do consumo energético combinado

	Combinado
CE_{E22} [MJ/km]	1,846
CE_{E100} [MJ/km]	1,904
CE_{FF} [MJ/km]	1,875

Fonte: Autor.

De acordo com a Portaria n° 377 (2011) e conforme a tabela 11, o resultado do consumo energético combinado da aplicação *Flex Fuel* deste veículo apresenta uma classificação PBE classe C, estando em conformidade com a classificação real deste veículo

segundo a tabela de consumo e eficiência energética do INMETRO de 2014 (CE_{FF} = 1,85 MJ/km, diferença de 1,33%):

Tabela 11 – Classificação de eficiência energética para veículos compactos

Consumo energético [MJ/km]	Classificação PBE
CE ≤ 1,76	A
1,76 < CE ≤ 1,84	B
1,84 < CE ≤ 1,94	C
1,94 < CE ≤ 2,04	D
CE > 2,04	E

Fonte: Portaria n° 377, 2011, p. 23.

Finalmente, no contexto do Inovar-Auto, a figura 51 apresenta a classificação deste veículo:

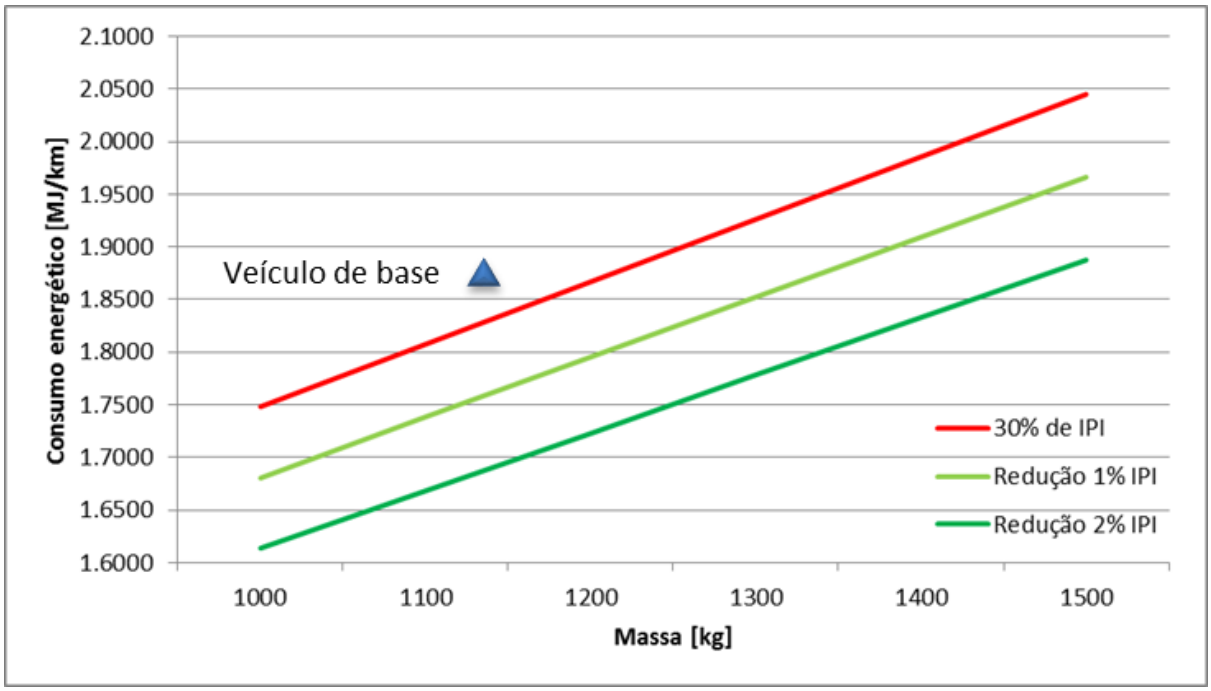

Figura 51 – Classificação do veículo quanto ao consumo energético pela massa média
Fonte: Autor "adaptado de" Decreto n° 7.819, 2012, p. 13

Este veículo, por se encontrar acima da linha vermelha, será penalizado em trinta pontos percentuais adicionais de IPI a partir de 01 de outubro de 2017, caso nada seja feito para melhorar a sua eficiência energética. Em outras palavras, a partir dessa data, este veículo estará fora do mercado, sem condições de competir com os seus concorrentes.

Assim sendo, verifica-se a necessidade de melhoria de eficiência energética do mesmo, visando o bônus sobre o IPI.

5.3 Análise de sensibilidade

Tendo em vista a validação do modelo matemático do veículo e a necessidade de propor melhorias à sua eficiência energética, diversos parâmetros desse veículo serão simulados isoladamente visando levantar os seus impactos com o objetivo de propor, ao final, uma série de alterações que apresentem o melhor compromisso entre eficiência energética e desempenho de aceleração.

5.3.1 Otimização da estratégia de troca de marcha

Conforme a NBR 6601 (2012), caso não haja recomendações do requisitante do ensaio sobre os pontos ideais de trocas de marcha do veículo, deve-se proceder conforme indicado na tabela 12:

Tabela 12 – Trocas de marcha – NBR 6601

Trocas de marcha	Velocidade do veículo [km/h]
1 → 2	25
2 → 3	40
3 → 4	65
4 → 5	72
5 → 4	68
4 → 3	55
3 → 2	30
2 → 1	20

Fonte: NBR 6601, 2012.

Entretanto, não há nenhuma evidência de que as trocas de marcha normalizadas apresentam a melhor condição de eficiência energética. Para isto, foram criadas rotinas de experimentos no próprio código, também conhecidas como *Design of Experiments* (DoE), visando encontrar as trocas de marchas otimizadas, segundo o código, para esta aplicação veicular. Neste caso, foi aplicada a técnica da variação de fatores com o modelo já validado.

Logo, para rodar este DoE, foi definida a seguinte estratégia: as trocas de marcha para cima seriam definidas pelo DoE e as trocas de marcha para baixo ocorreriam a menos 5 km/h das velocidades de troca para cima, ou seja, se a troca de 1ª para a 2ª marcha ocorrer a 20 km/h, a troca de 2ª para a 1ª irá ocorrer a 15 km/h. Caso o DoE fosse rodado para todas as trocas de marcha, a quantidade de amostras seria dobrada, o que não era desejado, uma vez

que o impacto da redução de marcha no consumo de combustível é desprezível dada a existência do corte de combustível em desaceleração (*fuel shut-off*), explicado na seção 5.1.2. Portanto, todos os duzentos e dezesseis experimentos foram rodados em modo completamente fatorial (*full factorial*), demandando menos de um minuto para a conclusão.

A tabela 13 apresenta os resultados das melhores trocas de marcha para cada ciclo, urbano e rodoviário, e para cada combustível, visando a melhor eficiência energética:

Tabela 13 – Trocas de marcha otimizadas conforme DoE

Troca de marcha	Velocidade do veículo [km/h]							
	E22				E100			
	Fase 1	Fase 2	Fase 3	Rodov.	Fase 1	Fase 2	Fase 3	Rodov.
1 → 2	16	16	16	18	16	14	16	16
2 → 3	24	24	27	34	24	24	27	27
3 → 4	35	35	35	48	35	35	48	48
4 → 5	49	49	49	61	49	49	61	61
5 → 4	44	44	44	56	44	44	56	56
4 → 3	30	30	30	43	30	30	43	43
3 → 2	19	19	22	29	19	19	22	22
2 → 1	11	11	11	13	11	9	11	11

Fonte: Autor.

Os resultados das trocas de marcha otimizadas obtidos pelo DoE foram inseridos no modelo matemático do veículo de modo a verificar as diferenças em eficiência energética em relação ao modelo de base, conforme a figura 52:

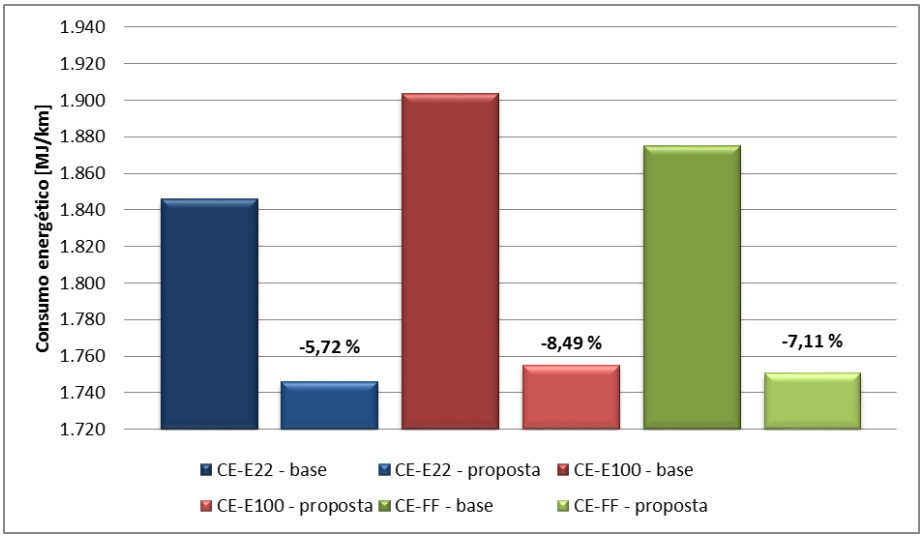

Figura 52 – Diferença do CE das trocas de marcha de base versus as trocas otimizadas
Fonte: Autor

Dado o ganho em eficiência energética observado na figura 52, as trocas de marcha otimizadas serão incluídas na proposta de melhoria final.

Vale notar que, no caso das trocas de marcha, o impacto no desempenho de aceleração não é verificado já que a troca de marcha depende do condutor do veículo e, portanto, cabe a ele escolher uma condução de maior eficiência energética ou de maior desempenho de aceleração. Como os demais parâmetros a serem analisados a seguir dependem do veículo, o impacto sobre o desempenho de aceleração será analisado individualmente.

5.3.2 Diferencial mais longo

Supondo que este veículo possui uma relação de marcha adequada para o acoplamento trem de força / veículo e que, as trocas de marcha podem ser otimizadas conforme a seção anterior, ainda é possível alterar a relação de marcha final do veículo por meio da aplicação de um diferencial mais longo.

O serviço de pós-venda da montadora deste veículo disponibiliza no mercado outras relações finais para o trem de força do mesmo, sendo duas relações finais mais longas (4,063:1 e 3,938:1) do que a relação final de base (4,286:1). A figura 53 apresenta a diferença em consumo energético das relações finais analisadas:

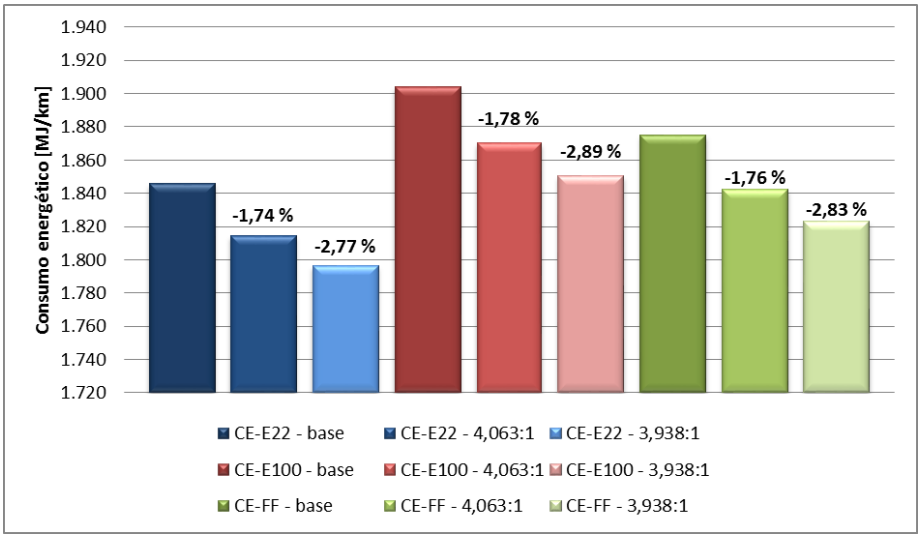

Figura 53 – Diferença do CE do diferencial de base versus os diferenciais mais longos
Fonte: Autor

Na sequência, o impacto sobre o desempenho de aceleração foi calculado, conforme a tabela 14:

Tabela 14 – Impacto dos diferenciais mais longos no desempenho de aceleração

Diferencial	E22 0 – 100 km/h	E100 0 – 100 km/h
4,286 → 4,063 [%]	+1,42	+1,04
4,286 → 3,938 [%]	+2,11	+1,80

Fonte: Autor.

Houve um aumento no tempo total para que o veículo atingisse a velocidade de 100 km/h, porém esse aumento de tempo percentual, conforme a tabela 14, não é muito representativo para um veículo compacto frente ao ganho em eficiência energética percentual observado na figura 53. Portanto, foi escolhido o diferencial de relação 3,938:1, o diferencial mais longo disponível para este veículo.

5.3.3 Óleo lubrificante de baixo atrito

Os óleos lubrificantes de baixo atrito, também conhecidos por *Fuel Economy*, vêm sendo aplicados cada vez mais nos veículos modernos, conforme comentado na seção 3.1.4, ajudando a reduzir o consumo de combustível.

O óleo lubrificante de primeiro enchimento deste veículo, óleo lubrificante aplicado na fábrica de motores da montadora, já é um óleo de baixo atrito, porém de uma geração anterior. Logo, um óleo lubrificante de baixo atrito de última geração (SAE 0W-30) será comparado ao óleo de base (SAE 5W-30) visando simular os ganhos de eficiência energética por meio da redução da potência de atrito.

Assim, o motor deste veículo foi submetido a um ensaio de caracterização da potência de atrito interna num dinamômetro ativo, onde este motor é rodado eletricamente, sem combustão (MARTYR; PLINT, 2007). Foram efetuadas algumas medições da potência de atrito em diversas rotações do motor, em três temperaturas diferentes do óleo: 35°C, 50°C e 80°C. A figura 54 apresenta a redução percentual da potência de atrito interna do motor com o óleo de baixo atrito (SAE 0W-30) em relação ao óleo de base (SAE 5W-30):

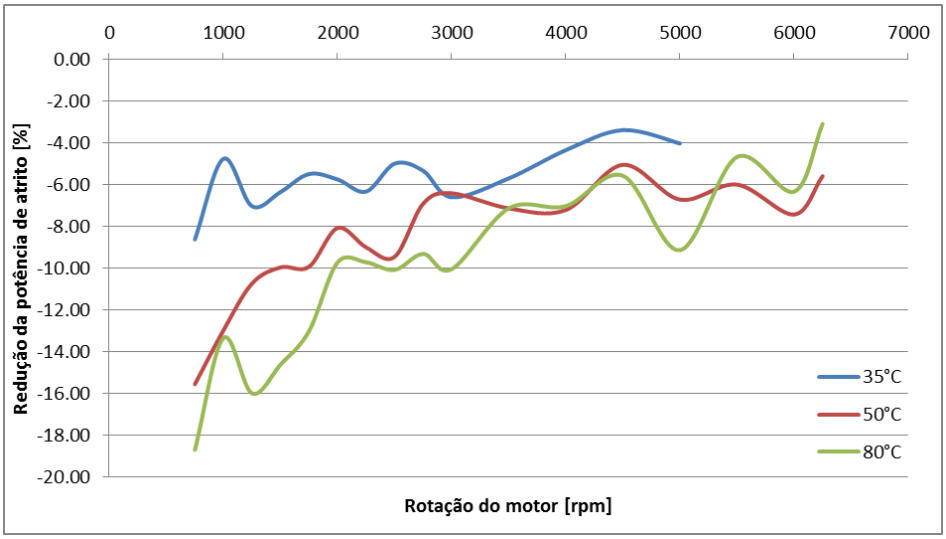

Figura 54 – Diferença de atrito entre o óleo de base e o óleo de baixo atrito
Fonte: Autor

Os valores de potência de atrito medidos para o óleo lubrificante de baixo atrito foram inseridos no modelo matemático do veículo de modo a verificar o impacto na eficiência energética, conforme a figura 55:

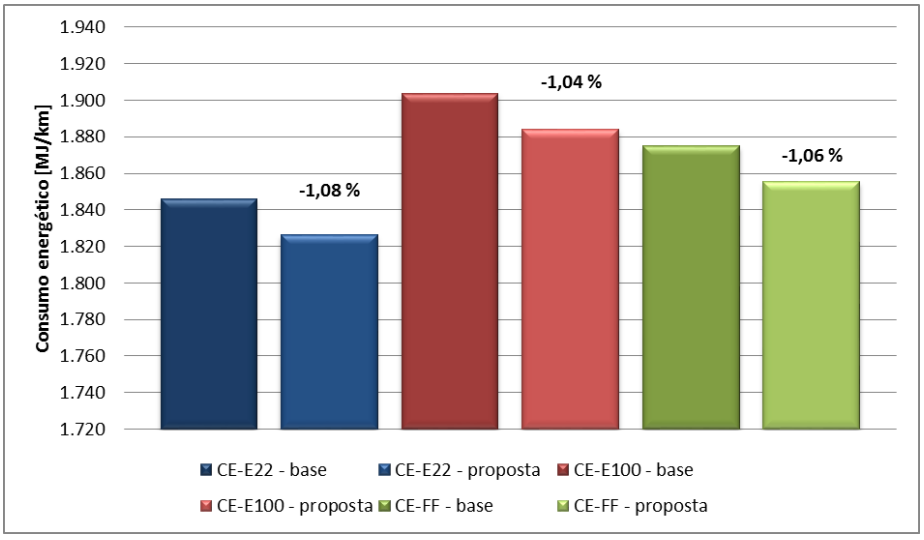

Figura 55 – Diferença do CE do óleo de base versus o óleo de baixo atrito
Fonte: Autor

Uma vez calculado o impacto desse óleo lubrificante de baixo atrito na eficiência energética do veículo, o impacto sobre o desempenho de aceleração também foi simulado, conforme a tabela 15:

Tabela 15 – Impacto do óleo de baixo atrito no desempenho de aceleração

	E22 0 – 100 km/h	E100 0 – 100 km/h
Diferença [%]	-0,41	-0,53

Fonte: Autor.

Dado os ganhos em eficiência energética, observados na figura 55, e os ganhos em desempenho de aceleração, apresentados na tabela 15, a aplicação do óleo lubrificante de baixo atrito está aprovada e será incluída na proposta final.

5.3.4 Pneus com menor coeficiente de resistência ao rolamento

Conforme comentado na seção 3.1.5, os pneus verdes, pneus com menor coeficiente de resistência ao rolamento, ajudam a reduzir o consumo de combustível, sendo aplicados cada vez mais nos veículos modernos.

Dessa forma, com o objetivo de melhorar a eficiência energética do veículo vinculada à resistência ao movimento, dois pneus verdes foram propostos para esta aplicação – um de 8,7 kgf/t e outro de 8,5 kgf/t –, em comparação com o pneu de base, de 9,3 kgf/t. A figura 56 apresenta a comparação do consumo energético para essas propostas:

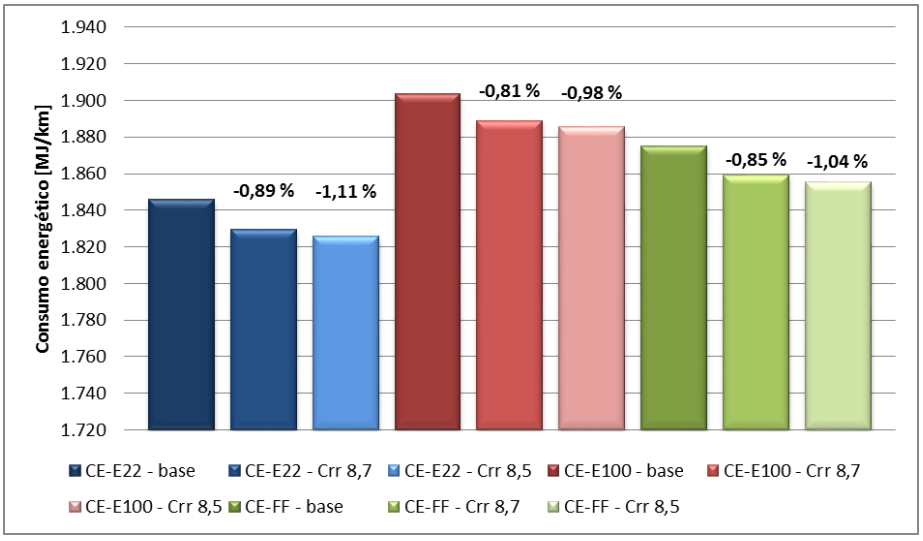

Figura 56 – Diferença do CE do Crr de base versus os Crr de 8,7 e 8,5
Fonte: Autor

Após o cálculo do impacto dos pneus verdes na eficiência energética do veículo, o impacto sobre o desempenho de aceleração também foi simulado, conforme a tabela 16:

Tabela 16 – Impacto do pneu verde no desempenho de aceleração

Crr	E22 0 – 100 km/h	E100 0 – 100 km/h
9,3 → 8,7 [%]	-0,24	-0,23
9,3 → 8,5 [%]	-0,32	-0,30

Fonte: Autor.

A melhoria da eficiência energética para o pneu de 8,5 kgf/t de resistência ao rolamento é mais importante do que a versão de 8,7 kgf/t, de acordo com a figura 56. Adicionalmente, essa versão de pneu verde também apresentou um melhor resultado de desempenho de aceleração, conforme a tabela 16. Portanto, a versão de 8,5 kgf/t foi a escolhida para ser incluída na proposta otimizada.

5.3.5 Redução da área frontal do veículo

A importância da força de arrasto aerodinâmico contra o movimento do veículo, principalmente acima dos 100 km/h, é explicada na seção 3.2. Dessa forma, reduzir essa força é fundamental para a redução do consumo de combustível.

Existem diversas maneiras para reduzir o arrasto aerodinâmico, seja reduzindo o coeficiente de arrasto aerodinâmico do veículo, seja reduzindo a sua área frontal. No primeiro caso, o desenho do veículo pode ser alterado e/ou apêndices aerodinâmicos podem ser adotados, como defletores no assoalho do veículo e sistemas automáticos de asas posicionadas à frente do veículo, conhecidos por *active grille shutters*. No segundo caso, o desenho do veículo pode ser alterado e/ou algumas pequenas alterações podem ser realizadas nos componentes externos, como alteração de espelhos retrovisores, para-choque ou defletores de ar frontais.

Como a proposta deste trabalho não é a de apresentar um novo veículo, mas, sim, a de promover pequenas alterações neste veículo que apresentem uma melhoria em sua eficiência energética, serão aplicadas pequenas alterações ao para-choque e aos retrovisores de modo que a área frontal desse veículo seja reduzida em $3dm^2$. A figura 57 apresenta o impacto dessas alterações na eficiência energética:

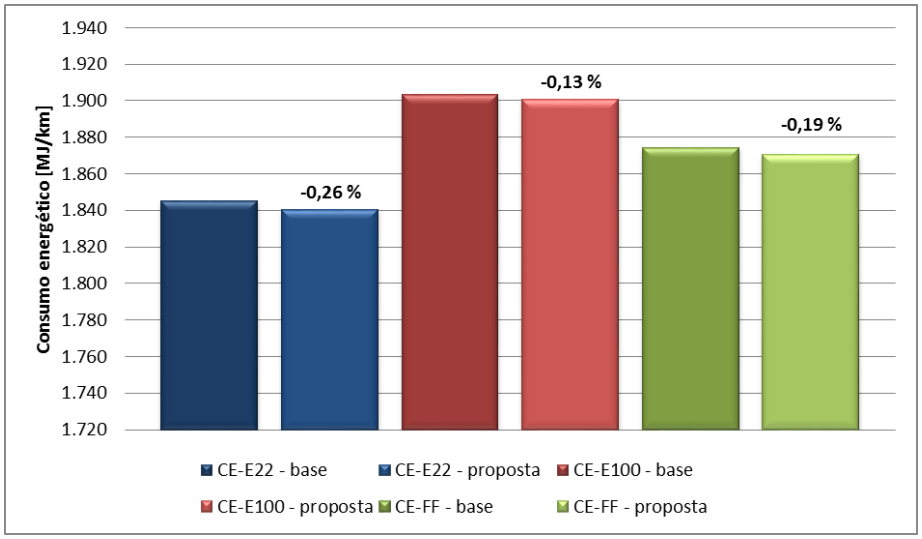

Figura 57 – Diferença do CE da área frontal de base versus a área frontal reduzida
Fonte: Autor

O impacto sobre o desempenho de aceleração é apresentado na tabela 17:

Tabela 17 – Impacto da redução da área frontal no desempenho de aceleração

	E22 0 – 100 km/h	E100 0 – 100 km/h
Diferença [%]	-0,07	-0,08

Fonte: Autor.

Embora os ganhos em eficiência energética, conforme a figura 57, e os ganhos em desempenho de aceleração, de acordo com a tabela 17, sejam muito pequenos, a redução da área frontal do veículo será considerada na proposta final.

5.3.6 Redução da massa do veículo

A massa do veículo, conforme explicado na seção 3.3, impacta fortemente tanto a eficiência energética quanto o desempenho de aceleração de um veículo. No entanto, retirar massa de um veículo ou plataforma veicular existente é muito custoso e trabalhoso.

Logo, sem considerar os custos industriais dos processos a serem aplicados nem os custos dos novos componentes que visam reduzir a massa do veículo, serão estudadas três propostas de massa, sendo duas propostas de massa menor – 1134 kg e 1181 kg – e uma de massa maior – 1304 kg.

O objetivo de estudar essas três propostas de massa, inclusive uma maior do que a do veículo de base, está relacionado às classes de inércia apresentadas pela norma NBR 6601 e os seus impactos na eficiência energética, conforme explicado na seção 3.3.2. Em alguns casos, se a massa do veículo se encontra próxima ao limite de massa máxima de uma classe de inércia, subir a classe de inércia pode melhorar o consumo energético do veículo.

Dessa forma, a subtração dos 136 kg referentes à massa do motorista mais passageiro ou bagagem, da massa de 1134 kg do veículo, corresponde à MOM de 998 kg, por exemplo.

A figura 58 apresenta a comparação das três massas propostas com a massa do veículo de base:

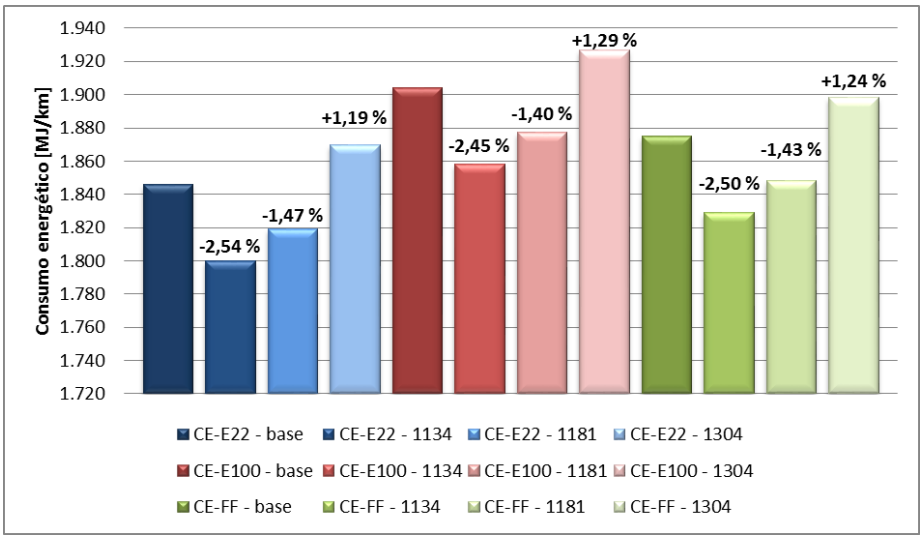

Figura 58 – Diferença do CE da classe de inércia de base versus as demais classes propostas
Fonte: Autor

Uma vez calculado o impacto da redução da massa do veículo na eficiência energética, o impacto sobre a aceleração de 0 a 100 km/h em segundos (s) também foi simulado, como apresentado na tabela 18:

Tabela 18 – Impacto da redução da massa no desempenho de aceleração

Massa	E22 0 – 100 km/h	E100 0 – 100 km/h
1247 → 1134 [%]	-8,11	-7,97
1247 → 1181 [%]	-4,61	-4,52
1247 → 1304 [%]	+3,99	+3,64

Fonte: Autor.

A estratégia de aumentar a massa do veículo para cair em outra classe de inércia se provou, neste caso, sem sucesso, dados o aumento do tempo para o veículo acelerar de 0 a

100 km/h e a piora da eficiência energética. Contudo, a menor massa apresenta ganhos elevados, tanto em eficiência energética quanto em desempenho de aceleração, sendo então aprovada e escolhida para a proposta final.

5.3.7 Sumário dos resultados da análise de sensibilidade

Uma vez finalizada a análise de sensibilidade, uma avaliação dos seus resultados se faz mandatória para apurar os impactos em consumo energético e em desempenho de aceleração do veículo, visando confirmar a escolha dos parâmetros a alterar para a proposta de melhoria final.

A tabela 19 apresenta o sumário dos impactos em consumo energético dos diversos parâmetros analisados em relação ao veículo de base:

Tabela 19 – Sumário dos impactos em consumo energético

	Diferença [%]									
	Troca ótima	Dif. 4,063:1	Dif. 3,938:1	Óleo b. atrito	Crr 8,7	Crr 8,5	-3 dm^2	1134 kg	1181 kg	1304 kg
E22	**-5,72**	-1,74	**-2,77**	**-1,08**	-0,89	**-1,11**	**-0,26**	**-2,54**	-1,47	+1,29
E100	**-8,49**	-1,78	**-2,89**	**-1,04**	-0,81	**-0,98**	**-0,13**	**-2,45**	-1,40	+1,19
FF	**-7,11**	-1,76	**-2,83**	**-1,06**	-0,85	**-1,04**	**-0,19**	**-2,50**	-1,43	+1,24

Fonte: Autor.

Os valores em negrito na tabela 19 indicam os parâmetros de maior redução de consumo energético, ou seja, indicam os parâmetros a selecionar para a proposta final de melhoria.

A figura 59 apresenta a participação desses parâmetros selecionados na redução do consumo energético do veículo, bem como o valor percentual acumulado dos mesmos:

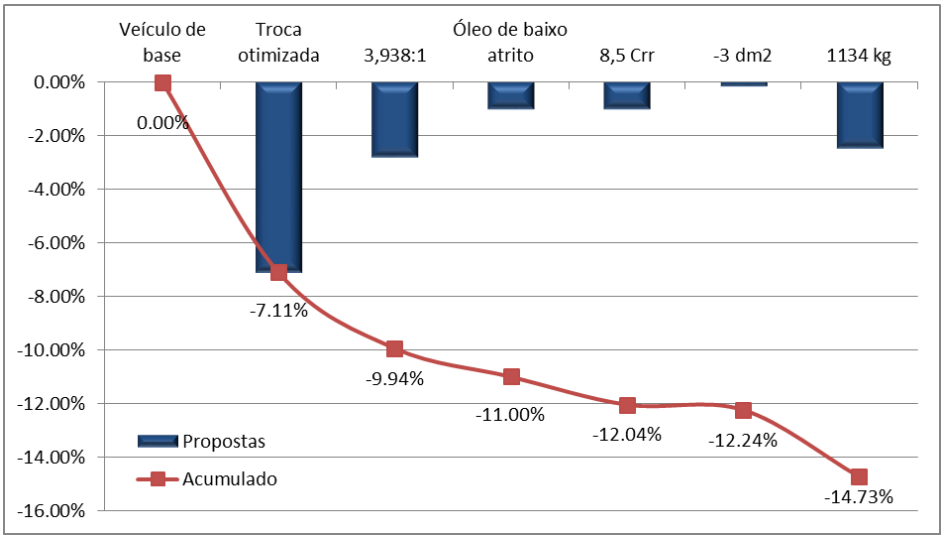

Figura 59 – Participação de cada parâmetro na redução do consumo energético do veículo
Fonte: Autor

O percentual acumulado, apresentado na figura 59, não representa o valor percentual da proposta final já que a análise de sensibilidade avaliou cada parâmetro individualmente. No entanto, como cada parâmetro do veículo influencia o resultado final, esses parâmetros combinados devem apresentar uma redução maior de consumo energético, a ser mensurado na proposta final de melhoria.

A tabela 20 apresenta o sumário dos impactos em desempenho de aceleração dos diversos parâmetros analisados em relação ao veículo de base:

Tabela 20 – Sumário dos impactos em desempenho de aceleração

	Diferença [%]									
	Troca ótima	Dif. 4,063:1	Dif. 3,938:1	Óleo b. atrito	Crr 8,7	Crr 8,5	-3 dm^2	1134 kg	1181 kg	1304 kg
E22	---	+1,42	**+2,11**	**-0,41**	-0,24	**-0,32**	**-0,07**	**-8,11**	-4,61	+3,99
E100	---	+1,04	**+1,80**	**-0,53**	-0,23	**-0,30**	**-0,08**	**-7,97**	-4,52	+3,64

Fonte: Autor.

Como o objetivo deste trabalho é reduzir o consumo energético do veículo, os mesmos parâmetros identificados em negrito na tabela 19 também foram marcados em negrito na tabela 20. Logo, mesmo que o diferencial mais longo (3,938:1) apresente um impacto negativo ao desempenho de aceleração, os demais parâmetros irão compensá-lo visto que, além de reduzirem o consumo energético, eles também melhoram o desempenho de aceleração.

Finalmente, a figura 60 apresenta a razão de compromisso entre o consumo energético e o desempenho de aceleração para cada parâmetro analisado em relação ao veículo de base, utilizando o combustível E100:

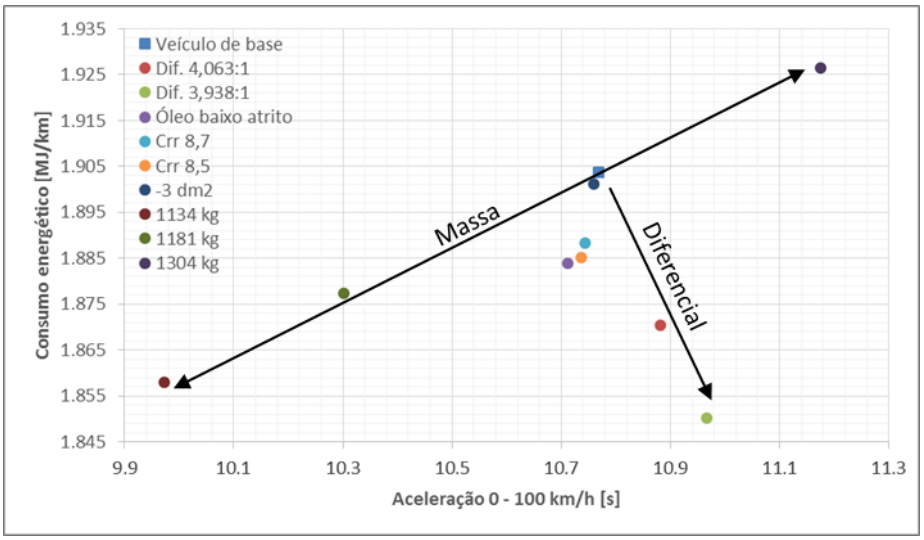

Figura 60 – Razão de compromisso entre CE e desempenho de aceleração – E100
Fonte: Autor

É possível observar na figura 60 o enorme impacto que a massa de 1134 kg produz no veículo, seja em função do consumo energético, seja em função do desempenho de aceleração. No entanto, a maior redução em consumo energético fica por conta do diferencial mais longo, apesar de piorar o desempenho de aceleração, conforme comentado anteriormente. A redução da área frontal do veículo praticamente não altera o seu desempenho global enquanto que a aplicação do óleo de baixo atrito e do pneu verde apresentam uma redução de consumo energético importante sem impactar expressivamente o desempenho de aceleração. Portanto, está confirmada a escolha dos parâmetros a serem considerados na proposta final de melhoria, conforme as tabelas 19 e 20.

Esta razão de compromisso não leva em consideração as trocas de marcha otimizadas vez que não há impacto no desempenho de aceleração, como explicado na seção 5.3.1.

5.4 Proposta final de melhoria da eficiência energética

Os parâmetros do veículo identificados na tabela 19 foram inseridos no modelo matemático do veículo e simulados de modo a avaliar os ganhos combinados em eficiência energética e desempenho de aceleração, como segue:

5.4.1 Cálculo da autonomia de combustível combinada

A tabela 21 apresenta os resultados do cálculo da autonomia de combustível combinada, conforme demonstrado na seção 3.4.1.1:

Tabela 21 – Resultados do cálculo da autonomia de combustível combinada

	Urbano	Rodoviário	Combinado
A_{comE22} [km/l]	15,882	21,486	17,994
$A_{comE100}$ [km/l]	11,282	14,473	12,524
A_{comFF} [km/l]	---	---	15,259

Fonte: Autor.

Os resultados da tabela 21 foram comparados aos resultados da tabela 9, resultados do veículo de base, visando avaliar o impacto da proposta final de melhoria, conforme apresentado na figura 61:

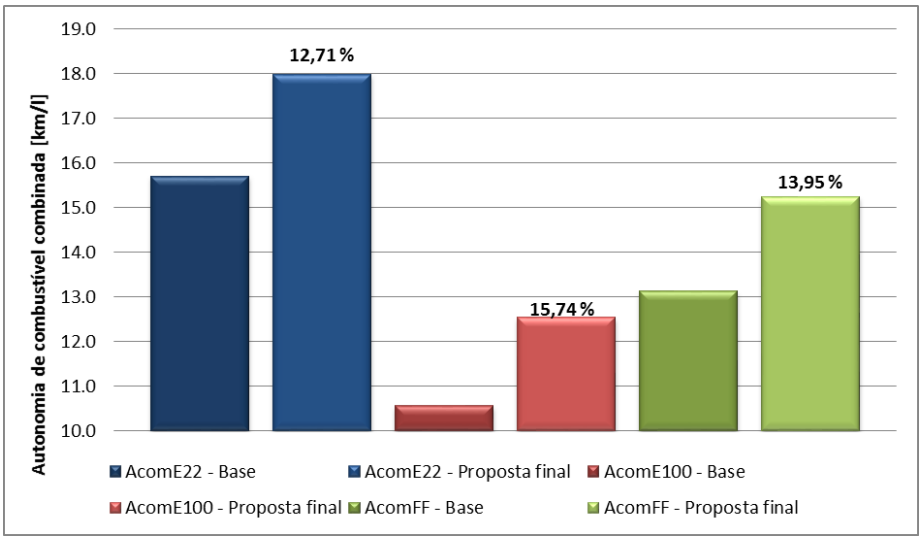

Figura 61 – Impacto da proposta final de melhoria na autonomia de combustível combinada
Fonte: Autor

Os resultados finais da autonomia de combustível combinada são significativamente superiores aos resultados do veículo de base, demonstrando a importância da proposta final de melhoria.

5.4.2 Cálculo do consumo energético

A tabela 22 apresenta os resultados do consumo energético da proposta final de melhoria, conforme demonstrado na seção 3.4.2.1:

Tabela 22 – Sumário do consumo energético combinado

	Combinado
CE_{E22} [MJ/km]	1,611
CE_{E100} [MJ/km]	1,604
CE_{FF} [MJ/km]	1,608

Fonte: Autor.

Os resultados da tabela 22 foram comparados aos resultados da tabela 10, resultados do veículo de base, visando avaliar o impacto da proposta final de melhoria, conforme apresentado na figura 62:

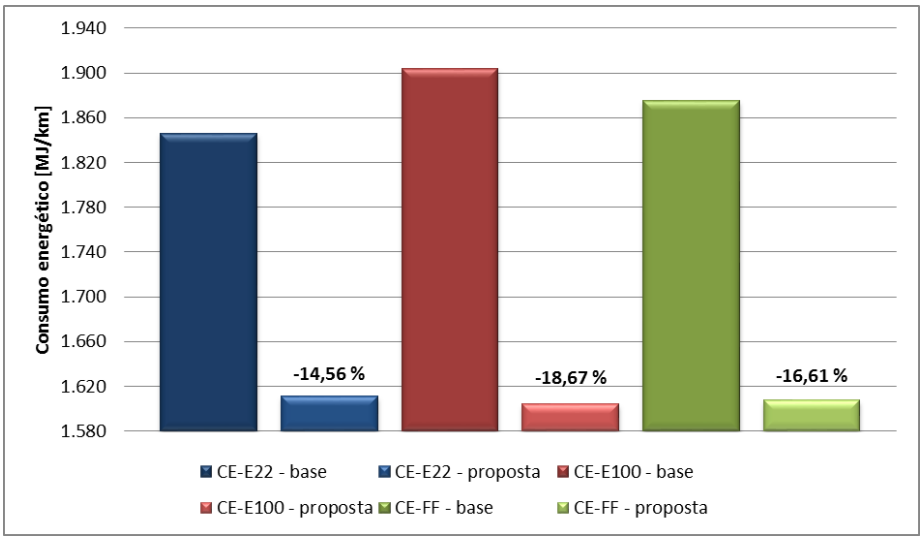

Figura 62 – Impacto da proposta final de melhoria no consumo energético
Fonte: Autor

Assim como no caso da autonomia de combustível combinada, os resultados finais do consumo energético são significativamente inferiores aos resultados do veículo de base, confirmando a proposta final de melhoria.

5.4.3 Resultado do desempenho de aceleração

O desempenho de aceleração da proposta final de melhoria foi comparado ao desempenho de aceleração do veículo de base, conforme a tabela 23:

Tabela 23 – Resultados do desempenho de aceleração

	E22 0 – 100 km/h	E100 0 – 100 km/h
Veículo de base [s]	11,415	10,768
Proposta final [s]	10,600	9,963
Diferença [%]	-7,70	-8,08

Fonte: Autor.

A proposta final de melhoria além de beneficiar o consumo energético do veículo, objetivo deste trabalho, também favoreceu o desempenho de aceleração do mesmo, como pode ser observado na tabela 23. Esse desempenho de aceleração poderá ainda ser melhorado caso o condutor do veículo decida trocar as marchas de maneira mais esportiva, penalizando, dessa forma, o consumo energético do veículo.

Os resultados apresentados até então demonstram o quão importante foi para o veículo de base a proposta final de melhoria. No entanto, a análise do consumo energético frente à MOM do veículo ainda se faz necessária no contexto do Inovar-Auto para apurar se esse veículo sairá da condição de penalização de trinta pontos percentuais de IPI para uma condição melhor.

5.4.4 Melhoria da eficiência energética do veículo conforme o Inovar-Auto

No contexto do Inovar-Auto, a proposta final de melhoria foi comparada ao veículo de base, de acordo com a figura 64:

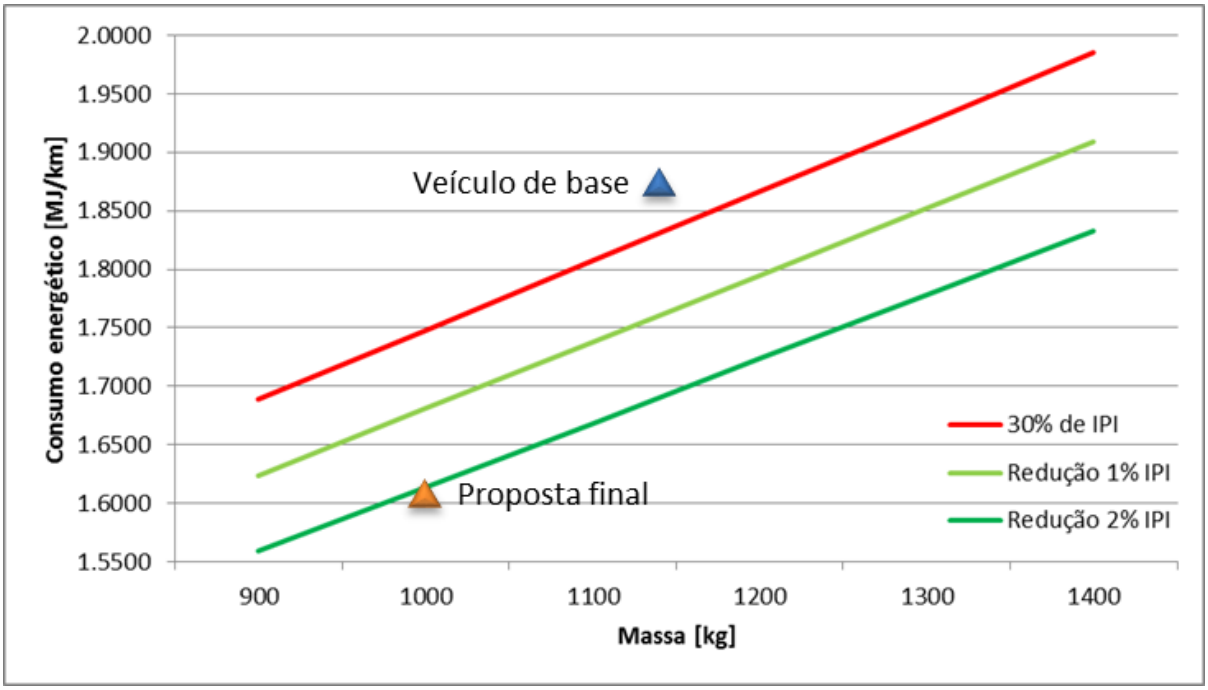

Figura 63 – Resultado final do consumo energético pela massa média (Inovar-Auto)
Fonte: Autor

Os resultados da proposta final de melhoria (1,608 MJ/km a 998 kg) situam-se levemente abaixo da curva verde-escuro se beneficiando, portanto, da redução de dois pontos percentuais de IPI, conforme a figura 64. De tal forma, o veículo de base (1,875 MJ/km a 1139kg) que seria penalizado em trinta pontos percentuais de IPI a partir de 01 de outubro de 2017 e que estaria fora do mercado, sem condições de competir com os seus concorrentes, passa a estar numa condição de destaque entre os melhores de sua classe, obtendo assim uma classificação PBE classe A, conforme a tabela 11.

6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O aumento da eficiência energética do veículo *Flex Fuel* em 13,95% e a redução do consumo específico do mesmo em 16,61% demonstram a eficácia da metodologia aplicada, atingindo assim o objetivo deste trabalho. Desta forma, o veículo passou da classificação PBE classe C (1,875 MJ/km a 1139kg) para a classe A (1,608 MJ/km a 998 kg). Adicionalmente, o desempenho de aceleração também foi beneficiado pelas melhorias propostas, embora esse não fosse o objetivo desse trabalho.

A aplicação de ferramentas de simulação numérica para o desenvolvimento de veículos, entre outros, tornou-se um recurso fundamental na indústria ao possibilitar a redução de tempo e de recursos aplicados durante o desenvolvimento. Os dados experimentais levantados em laboratório permitem ainda ajustar finamente essas ferramentas de simulação numérica, obtendo assim um refinado grau de assertividade que permite ao usuário explorar infinitas alterações do produto final sem gastar inúmeros recursos em protótipos e testes. No entanto, essa tarefa só é possível se houver um conhecimento do funcionamento da ferramenta para poder garantir que os parâmetros inseridos no código estão corretos e que os seus resultados são possíveis fisicamente. Adicionalmente, o conhecimento do tipo de modelamento a aplicar à análise e como configurá-lo, bem como o conhecimento de um veículo e dos seus subsistemas são cruciais durante o modelamento.

O programa Inovar-Auto vem se mostrando determinante no mercado automotivo brasileiro ao promover o aumento do investimento na engenharia, na pesquisa e desenvolvimento locais, na implantação de novas atividades fabris e de novas tecnologias e, principalmente, na melhoria do consumo energético dos veículos produzidos localmente por meio da sobretaxação do IPI. Logo, todas as montadoras instaladas no Brasil deverão promover alterações em seus produtos atuais, podendo aplicar as mesmas técnicas apresentadas neste trabalho, de tal modo que a partir de 01 de outubro de 2017 os seus veículos não sejam sobretaxados e, dessa forma, não estejam fora do mercado, impedidos de competir com os seus concorrentes. Essa tarefa é muito complexa haja vista a média de consumo energético pela MOM do mercado nacional em 2012 (2,07 MJ/km a 1115,5 kg), às vésperas da entrada em vigor do Inovar-Auto, conforme a figura 7.

As seguintes propostas são sugeridas para trabalhos futuros:

a) **Motor de combustão interna (ciclo Otto):** existem ainda algumas melhorias de eficiência a serem exploradas, como: a redução das perdas de energia por bombeamento dos pistões, pela potência de atrito interna do motor e pela criação

de calor; a redução dos pesos dos componentes e, consequentemente, da inércia; a vaporização do combustível e otimização da combustão aliada à aplicação de um sistema de injeção direta de combustível (GDI); a adoção de um turbo de alta pressão; a redução da cilindrada com ou sem a diminuição do número de cilindros (*downsizing*); a diminuição da rotação do motor (*downspeeding*).

b) **Transmissão:** aplicação de transmissões automáticas otimizadas e com maiores relações de marcha; aplicação de transmissões continuamente variáveis; aplicação de transmissões por dupla embreagem;
c) **Veículo:** aplicação de novas plataformas veiculares modulares; aplicação de novos materiais; aplicação de novos processos de fabricação; otimização dos subsistemas; redução do tamanho do veículo (*downsizing*); substituição de acessórios mecânicos por elétricos (direção hidráulica pela direção elétrica, por exemplo); otimização do consumo elétrico dos acessórios; aplicação do sistema de desligamento do motor quando o veículo está parado (*Stop & Start*);
d) **Ciclos de teste:** aplicação de outros ciclos de teste para a medição do consumo de combustível e emissões como o *New European Driving Cycle* – NEDC – ou o *World harmonized Light vehicles Test Procedures* – WLTP;
e) **Hibridismo:** aplicação de motores/geradores elétricos acoplados paralelamente ao motor de combustão interna para um trem de força parcialmente híbrido (sem a opção de condução somente elétrica ou *mild hybrid*) ou completamente híbrido (com a opção de condução somente elétrica ou *full hybrid*);
f) **Eletrificação:** aplicação de veículos elétricos, sejam eles por bateria (*Battery Electric Vehicle* – BEV), sejam eles por células de combustível (*Fuel Cell Electric Vehicle* – FCEV);

REFERÊNCIAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. **Veículos rodoviários automotores: Massas: Vocabulário e códigos – NBR 1176.** Rio de Janeiro, 2006.

_____. **Veículos rodoviários automotores leves: Determinação de hidrocarbonetos, monóxido de carbono, óxidos de nitrogênio, dióxido de carbono e material particulado no gás de escapamento – NBR 6601.** Rio de Janeiro, 2012.

_____. **Veículos rodoviários automotores leves: Medição do consumo de combustível: Método de ensaio – NBR 7024.** Rio de Janeiro, 2006.

_____. Veículos rodoviários automotores leves: Determinação da resistência ao deslocamento por desaceleração livre em pista de rolamento e simulação no dinamômetro – NBR 10312. Rio de Janeiro, 2007.

ATKINS, R. D. **An introduction to engine testing and development.** Warrendale: SAE International, 2009.

BARBOSA, T. A. F. **Pneu-verde:** Desafios para equilibrar conforto, segurança e baixo consumo de combustível. 2013. 98 f. Monografia (Pós-graduação em Engenharia Automotiva) – Escola de Engenharia Mauá, Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia, São Caetano do Sul.

BRASIL. Decreto nº 7.819 de 03 de outubro de 2012. Regulamenta os arts. 40 a 44 da Lei nº 12.715, de 17 de setembro de 2012, que dispõe sobre o Programa de Incentivo à Inovação Tecnológica e Adensamento da Cadeia Produtiva de Veículos Automotores – INOVAR-AUTO, e os arts. 5º e 6º da Lei nº 12.546, de 14 de dezembro de 2011, que dispõe sobre redução do Imposto sobre Produtos Industrializados, na hipótese que especifica. **Diário Oficial da União,** Edição extra, 03 de out. 2012. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/Decreto/D7819.htm>. Acesso em: 21 ago. 2013.

_____. Portaria nº 377 de 29 de setembro de 2011. Aprova a revisão dos requisitos de avaliação da conformidade para veículos leves de passageiros e comerciais leves. **Diário Oficial da União,** p. 153, 30 de ago. 2011. Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/legislacao/detalhe.asp?seq_classe=1&seq_ato=1739>. Acesso em: 13 fev. 2014.

BRUNETTI, F. **Motores de combustão interna – V.1.** São Paulo, Blucher, 2012.

_____. **Motores de combustão interna – V.2.** São Paulo, Blucher, 2012.

CIESLA, C.; KERIBAR, R.; MOREL, T. **Engine / powertrain / vehicle modeling tool applicable to all stages of the design process.** SAE paper 2000-01-0934, EUA, 2000.

Companhia Ambiental do Estado de São Paulo – CETESB. **Emissões veiculares no Estado de São Paulo 2012**. São Paulo, 2013.

GAMMA TECHNOLOGIES. **GT-Suite:** vehicle / driveline simulations for performance & fuel economy. EUA, 2011.

GILLESPIE, T. D. **Fundamentals of vehicle dynamics.** Warrendale: SAE, 1992.

HEYWOOD, J. B. **Internal combustion engine fundamentals.** New York, McGraw-Hill, 1988.

Instituto de Energia e Meio Ambiente – IEMA. **Programa brasileiro de etiquetagem veicular – PBEV:** avaliação e oportunidades para seu aperfeiçoamento. São Paulo, 2011.

Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia – INMETRO. **Panfleto institucional sobre o programa brasileiro de etiquetagem veicular – PBEV.** Brasil, 2013.

_____. **Programa brasileiro de etiquetagem – PBE:** Tabelas de consumo/eficiência energética – Veículos automotores leves. Brasil, 2012.

KUTZ, M. **Mechanical engineers' handbook – Book 3:** manufacturing and management. Hoboken: John Wiley & Sons, 2006.

_____. **Mechanical engineers' handbook – Book 4:** energy and power. Hoboken:John Wiley & Sons, 2006.

MANOSSO, R. **Etanol – álcool combustível.** Disponível em: <http://radames.manosso.nom.br/ambiental/transporte/etanol-alcool-combustivel/>. Acesso em: 19 out. 2013.

MARTINS, J. **Motores de combustão interna.** Porto: Publindústria, 2006.

MARTYR, A. J.; PLINT, M. A. **Engine testing:** theory and practice. Burlington: Butterworth-Heinemann, 2007.

MORELLO, L. et al. **The automotive body – V.1:** components design. Heidelberg: Springer, 2011.

NAUNHEIMER, H. et al. **Automotive transmissions:** fundamentals, selection, design and application. Heidelberg: Springer, 2011.

Programa de Controle das Emissões Veiculares – PROCONVE. **PROCONVE: Programa de controle de poluição do ar por veículos automotores.** Relatório técnico, Brasil, 2010.

United States Environmental Protection Agency – EPA. **Greenhouse gases.** Disponível em: <http://www.epa.gov/climate/climatechange/science/indicators/ghg/index.html>. Acesso em: 19 out. 2013.

ZHAO, F.; LAI, M.-C.; HARRINGTON, D.L. **Automotive spark-ignited direct-injection gasoline engines.** Kidlington: Pergamon, 1999.

ZOTTIN, W. et al. **The application of virtual engine in a PSA 1.4l SI engine.** SAE paper 2010-36-153I, Brasil, 2010.

APÊNDICE A – Gráficos de validação do modelo matemático para o E22

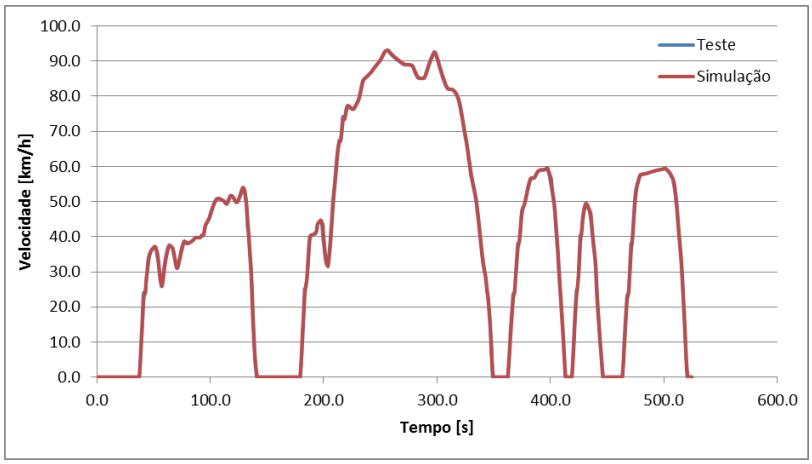

Figura 64 – NBR 6601 – Fase 1 – E22 – Velocidade do veículo
Fonte: Autor

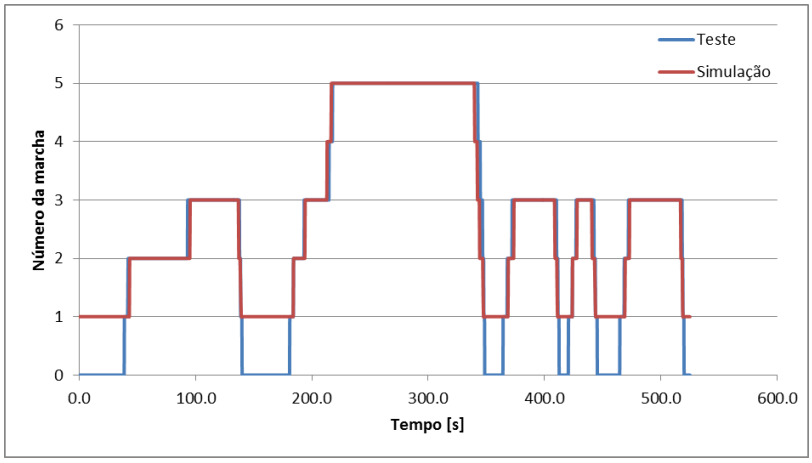

Figura 65 – NBR 6601 – Fase 1 – E22 – Troca de marcha
Fonte: Autor

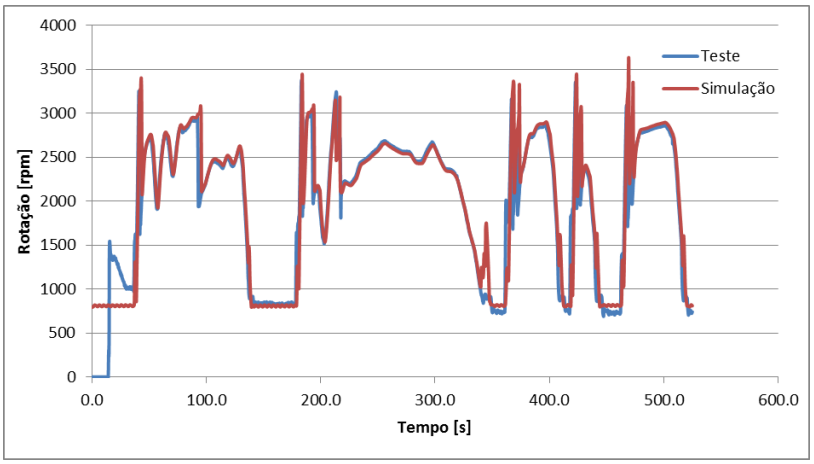

Figura 66 – NBR 6601 – Fase 1 – E22 – Rotação do motor
Fonte: Autor

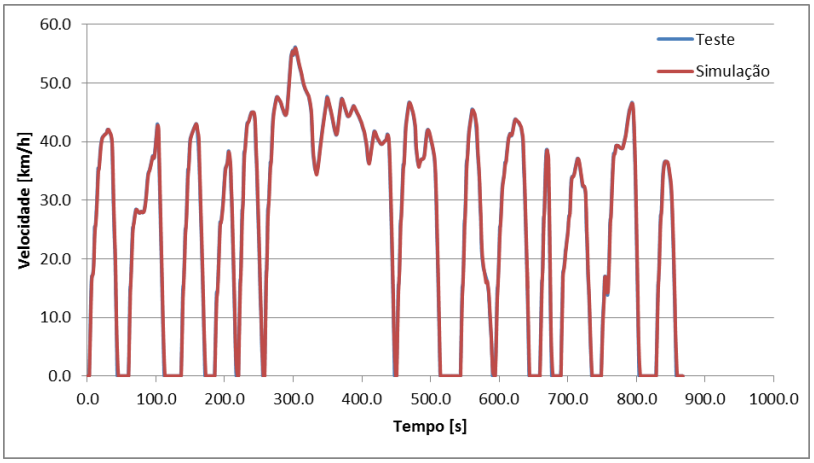

Figura 67 – NBR 6601 – Fase 2 – E22 – Velocidade do veículo
Fonte: Autor

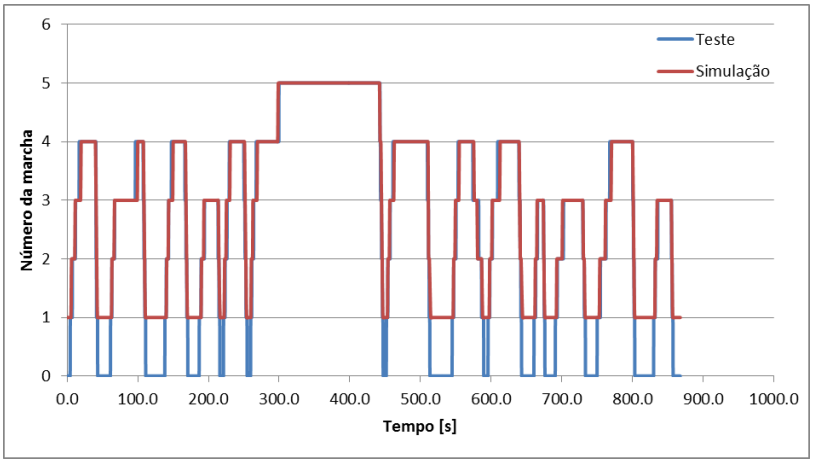

Figura 68 – NBR 6601 – Fase 2 – E22 – Troca de marcha
Fonte: Autor

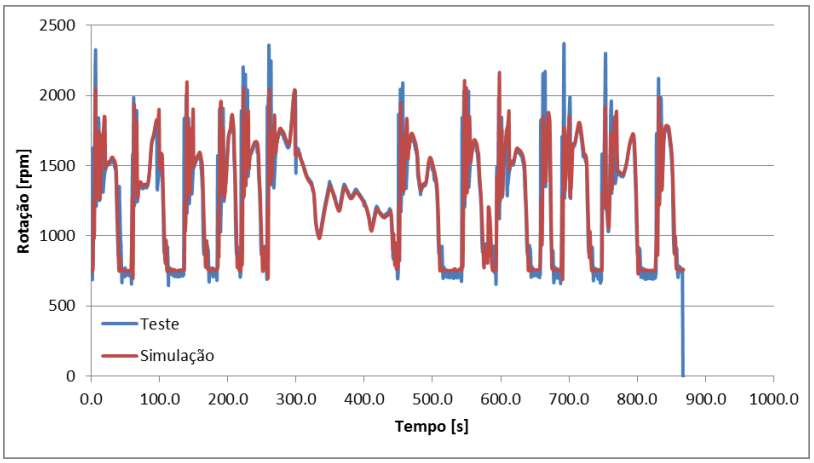

Figura 69 – NBR 6601 – Fase 2 – E22 – Rotação do motor
Fonte: Autor

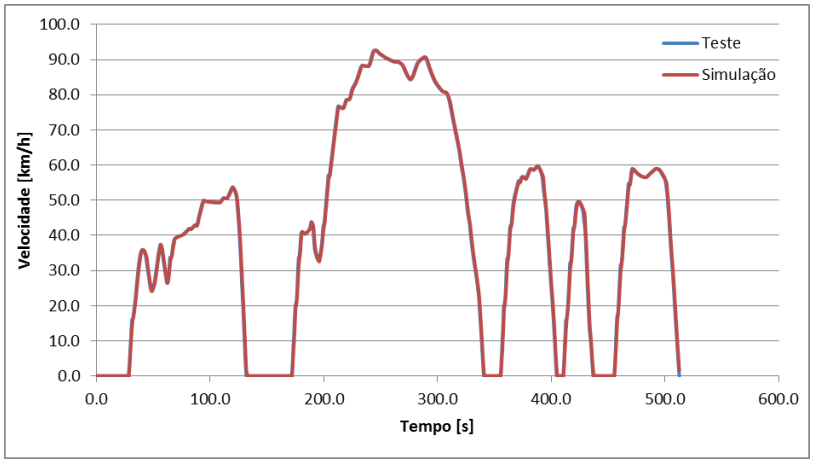

Figura 70 – NBR 6601 – Fase 3 – E22 – Velocidade do veículo
Fonte: Autor

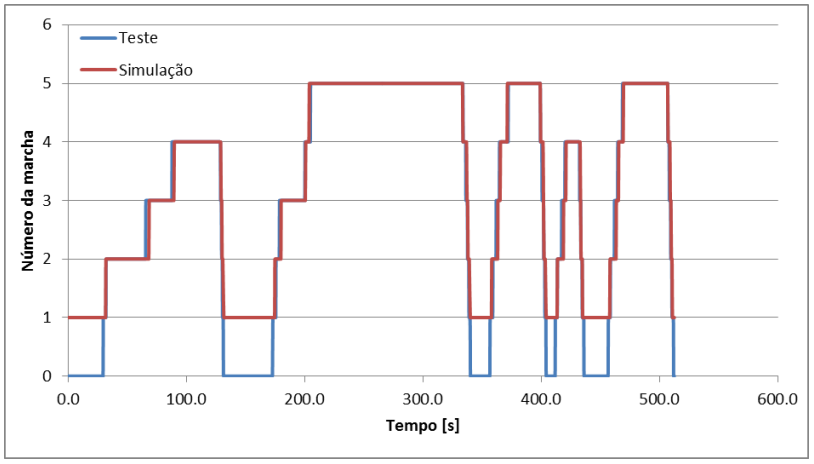

Figura 71 – NBR 6601 – Fase 3 – E22 – Troca de marcha
Fonte: Autor

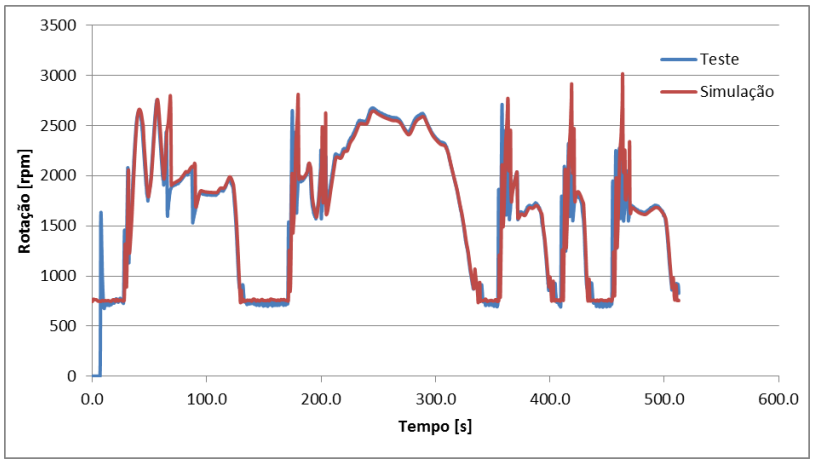

Figura 72 – NBR 6601 – Fase 3 – E22 – Rotação do motor
Fonte: Autor

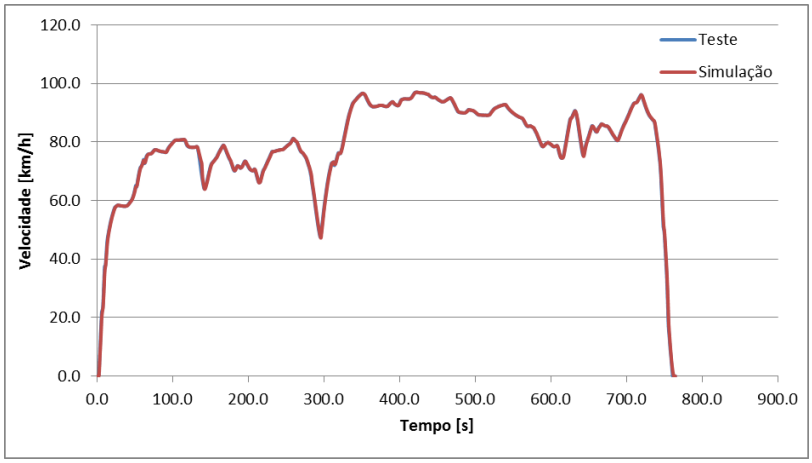

Figura 73 – NBR 7024 – E22 – Velocidade do veículo
Fonte: Autor

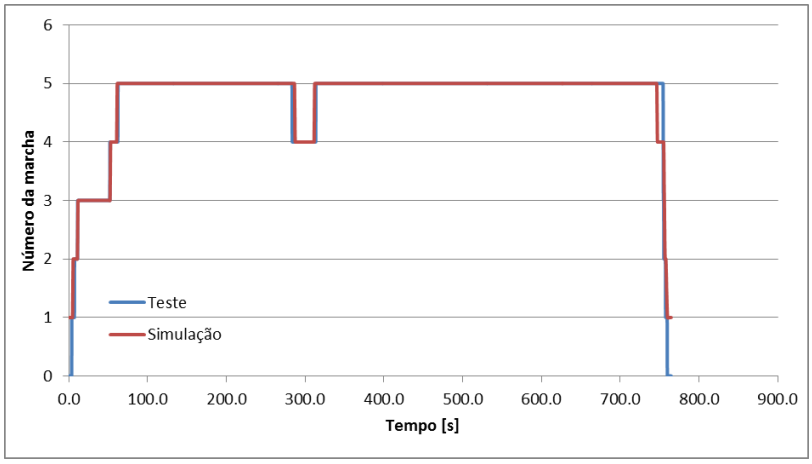

Figura 74 – NBR 7024 – E22 – Troca de marcha
Fonte: Autor

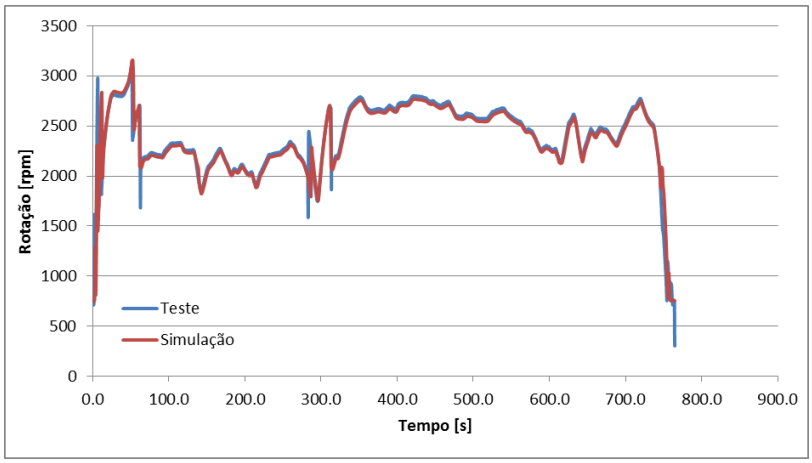

Figura 75 – NBR 7024 – E22 – Rotação do motor
Fonte: Autor

APÊNDICE B – Gráficos de validação do modelo matemático para o E100

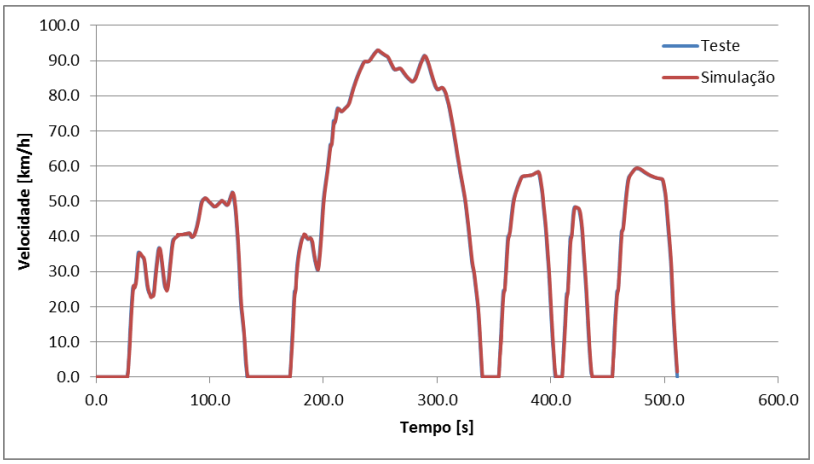

Figura 76 – NBR 6601 – Fase 1 – E100 – Velocidade do veículo
Fonte: Autor

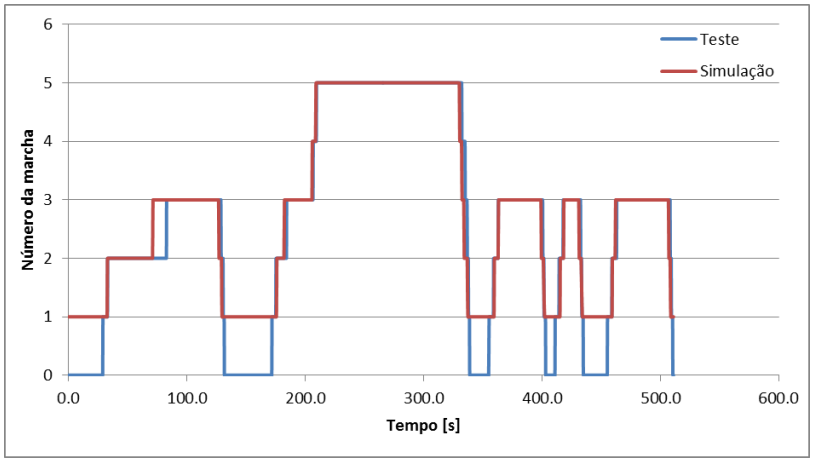

Figura 77 – NBR 6601 – Fase 1 – E100 – Troca de marcha
Fonte: Autor

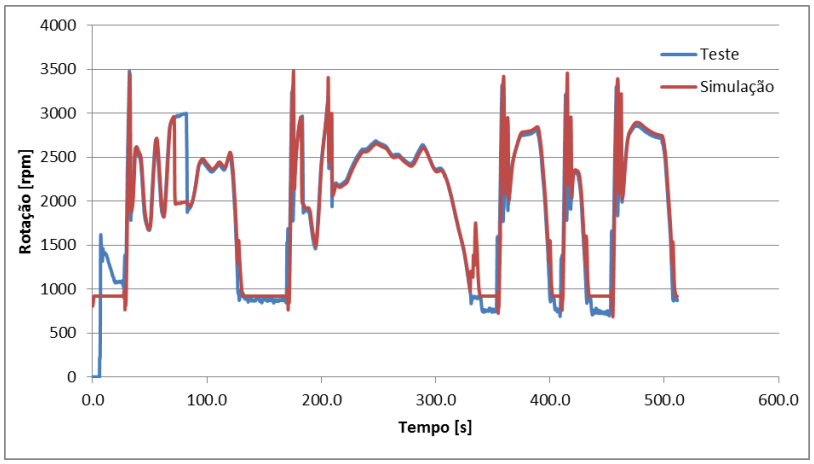

Figura 78 – NBR 6601 – Fase 1 – E100 – Rotação do motor
Fonte: Autor

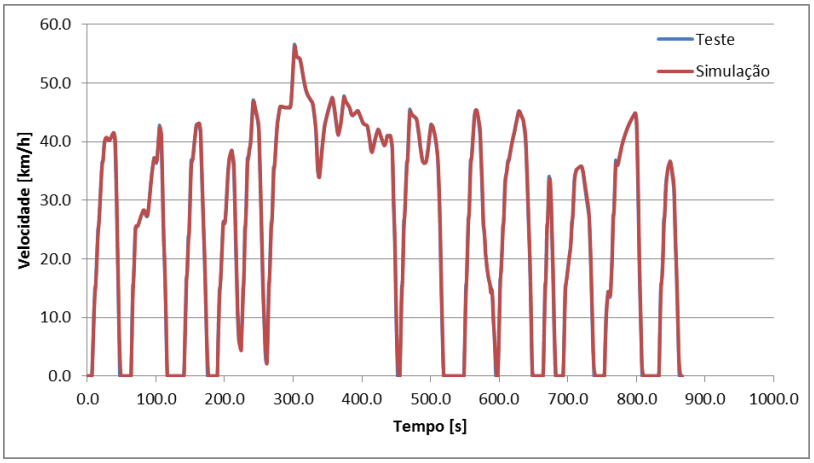

Figura 79 – NBR 6601 – Fase 2 – E100 – Velocidade do veículo
Fonte: Autor

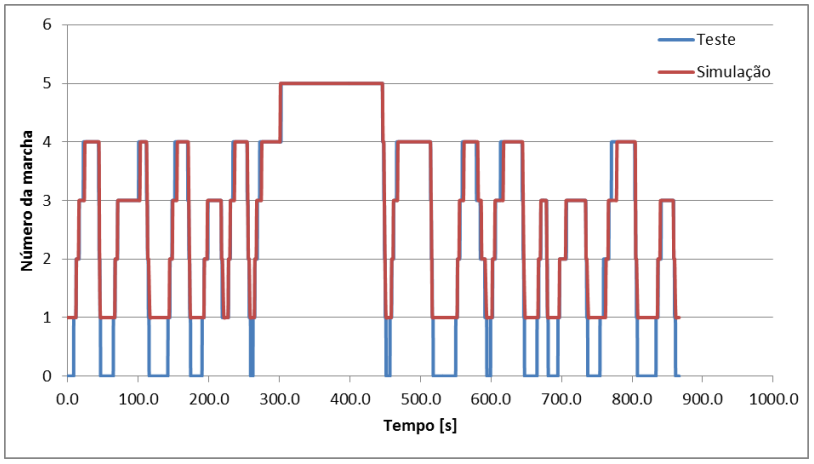

Figura 80 – NBR 6601 – Fase 2 – E100 – Troca de marcha
Fonte: Autor

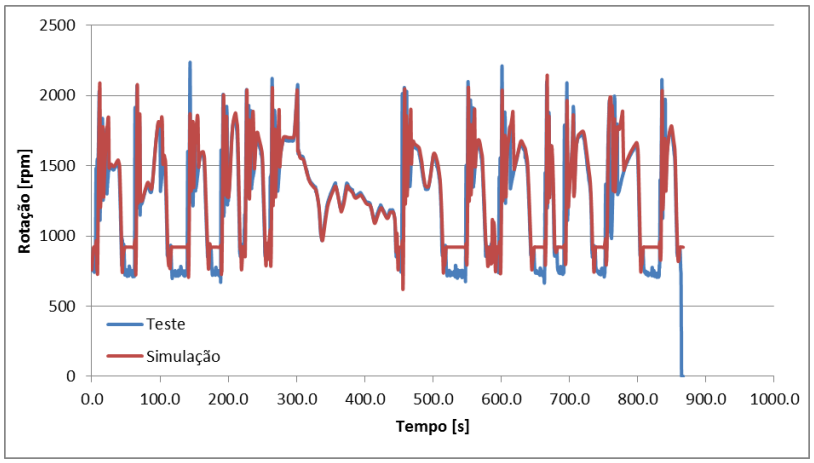

Figura 81 – NBR 6601 – Fase 2 – E100 – Rotação do motor
Fonte: Autor

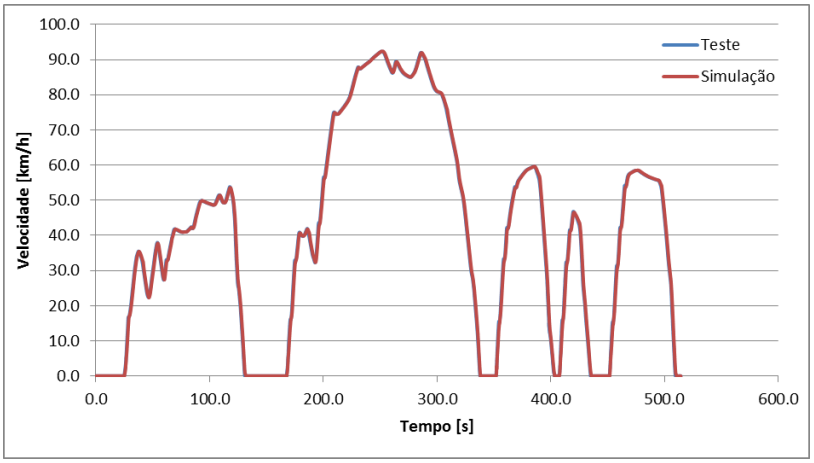

Figura 82 – NBR 6601 – Fase 3 – E100 – Velocidade do veículo
Fonte: Autor

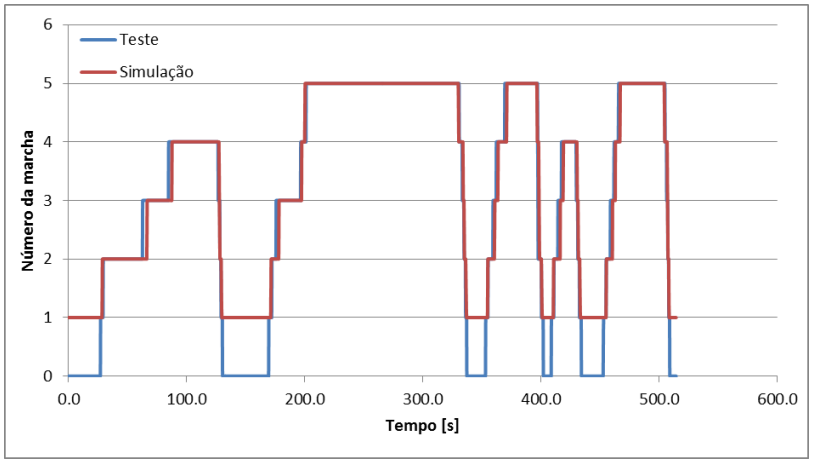

Figura 83 – NBR 6601 – Fase 3 – E100 – Troca de marcha
Fonte: Autor

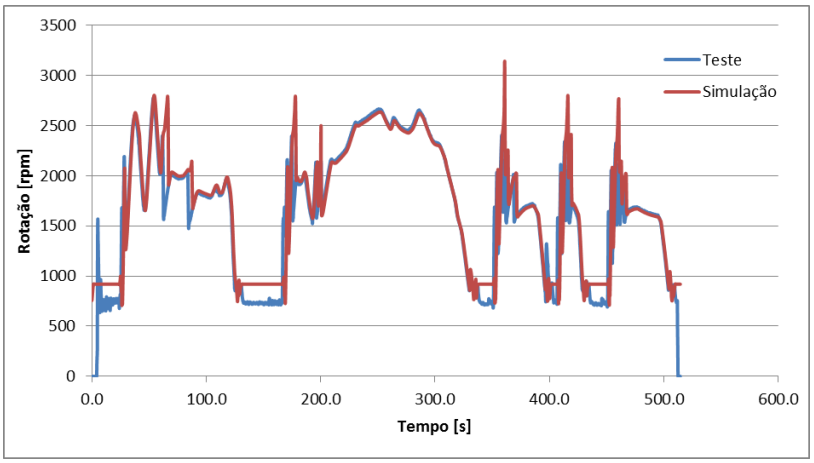

Figura 84 – NBR 6601 – Fase 3 – E100 – Rotação do motor
Fonte: Autor

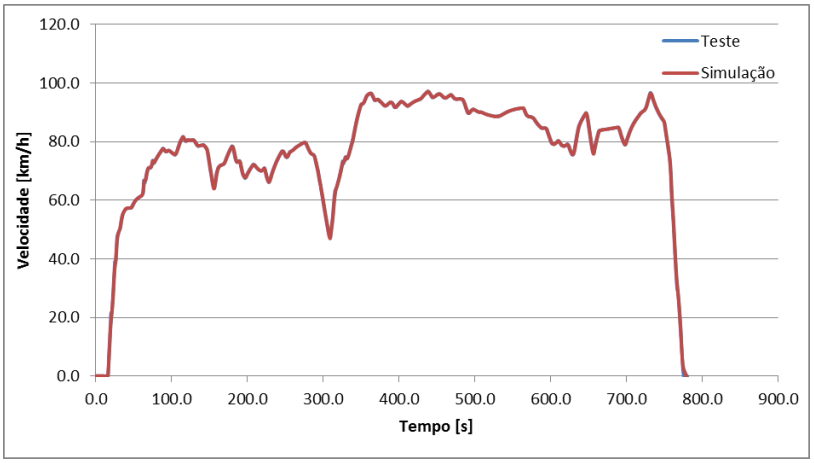

Figura 85 – NBR 7024 – E100 – Velocidade do veículo
Fonte: Autor

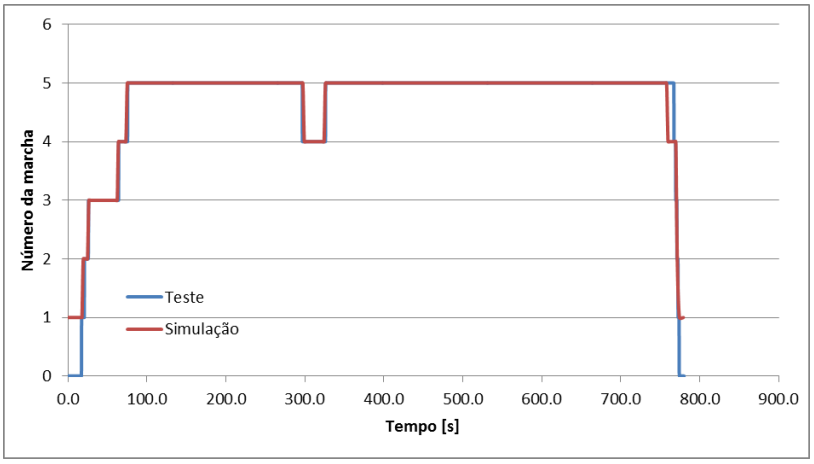

Figura 86 – NBR 7024 – E100 – Troca de marcha
Fonte: Autor

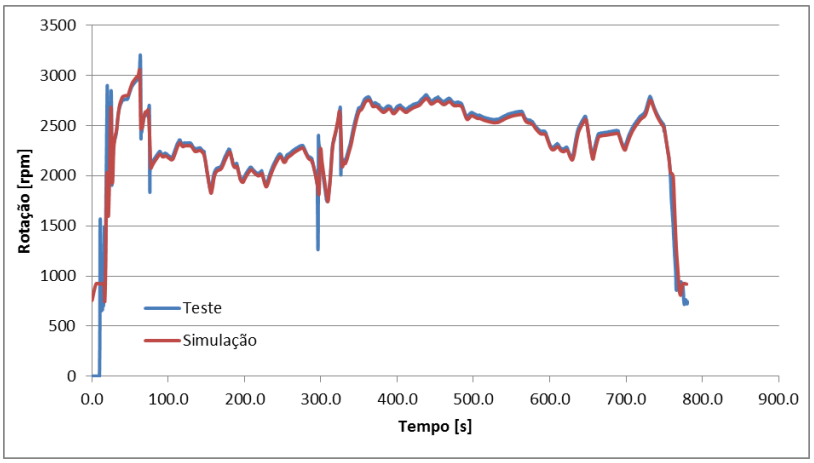

Figura 87 – NBR 7024 – E100 – Rotação do motor
Fonte: Autor