PROJETO DE GRADUAÇÃO

ANÁLISE E OTIMIZAÇÃO DE PARÂMETROS DE DESEMPENHO DE ÔNIBUS URBANOS

Por,

Tulio Gomes de Paula Machado

Brasília, 30 de junho de 2016

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
Faculdade de Tecnologia
Departamento de Engenharia Mecânica

PROJETO DE GRADUAÇÃO

ANÁLISE E OTIMIZAÇÃO DE PARÂMETROS DE DESEMPENHO DE ÔNIBUS URBANOS

Por

Tulio Gomes de Paula Machado

Projeto de Graduação submetido como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Mecânico

Banca Examinadora

Prof. Adriano Todorovic Fabro, UnB/ENM – Orientador

Prof. Alberto Carlos Guimarães Castro Diniz, UnB/ENM – Co-orientador

---

Prof. Marcus Vinicius Girão de Morais, UnB/ENM – Examinador

Eng. Lucas Ferreira Lopes – Examinador

Brasília, 30 de junho de 2016

Agradecimentos

Agradeço primeiramente à minha família. Meus pais, Ernani e Diane, e minha irmã, Julia, que sempre estiveram ao meu lado em todos os momentos. Obrigado por todo apoio, suporte e amor incondicional. Eu jamais teria chegado aqui sem o exemplo de vocês.

Agradeço aos Professores Adriano Fabro e Alberto Diniz pela orientação neste projeto e pela atenção durante todo este ano. Obrigado por todas as discussões e sugestões para encontrar a melhor forma de solucionar o problema deste projeto. Também agradeço ao Lucas Lopes, pela disponibilidade em fornecer dados para complementar este trabalho, que certamente melhoraram a qualidade dos resultados obtidos.

Agradeço a todos os Professores que tive durante a graduação na UnB, tanto no ENM como nos outros departamentos dos primeiros anos do curso, pelo conhecimento que pude aprender e garantir a qualidade da minha formação. Agradeço aos Técnicos e Funcionários do ENM por proporcionarem o devido funcionamento do departamento, essencial para a formação de todos os alunos da Engenharia Mecânica.

Por último, e não menos importante, agradeço a todas as amizades que me acompanham por todos estes anos. Aos amigos de longa data, que antecedem a minha entrada na UnB, por terem acompanhado o longo processo até chegar o momento de fazer o vestibular, esperar o resultado e comemorar a aprovação. Aos amigos que fiz durante o curso, pelos momentos que passamos, sejam eles de estudo e tensão antes das provas, ou quando lamentamos notas baixas ou comemoramos bons resultados, pelas noites viradas e mal dormidas, pelos bares e churrascos. As amizades que fiz quando morei na Escócia, por terem acompanhado as diversas mudanças que todos nós passamos durante aquele ano, tanto no aspecto pessoal quanto acadêmico.

Muito Obrigado,

Tulio Gomes de Paula Machado

RESUMO

Este projeto é focado no desenvolvimento de uma análise numérica e de otimização dos parâmetros de ônibus urbanos que afetam diretamente o consumo de combustível e taxas de emissão de poluentes. A metodologia desenvolvida baseia-se em um software comercialmente disponível, o CMEM - Comprehensive Modal Emissions Model. Este software pode calcular as taxas de consumo de combustível e emissões com base em uma extensa base de dados obitdas a partir de medições reais em diferentes veículos. O software depende das características do veículo sendo analisado, como peso, cilindrada, relações de transmissão e das condições de rota, como curva de velocidades e aceleração, elevações do terreno, acabamento da pista, etc. Alguns aspectos da estrutura lógica do CMEM foram adaptados devido à falta de informação pública disponível. A estratégia de otimização utilizando algoritmos genéticos é desenvolvida em seguida em linguagem MATLAB. O algoritmo genético busca a melhor parametrização para as rotações limite para troca de cada uma das marchas. Neste trabalho, a melhor parametrização é aquela que fornece os mais baixos índices de consumo de combustível e de emissões de poluentes possíveis. Diferentes rotas são testadas a fim de verificar a possibilidade de se ter ônibus com diferentes parametrizações de acordo com a rota.

ABSTRACT

This project is focused on the development of a numerical analysis and optimization of the parameters of urban buses of the city of Brasilia that affect directly both fuel consumption and pollutant emission rates. Technical characteristics of buses are taken into account to estimate the fuel consumption rates and the pollutant emission rates for a given route. The methodology developed is based on a commercial available software, the CMEM - Comprehensive Modal Emissions Model. This software can estimate fuel consumption and emissions rates based on an extensive real measurements database of different vehicles, and it is strongly dependent of the characteristics of the buses, such as its weight, engine displacement, transmission ratios etc., and the characteristics of the route such as the road grade and speed and acceleration. Certain aspects of the CMEM structure have been adapted due to the lack of public information available to reproduce them. The optimization strategy using genetic algorithms is developed using MATLAB. The genetic algorithm searches for the best combination of upper limit engine speed for each gear,, among a variety of different possibilities. The best upper limit engine speed combination is the one that performs the lowest fuel consumption and emission ratios as possible considering a given route. Furthermore, different routes are tested while performing the optimization in order to verify whether it is possible to have different buses' configurations for different urban routes.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 1
1.1 JUSTIFICATIVA 1
1.2 OBJETIVO 2
1.3 ESTRUTURA DO RELATÓRIO 2

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 4
2.1 TRANSPORTE PÚBLICO BRASILEIRO 4
2.2 CONSUMO DE COMBUSTÍVEL 5
2.3 ASPECTOS TÉCNICOS DOS ÔNIBUS URBANOS 6
2.3.1 MOTOR 6
2.3.2 TRANSMISSÃO 8
2.3.3 RODAS 10
2.4 FORÇAS RESISTIVAS ATUANTES NO VEÍCULO 12
2.5 POTÊNCIA ESPECÍFICA - VSP 14
2.6 EMISSÕES DE POLUENTES 15
2.6.1 DESCRIÇÃO DOS POLUENTES 15
2.6.2 REGULAÇÃO AMBIENTAL 16
2.7 ESTUDO PRÉVIOS EM EMISSÕES DE POLUENTES 16
2.7.1 OS TESTES 17
2.7.2 EMISSÕES MODAIS 17
2.8 MODELO DE EMISSÕES DE POLUENTES 19
2.8.1 ESTRUTURA DO MODELO 20
2.8.2 CÁLCULO DA POTÊNCIA 20
2.8.3 ROTAÇÃO DO MOTOR 21
2.8.4 TAXA DE CONSUMO DE COMBUSTÍVEL 21
2.8.5 TAXA DE EMISSÕES DE POLUENTES 22
2.8.6 TRATAMENTO DE PÓS-EXAUSTÃO 23

3 PROPOSTA PARA MODELAGEM DE EMISSÕES 24
3.1 ESTRUTURA DA METODOLOGIA PROPOSTA 24
3.2 CÁLCULO DE POTÊNCIA 25
3.2.1 CURVA DE VELOCIDADES 26
3.2.2 INCLINAÇÃO DO PERCURSO 27
3.2.3 TERMOS DE RESISTÊNCIA 29
3.2.4 DISTRIBUIÇÃO TEMPORAL DE POTÊNCIA ESPECÍFICA 29
3.3 AGRUPAMENTO EM MODOS 30
3.4 ESTIMATIVA DO CONSUMO DE COMBUSTÍVEL 30

3.4.1 Caracterísitcas do Veículo 30
3.4.2 Cálculo da rotação do Motor 30
3.4.3 Cálculo do consumo de combustível 31
3.5 Estimativa de Emissões de Poluentes 32
3.6 Resultados 33
3.6.1 Distribuição Modal de Potência 33
3.6.2 Consumo Modal de Combustível 35
3.6.3 Emissões Modais de Poluentes 36
3.7 Considerações Finais 40

4 Otimização 41
4.1 Os Algoritmos Genéticos 41
4.1.1 Codificação 42
4.2 População Inicial 43
4.3 Função Objetivo 43
4.4 Elitismo 43
4.5 Seleção 43
4.5.1 Seleção Proporcional - Roleta 43
4.5.2 Dizimação 44
4.5.3 Torneio 44
4.6 Operadores Genéticos 45
4.6.1 Cruzamento 45
4.6.2 Mutação 46
4.7 Critérios de Convergência 47

5 Implementação da Otimização 48
5.1 O Problema 48
5.2 O Veículo 49
5.3 O Trajeto 49
5.3.1 Curva de Velocidades 50
5.3.2 Curvas de Inclinação do Percurso 52
5.4 O Algoritmo Genético 53
5.5 Criação da População Inicial 55
5.6 Função Objetivo 56
5.6.1 Verificação da Cinemática 57
5.6.2 Verificação da Potência 58
5.6.3 Avaliação de Consumo 60
5.7 Criação de Novas Populações 62
5.7.1 Seleção 62
5.7.2 Operadores Genéticos 63
5.7.3 Adequação de Valores 64

5.8 AVALIAÇÃO DAS EMISSÕES DE POLUENTES 65

6 RESULTADOS 67
6.1 TRAJETO 1 67
6.1.1 PARAMETRIZAÇÃO OTIMIZADA 68
6.1.2 EVOLUÇÃO DA FUNÇÃO FITNESS 69
6.1.3 ANÁLISE DE POLUENTES 70
6.2 TRAJETO 2 71
6.2.1 PARAMETRIZAÇÃO OTIMIZADA 72
6.2.2 EVOLUÇÃO DA FUNÇÃO FITNESS 73
6.2.3 ANÁLISE DE POLUENTES 73
6.3 TRAJETO 3 75
6.3.1 PARAMETRIZAÇÃO OTIMIZADA 77
6.3.2 EVOLUÇÃO DA FUNÇÃO FITNESS 77
6.3.3 ANÁLISE DE POLUENTES 78
6.4 CRITÉRIOS DE CONVERGÊNCIA 80
6.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS 82

7 CONCLUSÕES 84

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 86

ANEXOS 87

LISTA DE FIGURAS

2.1 Índice de passageiros transportados por distância percorrida (Araújo, 2012) 4
2.2 Custos Operacionais do Transporte Urbano: Ônibus Básico (Araújo, 2012) 5
2.3 Funcionamento de Motor a Diesel de Quatro Tempos (Hoff e Gregory, 2003) 6
2.4 Exemplo de Curva de Potência e Torque (Hoff e Gregory, 2003) 7
2.5 Esquema de veículo com motor dianteiro e tração traseira (Hoff e Gregory, 2003).. 8
2.6 Deformação da roda de um veículo (Gillespie, 1992) 10
2.7 Roda de um veículo em rolamento sem deslizamento 11
2.8 Diagrama das forças resistivas atuando no ônibus (Araújo, 2012) – modificado 12
2.9 Equipamento SEMTECH-D utilizado nos testes da EPA (Einsfield, 2002) 17
2.10 Taxas de Emissões de CO_2 em função da potência específica - (Zhai et al, 2008) ... 18
2.11 Diagrama de Blocos da estrutura lógica do CMEM 20
2.12 Resultados experimentais de emissões de poluentes do Ford F-250 (Barth et al., 2000) 23

3.1 Diagrama de Blocos da Metodologia Proposta 25
3.2 Curva de Velocidade em uma rota urbana - (EPA) 26
3.3 Exemplo de Perfil Topográfico de uma Rota 27
3.4 Rota de Ônibus Considerada (Lopes, 2014) 28
3.5 Elevações e Inclinações da Rota (Lopes, 2014) 28
3.6 Distribuição Temporal de Potência Específica 29
3.7 Coeficientes de Regressão Linear para cálculo de emissões (Barth et al., 2000)..... 33
3.8 Distribuição Modal do VSP 34
3.9 Tempo de Viagem em cada modo do VSP 34
3.10 Consumo Modal de Combustível 35
3.11 Consumo Modal de Combustível Experimental (Zhai et al., 2008) 35
3.12 Comparativo do Consumo entre metodologia e resultados experimentais 36
3.13 Emissões Modais de Monóxido de Carbono 37
3.14 Emissões Modais de Hidrocarbonetos 37
3.15 Emissões Modais de Óxidos de Nitrogênio 38
3.16 Emissões Modais Experimentais (Zhai et al., 2008) 39

4.1 Método da Roleta (Rodrigues, 2012) 44
4.2 Método do Torneio (Mognon, 2004) 45
4.3 Cruzamento de Ponto Único 45
4.4 Cruzamento de Ponto Duplo 46
4.5 Cruzamento de Pontos Aleatórios 46
4.6 Mutação em Codificação Binária 47

5.1 Dimensões do Chassis do Veículo considerado (MAN-LA) 49
5.2 Curva de Velocidade em uma rota urbana - (EPA) 51
5.3 Diferenças de elevação, inclinação do trajeto e curva de velocidades 53
5.4 Fluxograma do Algoritmo Genético 54

6.1 Trajeto 1 - Linha de ônibus 0.044 67
6.2 Trajeto 1 - Elevação, Inclinação e Velocidade 68
6.3 Trajeto 1 - Função Fitness ao longo das gerações 69
6.4 Trajeto 1 - Emissões de Poluentes 71
6.5 Trajeto 2 - Linha de ônibus 0.957 71
6.6 Trajeto 2 - Elevação, Inclinação e Velocidade 72
6.7 Trajeto 2 - Função Fitness ao longo das gerações 73
6.8 Trajeto 2 - Emissões de Poluentes 75
6.9 Trajeto 3 - Linha de Ônibus 0.886 76
6.10 Trajeto 3 - Elevação, Inclinação e Velocidade 76
6.11 Trajeto 3 - Função Fitness ao longo das gerações 78
6.12 Trajeto 3 - Emissões de Poluentes 80

LISTA DE TABELAS

2.1 Raios de Roda de Pneus Comerciais (Araújo, 2012) 11
2.2 Coeficiêntes de Resistência à Rolagem (Hoff e Gregory, 2003) 13
2.3 Coeficientes de Arrasto C_D (Hoff e Gregory, 2003)..... 13
2.4 Limites de Emissões Proconve P7 (CONAMA, 2008) 16
2.5 Distribuição Modal por Faixa de Potência (Frey et al., 2007) 19
2.6 Distribuição Modal por Modo de Condução - (Frey et al., 2002)..... 19

3.1 Inclinações da rota considerada (Lopes, 2014)..... 28
3.2 Comparativo entre valores numéricos e experimentais..... 39

5.1 Dados do Veículo VW 15-190 OD (MAN-LA)..... 50
5.2 Exemplo de arquivo speed.mat..... 52
5.3 Exemplo de arquivo road-grade.mat 53
5.4 Condições para agrupamento em Modos 65

6.1 Parametrização Padrão para o Trajeto 1..... 68
6.2 Parametrização Otimizada para Trajeto 1 69
6.3 Emissões de Poluentes no Trajeto 1..... 70
6.4 Parametrização Padrão para o Trajeto 2..... 72
6.5 Parametrização Otimizada para Trajeto 2 73
6.6 Emissões de Poluentes no Trajeto 2..... 74
6.7 Parametrização Padrão para o Trajeto 3..... 77
6.8 Parametrização Otimizada para Trajeto 3 77
6.9 Emissões de Poluentes no Trajeto 3..... 79
6.10 Influência do número de gerações e indivíduos na Função Fitness 81
6.11 Avaliação Final na Melhoria da Economia de Combustível..... 82

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolos Latinos

a	Aceleração	[m/s^2]
C_D	Coeficiente de arrasto aerodinâmico	-
C_{rol}	Coeficiente de resistência à rolagem	-
D	Distância percorrida	[km]
E	Energia	[J]
ECO	Taxas de emissões de CO	[g/s]
ENO	Taxas de emissões de NO	[g/s]
EHC	Taxas de emissões de HC	[g/s]
F	Força	[N]
f_e	Economia de combustível	[km/L]
g	Aceleração da gravidade	[m/s^2]
k	Coeficiente de atrito do motor	[kPa]
m	Massa do veículo	[kg]
N	Rotação	[rpm]
P	Potência	[W]
dP	Diferencial de Potência	[W]
R_a	Relação de redução no diferencial	-
r_r	Raio de roda	[m]
R_t	Relação de redução na transmissão	-
R_v	Razão de rotação e velocidade de translação	[rpm/km/h]
T	Torque	[Nm]
t	Tempo	[s]
v	Velocidade	[m/s]
V_D	Deslocamento do motor (cilindrada)	[L]
V_f	Volume de combustível consumido	[L]
dV	Volume diferencial de combustível	[L]
W	Peso do veículo	[N]
x	Distância horizontal	[m]
y	Elevação vertical	[m]

Símbolos Gregos

Δ	Variação de uma grandeza	-
η	Eficiência da motor	-
ρ	Densidade	[kg/m^3]
ψ	Termo de Resistência a Rolagem	
θ	Inclinação da pista	[rad]
ω	Velocidade angular	[rad/s]
ζ	Termo de resistência aerodinâmica	[1/m]

Subscritos

max	Máximo
min	Mínimo
c	Cinética
p	Potencial
$arrasto$	de arrasto aerodinâmico
rol	de resistência à rolagem
$trans$	da transmissão
$roda$	da roda
$motor$	do motor
in	de entrada
out	de saída
$CMEM$	do CMEM
i	i-ésimo termo do incremento
req	quantidade requerida

Siglas

AATA	*Ann Arbor Transit Authority*
CMEM	*Comprehensive Modal Emissions Model*
CO	Monóxido de Carbono
NO	Óxido de Nitrogênio
HC	Hidrocarbonetos
PM	Material Particulado
VSP	*Vehicle Specific Power*
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente

1 INTRODUÇÃO

1.1 JUSTIFICATIVA

Ônibus urbanos são uma das principais fontes de poluentes em áreas urbanas (Cappiello, 2002) e devido à alta taxa de circulação deste tipo de veículo nas cidades brasileiras (Araújo, 2012), a investigação das causas das emissões a partir de aspectos técnicos destes veículos possibilita o desenvolvimento de métodos capazes de prever emissões de poluentes.

As regulações sobre qualidade do ar nas cidades começaram a ser desenvolvidas nos Estados Unidos ainda nos anos 1970. Desde então a EPA - *Environmental Protection Agency* estabelece padrões de emissão de poluentes para vários tipos de veículos, dentre eles veículos movidos a diesel destinados a serviço pesado. Estas regulações são cada vez mais rigorosas com o passar do tempo, exigindo que os veículos sejam cada vez menos impactantes sob o ponto de vista ambiental.

A EPA desenvolveu, em 2001, extensos estudos experimentas na investigação das emissões de poluentes para diversos ônibus urbanos. A metodologia dos testes realizados consistiu em circular diversos ônibus em rotas reais, simulando pontos de parada para embarque de passageiros, conforme dados a respeito da velocidade, aceleração, consumo de combustível e emissões de poluentes eram adquiridos em tempo real (Ensfield, 2002). Estas informações podem, de alguma maneira, serem adaptadas a realidade dos ônibus do Distrito Federal.

No final dos anos 1990, o software CMEM - *Comprehensive Modal Emissions Model* foi desenvolvido na Universidade da Califórnia-Riverside a partir de uma série de testes com vários veículos e uma extensa base de dados experimentais. Este software é capaz de prever, a partir de alguns parâmetros de entrada, como as velocidades desenvolvidas, topografia da rota e características do veículo, o consumo de combustível e as emissões de poluentes durante o trajeto. A despeito deste software não ter sido adquirido, o modelo tem a vantagem de utilizar equações analíticas para a modelagem dos resultados, o que permite a adaptação de sua estrutura lógica aos propósitos deste trabalho. As informações a respeito do funcionamento do software foram obtidas do seu relatório de desenvolvimento (Barth, et al., 2000).

Com os custos relativos ao consumo de combustível sendo um dos mais impactantes às empresas operadoras (Araújo, 2012) e as crescentes preocupações ambientais existentes na atualidade, a busca pela redução de custos e de impactos ambientais pela otimização de aspectos técnicos dos veículos torna-se um problema de engenharia interessante.

Trabalhos anteriores desenvolvidos na Universidade de Brasília relativos à otimização de veículos motivam a execução deste. Lopes (2014) levantou dados a partir da frota de ônibus da Expresso São José, empresa operadora de transporte público do Distrito Federal. Neste trabalho, objetivou-se a elaboração de uma estratégia para redução de custos baseado na quantificação dos

parâmetros que influenciam no desempenho e consumo dos veículos. O levantamento investigou empiricamente a parametrização para os limites de rotação para troca de marchas, e sugeriu a otimização dos veículos de acordo com o tipo de linha as quais estes devem percorrer.

A otimização de parâmetros relativos à automóveis foi tema do trabalho de Colherinhas e Dias (2014) que buscou otimizar via algoritmos genéticos a cadeia cinemática de um veículo para condições distintas: maior desempenho possível e maior economia de combustível possível.

No trabalho de Zeigerman e Reis (2015) buscou-se a otimização dos limites de rotação para troca de marchas de um ônibus urbano visando minimizar o consumo de combustível. A otimização foi feita variando o carregamento devido à inclinação do veículo durante o momento da partida. O emprego de algoritmos genéticos na otimização também foi verificado no trabalho de Zeigerman e Reis, que utilizou como base o algoritmo desenvolvido por Colherinhas e Dias.

Este Projeto apresenta potencial aplicação prática, sobretudo na busca de redução de custos e de impactos ambientais. Os métodos disponíveis para previsão de emissões de poluentes a partir de aspectos técnicos permitem a aplicação de estratégias de otimização para tornar estes veículos cada vez menos poluentes. Os algortimos genéticos, ferramentas sofisticadas para encontrar soluções ótimas de problemas que dependem de diversas variáveis, são utilizados neste trabalho.

1.2 OBJETIVO

O objetivo deste Projeto de Graduação é a análise e investigação dos parâmetros e aspectos técnicos dos ônibus que afetam diretamente no seu desempenho para posterior otimização destes parâmetros buscando minimizar taxas de consumo de combustível e de emissões de poluentes.

Para modelar as emissões de poluentes, adapta-se o modelo de emissões comercialmente disponível para a realidade deste Projeto. A partir deste modelo adaptado, utiliza-se a otimização via algoritmos genéticos para encontrar a parametrização de rotações para troca de marchas de ônibus urbanos que forneça as menores taxas de consumo de combustível e de emissões de poluentes possíveis. Verifica-se também a influência do trajeto quando é testa-se diferentes trajetos na busca de diferentes parametrizações.

1.3 ESTRUTURA DO RELATÓRIO

O presente relatório é estruturado em sete capítulos. No Capítulo 2 são apresentados os conceitos básicos para o desenvolvimento deste trabalho, a realidade do transporte público no Brasil, bem como os principais aspectos técnicos dos ônibus envolvidos na otimização. São descritos os impactos ambientais causados pelas emissões de poluentes e uma revisão bibliográfica sobre estudos feitos na área de controle e modelagem de emissões de veículos automotores já existentes. Por fim, o método de funcionamento do software CMEM, que serve de base para a metodologia proposta no Capítulo 3.

O Capítulo 3 apresenta os procedimentos e as considerações adotadas na adaptação do CMEM à realidade deste projeto. Procura-se conseguir um modelo de emissões de poluentes que utilizável na implementação do algoritmo genético. Utiliza-se a mesma base de dados encontrada na literatura e algumas aproximações para verificar o funcionamento da metodologia desenvolvida. Por fim, compara-se os resultados obtidos com os resultados experimentais disponíveis.

O Capítulo 4 apresenta os conceitos básicos relativos à otimização via algoritmos genéticos. Tal qual nos trabalhos anteriores, este projeto utiliza o código que inicialmente foi desenvolvido por Colherinhas e Dias (2014) e posteriormente adaptado por Zeigerman e Reis (2015).

O Capítulo 5 discute os procedimentos utilizados na adaptação do algoritmo genético à realidade deste trabalho e apresenta a maneira como o código foi elaborado considerando as novas características do problema. Foca-se principalmente na descrição completa da função objetivo, nas restrições que cada solução deve atender para ser avaliada pelo algoritmo e de que maneira as características dos indivíduos avaliados são levadas adiante ao longo das gerações.

O Capítulo 6 fornece os resultados obtidos pela otimização para três casos distintos. Os casos são então avaliados do ponto de vista econômico e ambiental. Discute-se brevemente os efeitos da escolha dos parâmetros relativos à otimização no mecanismo de busca de uma solução ótima para o problema.

As conclusões deste trabalho são apresentadas no Capítulo 7, conjuntamente com as sugestões deixadas para trabalhos futuros.

No Anexo são apresentados os códigos desenvolvidos em MATLAB utilizados no desenvolvimento deste Projeto.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo introduz a realidade dos meios de transporte público no Brasil. Primeiramente são apresentados os conceitos básicos relativos a circulação de ônibus urbanos e seus aspectos técnicos relevantes para este Projeto de Graduação.

Em seguida, são descritas as forças resistivas ao movimento atuantes no veículo em operação. Apresenta-se os tipos de poluentes relacionados à circulação dos ônibus conjuntamente com as regulamentações ambientais vigentes para controle destes. Por fim, o modelo de previsão de emissões de poluentes disponível comercialmente é apresentado.

2.1 TRANSPORTE PÚBLICO BRASILEIRO

Veículos destinados ao transporte público são fundamentais para o bom funcionamento das cidades no que tange ao transporte de pessoas para o seus respectivos locais de trabalho, de estudo, de moradia e de lazer. É uma preocupação dos grandes centros urbanos ao redor de todo o planeta garantir a mobilidade de seus cidadãos de maneira eficiente, confortável e econômica.

No Brasil verifica-se a predominância do transporte rodoviário perante aos demais tipos de transporte público. A distribuição do índice de passageiros transportados por distância percorrida, de acordo com a modalidade de transporte, pode ser verificada na Figura 2.1. Segundo Araújo (2012), a modalidade rodoviária corresponde a mais de 95% do índice de passageiros transportados.

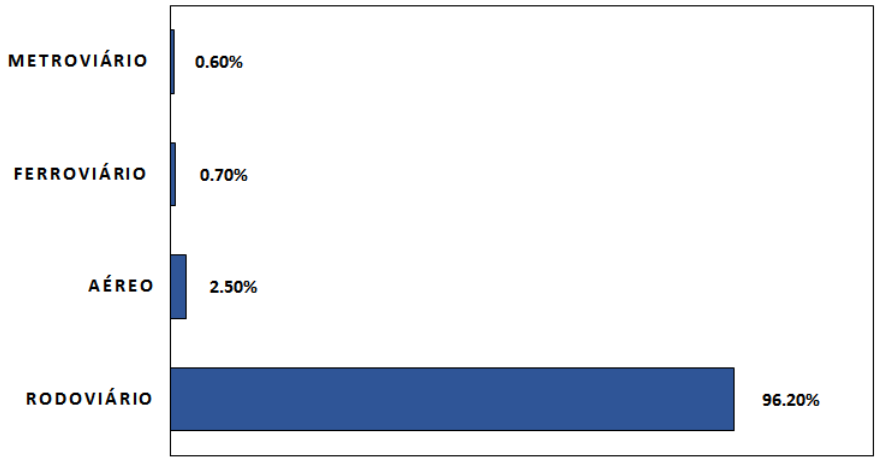

Figura 2.1: Índice de passageiros transportados por distância percorrida (Araújo, 2012)

Com cerca de 84% da população brasileira vivendo em áreas urbanas, verifica-se a relevância do transporte pelo modo rodoviário na dinâmica das cidades brasileiras. Ainda que automóveis de passeio tenham grande impacto nas estatísticas dos meios de transporte rodoviário, o principal

meio de transporte rodoviário utilizado ainda é o ônibus (Araújo, 2012).

Por mais alto que seja o benefício devido à mobilidade urbana garantida pela extensa malha rodoviária e a grande quantidade de veículos operando nas cidades, a grande circulação destes veículos traz consigo diversos problemas ambientais. Os ônibus urbanos brasileiros são majoritariamente movidos por motores de combustão interna a diesel. Logo, o setor de transportes rodoviários é responsável por quase a totalidade das emissões de óxidos nítricos e monóxido de carbono (Cappiello, 2002). Desta forma, justifica-se a relevância de se estudar o impacto causado pela circulação destes veículos nas cidades brasileiras.

2.2 CONSUMO DE COMBUSTÍVEL

Em termos de custos, o consumo de combustível representa cerca de 21% dos custos operacionais às empresas operadoras, ficando apenas atrás das despesas com os motoristas dos veículos (Araújo, 2012). Sendo a segunda maior fonte de despesas às empresas, qualquer melhoria no consumo de combustível dos veículos trará aumentos na lucratividade dessas empresas e irá mantê-las competitivas perante à concorrência. A Figura 2.2 mostra a distribuição percentual dos custos operacionais de uma operadora de ônibus.

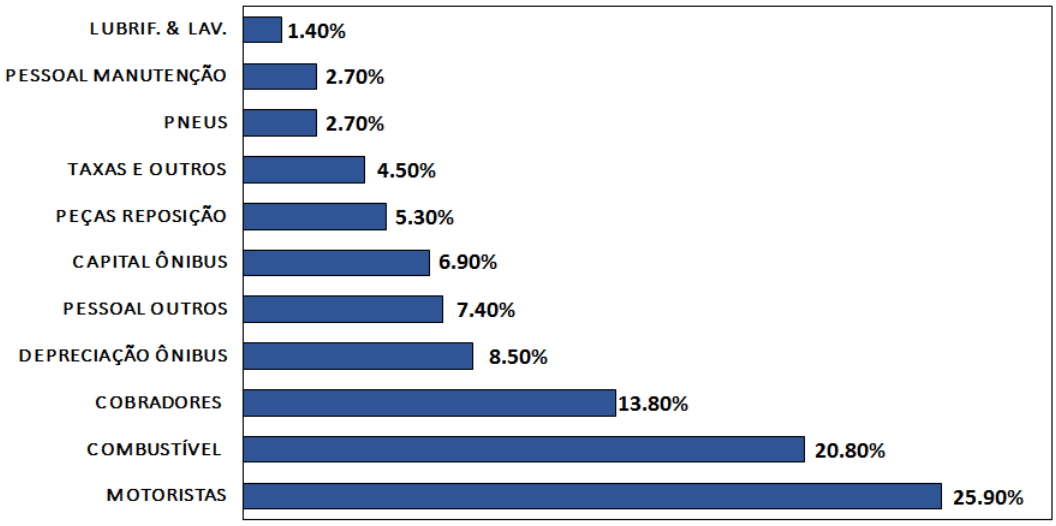

Figura 2.2: Custos Operacionais do Transporte Urbano: Ônibus Básico (Araújo, 2012)

Giannelli et al. (2005) define que o consumo de combustível de um veículo está associado primeiramente à potência do veículo durante todo o trajeto. A potência mínima requerida para que o veículo se desloque de maneira adequada depende das características topográficas da rota e das forças resistivas atuantes no veículo durante o movimento. Lopes (2014) associa um alto consumo de combustível como consequência da operação com o motor fora da faixa econômica. As variáveis tamanho do veículo, capacidade de passageiros, potência do motor, temperatura, especificidades da rota e estilo de direção do motorista podem influenciar a operação fora desta faixa econômica.

Sob o aspecto ambiental, os níveis de emissões de poluentes estão correlacionados ao consumo de combustível. Um ônibus que consome menos combustível emite poluentes em menor quantidade após a combustão. O desenvolvimento de modelos capazes de estimar as emissões de poluentes só foi possível com o desenvolvimento de instrumentos capazes de medir instantaneamente, tempo a tempo, a velocidade, o consumo de combustível e as emissões de poluentes durante as viagens dos ônibus em áreas urbanas. Os modelos desenvolvidos são (1) baseados em correlações entre emissões e potência específica ou (2) consideram vários outros aspectos técnicos relativos aos veículos que não só a potência, como por exemplo perdas por fricção, mudanças de marcha, eficiência na transmissão, etc (Giannelli et al., 2005).

2.3 ASPECTOS TÉCNICOS DOS ÔNIBUS URBANOS

Esta seção apresenta os componentes envolvidos na engenharia dos ônibus urbanos, sobretudo a respeito do motor e da cadeia de transmissão. O consumo de combustível e emissões de poluentes são relacionados com as características técnicas dos veículos e compreendê-las é de fundamental importância para a implementação de uma estratégia de otimização.

2.3.1 Motor

A principal função do motor é gerar trabalho mecânico, por meio da conversão de energia química armazenada no combustível em energia cinética. Um bom consumo de combustível está relacionado com o funcionamento adequado do motor. Salvo raras exceções, como nos ônibus elétricos, os ônibus normalmente utilizam motores de combustão interna de quatro tempos, operando no ciclo Diesel. O ciclo Diesel é composto por quatro tempos: admissão, compressão, ignição e exaustão como exemplificado pela Figura 2.3.

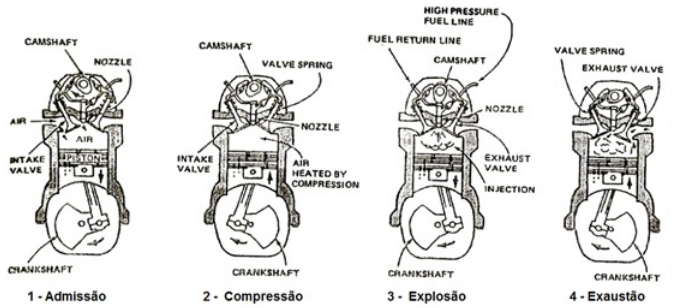

Figura 2.3: Funcionamento de Motor a Diesel de Quatro Tempos (Hoff e Gregory, 2003)

O primeiro tempo mostrado em (1) é a admissão, caracterizada pela entrada de ar dentro dos cilíndros. Com a subsequente compressão deste ar, tem-se o segundo tempo, a compressão, mostrado em (2) na Figura 2.3. O ar comprimido dentro da câmara de combustão se torna mais quente e após a injeção de óleo diesel dentro do cilindro ocorre o terceiro tempo, a ignição ou explosão, mostrado em (3).

No ciclo diesel, a combustão da mistura ar/combustível não necessita de centelha para ocorrer, diferentemente do que ocorre no ciclo Otto dos motores a gasolina. O pedal de aceleração num veículo a diesel controla a quantidade de combustível sendo injetado na câmara de combustão. O quarto tempo é caracterizado pela abertura das válvulas de exaustão e liberação dos gases produtos da combustão, caracterizando assim a exaustão, mostrada em (4).

Os motores de combustão interna em geral fornecem torque e potência diferentes dependendo da faixa de rotação a qual o veículo está operando. Em geral, o maior torque não ocorre na mesma rotação em que ocorre a potência máxima. Esta condição influencia a dinâmica do veículo e a sua forma de condução.

A Figura 2.4 mostra um exemplo de curva de potência, torque e consumo de combustível em funções das rotações para um motor de combustão interna a diesel com acelerador 100% atuado (Hoff e Gregory, 2003).

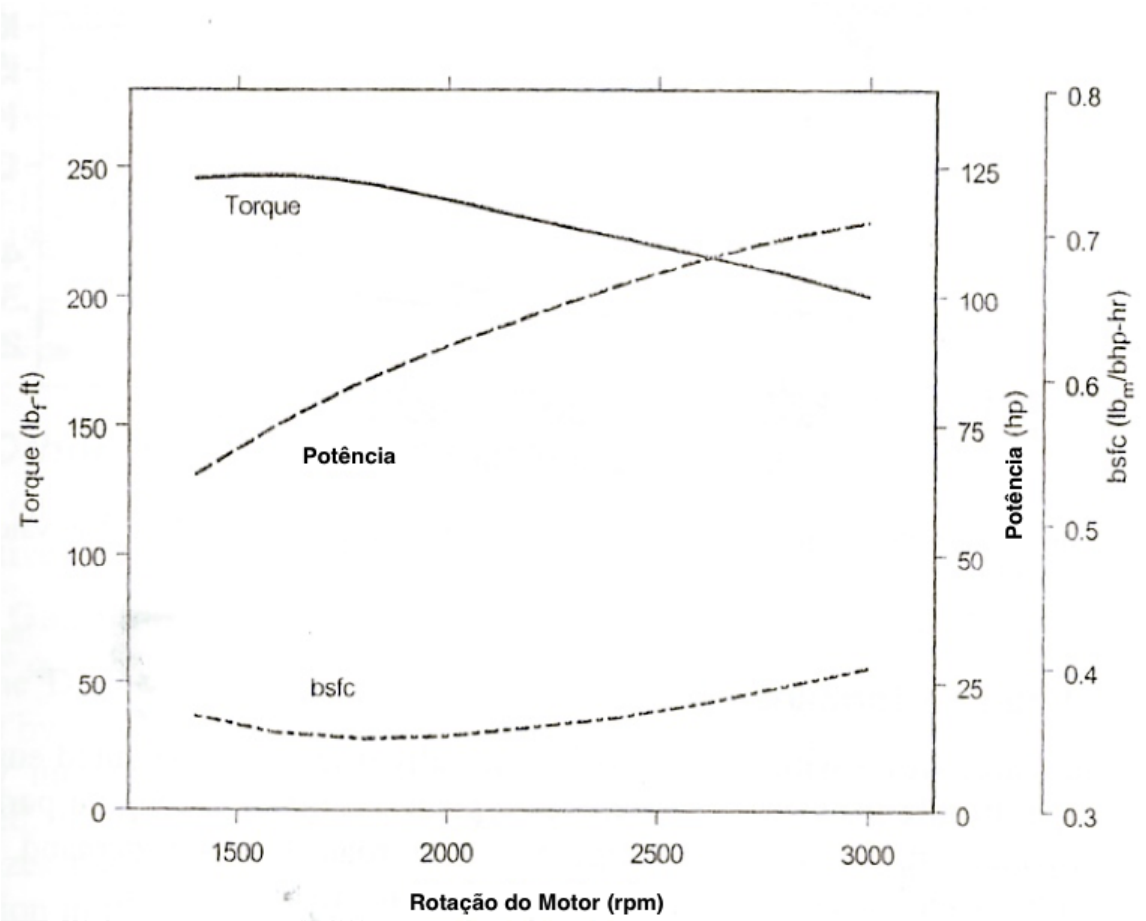

Figura 2.4: Exemplo de Curva de Potência e Torque (Hoff e Gregory, 2003)

Esta informação é fundamental na modelagem do problema para poder avaliar a quantidade de potência e torque disponíveis no veículo em determinado valor de rotação. A formulação de como é feita esta avaliação é detalhada no Capítulo 5 deste trabalho.

2.3.2 Transmissão

Com os componentes giratórios do motor movendo-se a rotações elevadas, o torque entregue na saída do motor nem sempre é suficiente para mover o veículo. Desta forma, o sistema de transmissão é responsável por elevar o torque e diminuir as rotações conforme a necessidade, através de um mecanismo de redução utilizando arranjos de engrenagens.

Diversos sistemas de transmissão estão disponíveis no mercado, desde sistemas manuais até sistemas automatizados. A utilização de transmissões de trocas manuais é mais comum nos ônibus de Brasília (Lopes, 2014), desta forma, considera-se neste trabalho o uso de transmissões manuais.

A configuração usual de um ônibus urbano é a utilização de motor e caixa de transmissão dianteiros com tração no eixo traseiro. A rotação proveniente do motor é transmitida à caixa de transmissão. A caixa de transmissão transmite a rotação para o eixo cardã, que é acoplado ao diferencial. Composto de um pinhão e uma coroa montadas no eixo traseiro, o diferencial transmite o movimento até as rodas do veículo. Sua relação de transmissão é resultado da divisão do número de dentes da coroa pelo número de dentes do pinhão (Araújo, 2012). A Figura 2.5 representa um veículo com motor dianteiro e tração traseira.

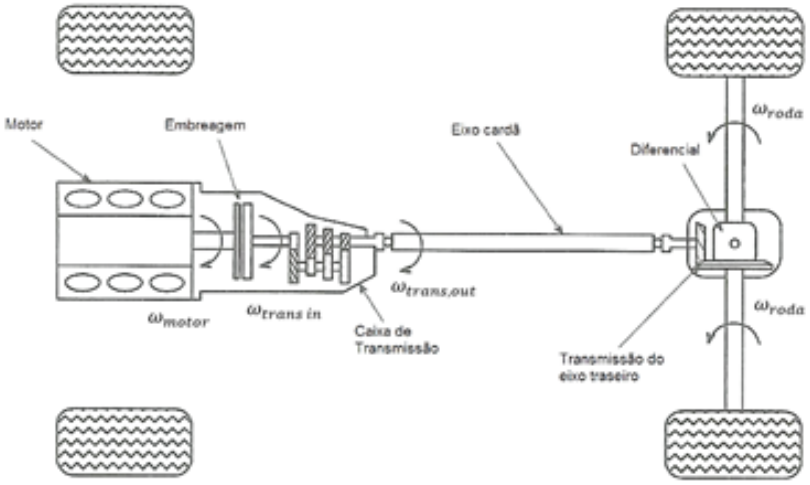

Figura 2.5: Esquema de veículo com motor dianteiro e tração traseira (Hoff e Gregory, 2003)

Em uma transmissão ideal assume-se que a potência de entrada no sistema de transmissão é exatamente idêntica à potência de saída. Desta forma, denotando-se o subscrito *in* para valores de entrada e *out* para valores de saída do sistema, tem-se:

$$P_{in} = P_{out} \tag{2.1}$$

A potência em um sistema rotativo é o produto do torque T aplicado pela velocidade angular ω:

$$T_{in}\omega_{in} = T_{out}\omega_{out} \tag{2.2}$$

Assim,

$$T_{out} = \frac{\omega_{in}}{\omega_{out}} T_{in} \tag{2.3}$$

À razão das velocidades angulares de entrada e saída do sistema dá-se o nome de razão de transmissão, denotada por R_t. Assim, reescrevendo a equação, tem-se

$$T_{out} = R_t T_{in} \tag{2.4}$$

O equacionamento para o sistema de transmissão de um ônibus de motor dianteiro, com transmissão dianteira e diferencial traseiro é mostrada a seguir. Os subscritos *motor*, *trans* e *roda* se referem respectivamente ao motor, à transmissão e às rodas do veículo.

Na caixa de transmissão, a rotação de entrada corresponde à rotação proveniente do motor e a rotação de saída é a própria rotação da transmissão. Assim:

$$R_t = \frac{\omega_{motor}}{\omega_{trans}} \tag{2.5}$$

As equações para a velocidade angular e torque na transmissão são:

$$\omega_{trans} = \frac{\omega_{motor}}{R_t} \tag{2.6}$$

$$T_{trans} = R_t T_{motor} \tag{2.7}$$

Analogamente, no diferencial a rotação de entrada corresponde à rotação proveniente da caixa de transmissão. A rotação de saída é a rotação das rodas. Assim:

$$R_a = \frac{\omega_{trans}}{\omega_{roda}} \tag{2.8}$$

$$\omega_{roda} = \frac{\omega_{trans}}{R_a} \tag{2.9}$$

$$T_{roda} = R_a T_{trans} \tag{2.10}$$

As equações para velocidade angular e torque nas rodas podem ser reescritas da seguinte forma:

$$\omega_{roda} = \frac{\omega_{motor}}{R_t R_a} \tag{2.11}$$

$$T_{roda} = R_t R_a T_{motor} \tag{2.12}$$

2.3.3 Rodas

As rodas do veículo são o componente final da transmissão de potência. São elas quem estão em contato com a superfície da pista e o seu movimento de rotação é quem garante a movimentação do veículo.

Como componente final da transmissão, as rodas do veículo em contato com o solo são uma fonte primária de resistência ao movimento de um veículo. Esta resistência é ocasionada pela deformalçao do pneu em contato com o solo (Gillespie, 1992). A Figura 2.6 ilustra a deformação sofrida pelo pneu em contato com o solo.

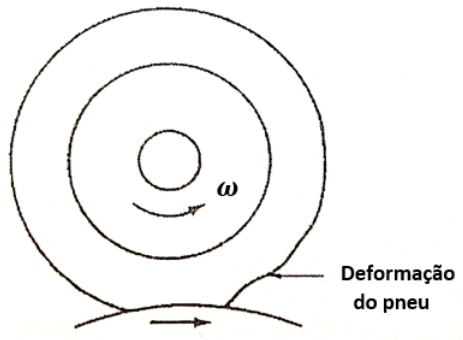

Figura 2.6: Deformação da roda de um veículo (Gillespie, 1992)

A cinemática de uma roda ideal pode ser descrita como o movimento de um cilindro rolando sem deslizar sobre uma superfície plana.

A Equação 2.13 demonstra a relação entre a velocidade angular da roda e a velocidade linear do centro de massa da roda, como sendo o produto da velocidade angular ω_{roda} pelo raio de roda r_r, medido do centro até a borda mais externa do pneu, como mostrado na Figura 2.13.

Este modelo é simplificado pois desconsidera as deformações sofridas pelo pneu. A inclusão dos efeitos de deformação dos pneus é feita através do coeficiente de resistência ao rolamento, que é descrito na Seção 2.8.

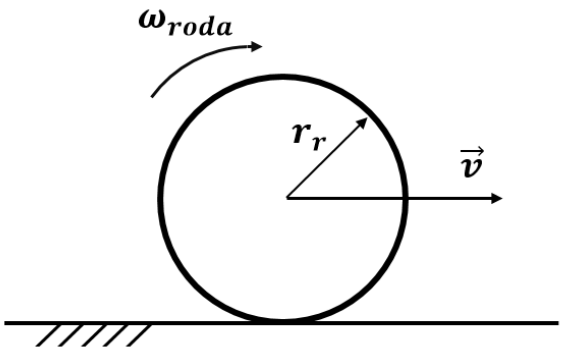

Figura 2.7: Roda de um veículo em rolamento sem deslizamento

$$v = \omega_{roda} r_r \tag{2.13}$$

As medidas dos raios de roda são padronizadas em relação aos tipos de pneus comercialmente disponíveis. Em ônibus urbanos é comum a utilização dos pneus apresentados na Tabela 2.1.

Tabela 2.1: Raios de Roda de Pneus Comerciais (Araújo, 2012)

Especificações do Pneu	**Raio de Roda r_r (m)**
205/75 R17.5	0.3692
215/75 R17.5	0.3756
225/75 R17.5	0.3852
275/80 R22.5	0.4962
295/80 R22.5	0.5109

Substituindo-se a relação cinemática para as rodas do veículo, tem-se:

$$v = \frac{\omega_{motor}}{R_t R_a} r_r \tag{2.14}$$

Rearranjando a Equação 2.14:

$$\frac{\omega_{motor}}{v} = \frac{R_a R_t}{r_r} = R_v \tag{2.15}$$

Define-se R_v como a razão entre as velocidades angular do motor e a velocidade de translação do veículo. Esta razão é convenientemente expressa em rpm/km/h, e a equação pode ser rearranjada de modo a expressar a rotação do motor em função da velocidade do veículo. Na equação v é expresso em km/h, r_r em mm e a rotação N em revoluções por minuto (rpm).

$$N = 2660 \frac{R_a R_t}{r_r} v \tag{2.16}$$

2.4 FORÇAS RESISTIVAS ATUANTES NO VEÍCULO

As forças resistivas atuantes no ônibus vão influir diretamente na quantidade de potência necessária para o cumprimento de um determinado trajeto. As forças resistivas são apresentadas no diagrama da Figura 2.8. As resistências experimentadas pelo ônibus durante o trajeto são três: a componente do peso próprio do veículo atuando na direção tangente ao plano de inclinação da pista; a força de rolagem imposta pela deformação dos pneus em contato com o solo e as forças de arrasto de natureza aerodinâmica.

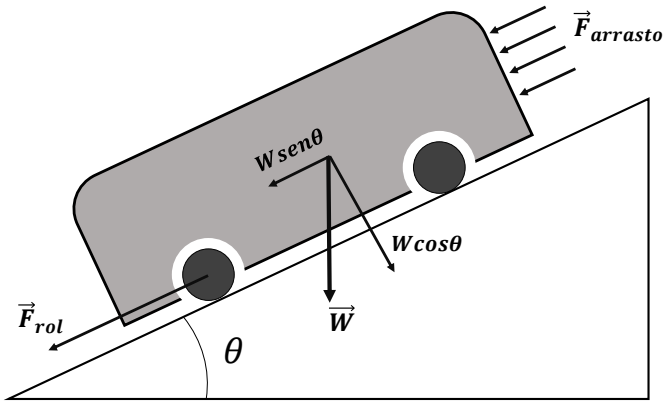

Figura 2.8: Diagrama das forças resistivas atuando no ônibus (Araújo, 2012) – modificado

A componente do peso próprio W é determinada pela inclinação da pista em um determinado trecho da rota a qual o ônibus percorre. Assim:

$$F_{peso} = W sen\theta = mgsen\theta \tag{2.17}$$

A força de resistência a rolagem tem sua origem na deformação dos pneus em contato com o solo. É função de vários fatores, dentre eles a rugosidade da superfície da pista, da temperatura, pressão dos pneus, material dos pneus e velocidade angular. Pode ser quantificada pelo produto do Coeficiente de Resistência à Rolagem C_{rol} pelo o peso do veículo (Araújo, 2012). Os valores típicos para o Coeficiente de Resistência à Rolagem são mostrados na Tabela 2.2.

$$F_{rol} = C_{rol} W = C_{rol} mg \tag{2.18}$$

Tabela 2.2: Coeficiêntes de Resistência à Rolagem (Hoff e Gregory, 2003)

Superfície da Pista	C_{rol}
Pista de asfalto, bem pavimentada	0.010
Pista de concreto, bem pavimentada	0.011
Pista regularmente pavimentada	0.015
Pista gasta	0.035
Pista de cascalho	0.020-0.025
Estrada de terra	0.045
Areia	0.150-0.300

A força de arrasto tem origem aerodinâmica, sendo resultado da interação entre o fluido – neste caso, o ar – e a geometria da carroceria do ônibus. É definida por:

$$F_{arrasto} = \frac{1}{2}\rho C_D A v^2 \tag{2.19}$$

onde ρ é a densidade do ar, em kg/m^3; C_D é o coeficiente de arrasto, uma grandeza adimensional; A é a área frontal do veículo, em m^2 e v é a velocidade desenvolvida pelo veículo, em m/s. Valores comuns para os coeficientes de arrasto são apresentados na Tabela 2.3. Para os tipos de veículos considerados neste trabalho, o valor da área frontal do veículo é $A = 8,3\ m^2$.

Tabela 2.3: Coeficientes de Arrasto C_D (Hoff e Gregory, 2003)

Modelo de Veículo	C_D		
	Baixo	Médio	Alto
Carro de Passageiro	0.25	0.31	0.39
Caminhões	0.25	0.40	0.57
Carros Conceituais	0.16	0.19	0.22

A força resistiva total que atua no veículo corresponde a soma das três forças consideradas:

$$F_{tot} = mgsen\theta + C_{rol}mg + \frac{1}{2}\rho C_D A v^2 \tag{2.20}$$

A potência gerada pelas forças de resistência atuantes no veículo em cada instante é tão somente o produto da forças resultante F_{tot} pela velocidade do veículo naquele instante.

O movimento do veículo ocorre quando a força atuando na roda F_{roda} é maior que a resultante das forças resistivas. Araújo (2012) considera a força na roda F_{roda}, em N, modelada em termos do torque do motor T, em Nm, das razões de transmissão R_t e R_a e do raio de roda r_r, em m, conforme mostrado na Equação 2.21.

$$F_{roda} = \frac{0.9TR_tR_a}{r_r} \tag{2.21}$$

A potência exigida pelo trajeto pode ser calculada a partir do produto da força na roda pela velocidade de translação do centro de massa desta. Isto é feito rearranjando-se a Equação 2.16 na Equação 2.21. Utilizando-se unidades convenientes, a potência exigida pelo trajeto P_{req}, em kW, é expressa em função das rotações N, em rpm, por:

$$P_{req} = \frac{2\pi T_{req}N}{60000} \tag{2.22}$$

2.5 POTÊNCIA ESPECÍFICA - VSP

Definido pela primeira vez no trabalho de Jimenez-Palacios (1998), a Potência Específica veicular - tradução livre de *Vehicle Specific Power* ou VSP - é a razão entre a potência instantânea desenvolvida por um veículo e a sua massa.

Na formulação do VSP considera-se a potência instantânea de tração gerada pelo motor como a potência necessária para vencer as forças de resistências de rolamento e de arrasto aerodinâmico citadas na Seção 2.8 e variar as energias cinética e potencial do veículo garantindo o movimento do veículo.

Sua formulação é baseada na soma da potência necessária para variar a energia cinética (E_c) e potencial (E_p) com a potência necessária para vencer as forças resistivas. O desenvolvimento é mostrado a seguir.

$$P = \frac{d}{dt}(E_c + E_p) + (F_{rol} + F_{arrasto})v \tag{2.23}$$

$$P = \frac{d}{dt}\left(\frac{1}{2}mv^2 + mgh\right) + \left(C_{rol}mg + \frac{1}{2}\rho C_D A v^2\right)v \tag{2.24}$$

$$VSP = \frac{P}{m} = v(a + gsen\theta + gC_{rol}) + \left(\frac{1}{2}\frac{\rho C_D A v^2}{m}\right)v \tag{2.25}$$

A equação do VSP pode ser reescrita com notação mais compacta da seguinte forma, conforme apresentado no trabalho de (ZHAI et al., 2008):

$$VSP = v(a + gsen\theta + \psi) + \zeta v^3 \tag{2.26}$$

onde:

θ é a inclinação da pista e corresponde a razão entre a altura vertical e a distância horizontal

percorrida no trajeto, a cada instante;

$\psi = gC_{rol}$ é o termo que quantifica a resistência à rolagem. Dado que C_{rol} é adimensional, este termo tem unidades de aceleração (m/s^2);

$\zeta = \frac{1}{2}\frac{\rho C_D A v^2}{m}$ é o termo que quantifica a resistência às forças de arrasto de origem aerodinâmica, sua unidade é o inverso do comprimento (1/m).

A unidade da Potência Especifica é potência por unidade de massa, ou seja, W/kg ou kW/-ton. Também corresponde a m^2/s^3, que é exatamente o produto de velocidade pela aceleração.

As conclusões apresentadas no trabalho de Jimenez-Palacios (1998) constataram que a Potência Específica é diretamente mensurável em condições reais de operação de um veículo e nenhuma variável a mais é necessária para se obter bons resultados para as emissões de poluentes.

Por não considerar na sua formulação variáveis como consumo instantâneo de combustível, perdas por atrito no motor, eficiência dos elementos de transmissão, a principal contribuição do VSP para este trabalho é servir como a principal variável do carregamento imposto ao veículo durante o trajeto na modelagem de emissões de poluentes.

2.6 EMISSÕES DE POLUENTES

A preocupação com os problemas ambientais decorrentes das altas concentrações de poluentes na atmosfera tornou-se mais evidente à partir da segunda metade do século XX. As primeiras regulações de emissão de poluentes nos Estados Unidos começaram a surgir na década de 1970. Em 1990, com o *Clean Air Act Amendment*, foram estabelecidos limites para concentrações de seis poluentes em todo o território americano. Estes poluentes são: ozônio, dióxido de enxofre , monóxido de carbono, dióxido de nitrogênio, chumbo e material particulado (Cappiello, 2002).

Para a emissão proveniente de automóveis, a EPA primeiramente estabeleceu os padrões de emissão para os veículos de passeio, de acordo com a quilometragem e idade destes veículos. Posteriormente, foram estabelecidos padrões de emissão para veículos de trabalho pesado, como por exemplo ônibus e caminhões de grande porte. Os principais poluentes considerados são o monóxido de carbono, hidrocarbonetos, óxidos de nitrogênio e matéria particulada.

2.6.1 Descrição dos Poluentes

Os quatro poluentes considerados nas emissões feitas por veículos a diesel são:

Monóxido de Carbono - (CO) : O monóxido de carbono é um subproduto de uma reação incompleta de combustão, que ocorre quando a disponibilidade de gás oxigênio O_2 é insuficiente para a realização da combustão completa. Este tipo de reação costuma ocorrer em motores de automóveis quando a mistura de ar e combustível é enriquecida, normalmente em situações onde a potência demandada pelo veículo é mais alta. É altamente tóxico e o alto nível de concentrações deste poluente pode agravar riscos de doenças cardiovasculares.

Hidrocarbonetos - (HC): Semelhantemente ao monóxido de carbono, os hidrocarbonetos emitidos pelos veículos são resultados de combustão incompleta e/ou evaporação do combustível. Em desacelerações, por exemplo, a combustão dentro do motor é cessada e o pouco de combustível restante ali dentro é emitido sem que ocorra a queima. Contribui na formação do chamado *smog*, e a presença de hidrocarbonetos aromáticos como o benzeno os tornam cancerígenos.

Óxidos de Nitrogênio - (NO): São gases altamente reativos formados na combustão a alta pressão e temperatura, resultantes da recombinação de gás nitrogênio e gás oxigênio atmosférico. A mistura pobre tende a formar NOx devido ao excesso de oxigênio. Em misturas estequiométricas, a emissão de NO pode ser considerada proporcional ao consumo de combustível. Também contribui para a formação do *smog*.

Material Particulado - (PM): Dá-se o nome de material particulado para todas as partículas suspensas no ar atmosférico, como poeira, fumaça, gotículas de líquidos. São classificadas de acordo com o seu diâmetro aerodinâmico, que tende a ser na ordem de mícrons. A inalação deste material particulado pode induzir problemas respiratórios.

2.6.2 Regulação Ambiental

A regulação brasileira de emissões de poluentes é feita pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA. A regulação vigente na data deste relatório foi definida pela Resolução 403 de novembro de 2008.

Esta Resolução estabelece novos limites máximos de emissões de poluentes para motores de combustão interna que operam no ciclo Diesel destinados a veículos pesados novos, sejam eles nacionais ou importados. Esta nova regulação, vigente em território nacional desde janeiro de 2012, compreende à fase P7 do Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores - Proconve (CONAMA, 2008).

Os limites de emissão de poluentes de acordo com a regulamentação do CONAMA são mostrados na Tabela 2.4.

Tabela 2.4: Limites de Emissões Proconve P7 (CONAMA, 2008)

HC	CO	NO
0.46 g/kWh	1.5 g/kWh	2,00 g/kWh

2.7 ESTUDO PRÉVIOS EM EMISSÕES DE POLUENTES

Em 2002, a EPA desenvolveu o *On-Road Emissions Testing of 18 Tier 1 Passenger Cars and 17 Diesel-Powered Public Transport Busses*, que consiste em uma série de ensaios experimentais feitos com automóveis e ônibus urbanos diversos (Ensfield, 2002). Este estudo teve como objetivo o desenvolvimento e avaliação de um modelo de emissões modais à partir do levantamento de dados experimentais acerca de emissões de poluentes.

2.7.1 Os Testes

Os testes da EPA foram realizados no final de 2001 em parceria com a *Ann Arbor Transit Authority* (AATA), empresa que forneceu os ônibus para testes. A metodologia dos testes consistiu em circular diversos ônibus em rotas urbanas, simulando pontos de parada para embarque de passageiros, conforme dados a respeito da velocidade, aceleração, consumo de combustível e emissões de poluentes eram adquiridos em tempo real (Ensfield, 2002).

Embarcados nos veículos, diversos equipamentos eram responsáveis pela aquisição de dados, que incluíam medições instantâneas de velocidade, aceleração, inclinação da pista, torque, emissões de poluentes e coordenadas do veículo via GPS durante o trajeto.

Os testes foram feitos em parceria com a Sensors Inc., empresa fabricante dos equipamentos portáteis para testes de emissões (Ensfield, 2002). O principal equipamento utilizado nos testes da EPA foram os da linha SEMTECH-D, especializados em testes para veículos a diesel. O SEMTECH-D utilizado no estudo da EPA era capaz de medir emissões vindas diretamente do motor e guardar estas informações. No seu módulo de pós-processamento, computava emissões de CO, NO e HC em tempo real.

Em 2001 quando foram realizados os testes, o SEMTECH-D era um protótipo. Atualmente, é possível encontrar no site do fabricante diversos equipamentos mais sofisticados para análise de emissões. A Figura 2.9 apresenta o modelo utilizado nos testes realizados na elaboração do seu estudo.

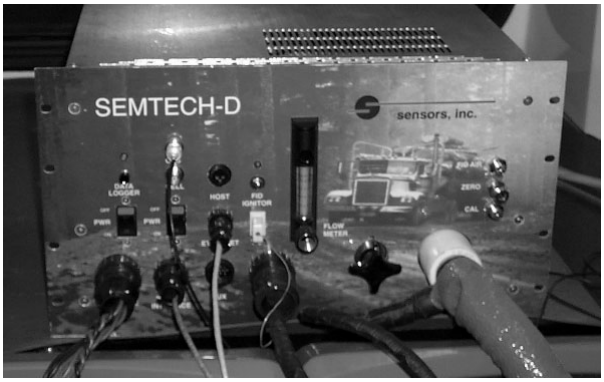

Figura 2.9: Equipamento SEMTECH-D utilizado nos testes da EPA (Einsfield, 2002)

2.7.2 Emissões Modais

Zhai et al. (2008) utilizou a base de dados da EPA (Ensfield, 2002) para verificar a correlação de todas as variávies medidas durante o trajeto com os resultados das emissões de poluentes.

Diversos trajetos ensaiados foram discretizados em segmentos menores. As diferentes formas de condução do veículo foram organizadas de acordo com as velocidades atingidas durante o percurso. Assim, sabendo as taxas de emissões medidas nestes segmentos, foi possível estimar valores médios de emissões de poluentes para cada um destes pequenos trechos.

Zhai et al. (2008) verificou a existência de associações entre as variaveis medidas experimentalmente e as emissões de poluentes para cada ônibus.

Seus resultados verificam forte correlação entre as emissões de poluentes e variáveis como velocidade, aceleração e inclinação da pista, que compõem a potência específica. Desta forma, a Figura 2.10 mostra a relação que se estabelece entre a potência específica e as taxas de emissões de poluentes.

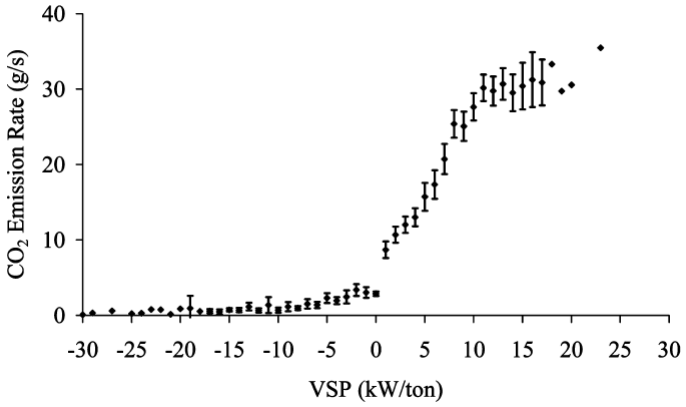

Figura 2.10: Taxas de Emissões de CO_2 em função da potência específica - (Zhai et al, 2008)

Percebe-se uma relação praticamente linear de dependência entre emissões de poluentes e potência específica. Situações onde o veículo desenvolve mais potência naturalmente estarão associadas a um maior gasto de combustível e consequentemente a uma maior taxa de emissões.

Frey et al. (2007) sugere em seu estudo uma maneira de agrupar diversos trechos das rotas que fornecessem valores de potência específica e emissões parecidos entre si. A cada agrupamento foi dado o nome de modo. O agrupamento em modos de condução já se mostrava presente em trabalhos anteriores (Frey et al., 2002), porém a forma com que se agrupa os modos pode variar.

O agrupamento pode ser feito por faixas de potência específica, conforme verificado no trabalho de Frey et al. (2007). Um resumo de como os modos são agrupados entre si é mostrado na Tabela 2.5.

Tabela 2.5: Distribuição Modal por Faixa de Potência (Frey et al., 2007)

Modo	Faixa de Potência Específica (m^2/s^3)
1	$VSP < 0$
2	$0 < VSP < 2$
3	$2 \leq VSP < 4$
4	$4 \leq VSP < 6$
5	$6 \leq VSP < 8$
6	$8 \leq VSP < 10$
7	$10 \leq VSP < 12$
8	$VSP \geq 13$

O agrupamento ainda pode ser feito de acordo com o modo de condução. Pode-se definir quatro modos distintos: veículo parado, velocidade de cruzeiro, desaceleração e aceleração. Assim, pode-se definir novos modos para a análise de emissões de acordo com as condições da Tabela 2.6.

Tabela 2.6: Distribuição Modal por Modo de Condução - (Frey et al., 2002)

Modo		Condição
1	Veículo Parado	$v = 0$ e $a = 0$
2	Velocidade de Cruzeiro	$v \neq 0$ e $a \leq 0.05$ m/s^2
3	Desaceleração	$v \neq 0$ e $a < 0$
4	Aceleração	$v \neq 0$ e $a > 0$

A forma com que se escolhe agrupar os modos não se faz tão rígida. O agrupamento é feito da maneira mais conveniente, seja para comparar resultados com os realizados previamente ou expressá-los de maneira mais intuitiva.

2.8 MODELO DE EMISSÕES DE POLUENTES

Na segunda metade dos anos 1990 na Universidade da California-Riverside foi desenvolvido o CMEM - *Comprehensive Modal Emissions Model*, um software computacional cujo principal objetivo é modelar emissões modais de poluentes produzidas por veículos leves, de acordo com a condição de operação destes veículos (Scora e Barth, 2006).

Foi concebido com o intuito de ser um modelo que considerasse um nível modal de operação do veículo, de forma a associar as emissões a cada modo de operação do veículo (Barth et al., Barth et al. (2004)). São exemplos de modos de operação do veículo as situações em que o ônibus está parado, em aceleração, em velocidade de cruzeiro e em desaceleração.

Inicialmente desenvolvido para veículos leves, como carros de passeio e caminhonetes leves, a inclusão de veículos a diesel como ônibus e caminhões foi feita ao longo dos anos 2000. A

formulação para veículos a diesel é apresentada em Barth et al. (2004).

O CMEM utiliza uma modelagem física analítica para o cálculo da demanda de potência dependente dos parâmetros específicos de cada veículo. Estes parâmetros são o número de marchas, razões de transmissão, rotação e cilindrada do motor, por exemplo. Entretanto, na previsão das emissões é necessário uma análise das emissões reais de poluentes coletadas experimentalmente.

Desta forma, para compor a base de dados do software, foram testados mais de 350 veículos diferentes em testes de dinamômetro, com medições de emissões realizadas a todo instante. Este modelo é capaz de prever as emissões de poluentes para uma grande variedade de veículos sob diversas condições distintas (Barth et al., 2000).

2.8.1 Estrutura do Modelo

A estrutura básica do CMEM é apresentada na Figura 2.11. O modelo é composto por seis módulos distintos sendo eles: o cálculo da potência, a rotação do motor, a taxa de consumo de combustível, a unidade de controle do motor (ECU), as emissões do motor e o tratamento pós exaustão.

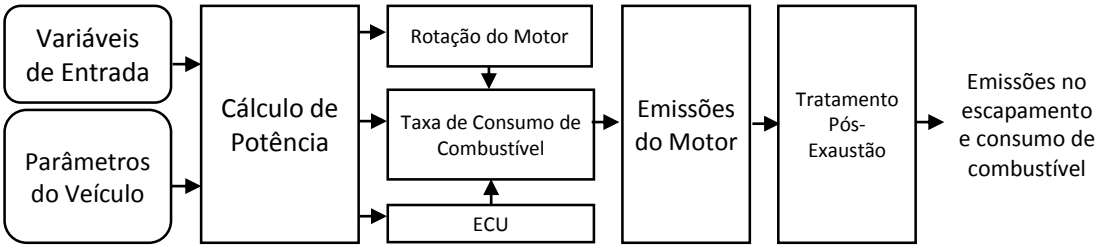

Figura 2.11: Diagrama de Blocos da estrutura lógica do CMEM

O modelo requer dois grupos de informações como inputs: as variáveis de entrada e os parâmetros do veículo. O módulo de potência é determinado a partir destes dois inputs. São variáveis de entrada a velocidade do veículo, a aceleração e o perfil topográfico durante o trajeto, além da qualidade da superfície da pista. Entende-se por parâmetros do veículo seu peso, cilindrada, relação na caixa de redução, curvas de potência e torque, as perdas ocasionadas por atrito dentro do motor, a geometria da carroceria e o tamanho dos pneus.

A estrutura mais importante é o módulo Taxa de Consumo de Combustível, que é função da potência, da rotação do motor e de parâmetros adicionais, como por exemplo as razões de redução na caixa de câmbio. Os módulos são descritos a seguir.

2.8.2 Cálculo da Potência

A forma de calcular a potência é definida no manual do usuário do CMEM como:

$$P = \left[m(a + gsen\theta + gC_{rol}cos\theta) + \left(\frac{1}{2}\rho C_D A v^2 \right) \right] v \tag{2.27}$$

Percebe-se que variáveis na Equação 2.27 são as mesmas apresentadas na Seção 2.5. De fato, trata-se da Equação 2.26 multiplicada pela massa do veículo.

Conforme definido por Jimenez-Palacios (1998), a variável Potência Específica pode ser aplicada como principal variável relativa ao carregamento do veículo estudado – verifica-se aqui um exemplo prático da aplicação da variável.

2.8.3 Rotação do Motor

A rotação do motor é calculada por:

$$N = 2660 \frac{R_a R_t}{r_r} v(t) \tag{2.28}$$

A razão de transmissão R_t pode variar, sendo selecionada dentro de valores de razão de redução previamente determinados, conforme a demanda por torque durante o trajeto. A variação da razão de transmissão corresponde às trocas de marcha experimentadas pelo veículo durante a viagem.

2.8.4 Taxa de Consumo de Combustível

O consumo de combustível é função da potência do veículo, da eficiência e das perdas por atrito que ocorrem no motor. O consumo de combustível em gramas por segundo é quantificado pelo conjunto de equações a seguir:

$$FR_{CMEM} = \frac{1}{LHV} \left[KNV_D + \frac{P}{\eta} \right] \left[1 + b_i (N - N_0)^2 \right] \tag{2.29}$$

$$K = K_0 \left[1 + C(N - N_0) \right] \tag{2.30}$$

$$N_0 = 30 \sqrt{\frac{3}{V_D}} \tag{2.31}$$

onde:

- LHV é o Lower Heating Value do combustível em kJ/g. Um valor médio para este parâmetro é $LHV = 43.2$ kJ/g.
- K é o coeficiente de atrito do motor, em kPa. É função de um coeficiente K_0, como representado na Equação 2.30;

- P é a a potência do veículo, em kW;
- η é a eficiência do motor, adimensional;
- V_D é a cilindrada do motor, em litros;
- N é a rotação do motor, em rotações por segundo.
- C = 0.00125 e b_i = 10^{-4} são coeficientes constantes e adimensionais.

2.8.5 Taxa de Emissões de Poluentes

A partir da grande coleta de dados experimentais das emissões dos veículos realizada na elaboração do CMEM, foi verificado a existência de correlações lineares entre o consumo de combustível e as emissões de poluentes.

As taxas de emissões de poluentes são modeladas como funções de primeiro grau da taxa de consumo de combustível. A taxa de emissão de monóxido de carbono, em g/s, é modelada como:

$$ECO = a_{CO}FR + r_{CO} \tag{2.32}$$

onde FR é o consumo de combustível em g/s, a_{CO} e r_{CO} são as constantes obtidas nas regressões lineares. Analogamente, as taxas de emissões de hidrocarbonetos e óxido de nitrogênio são descritos por:

$$EHC = a_{HC}FR + r_{HC} \tag{2.33}$$

$$ENO = a_{NO}FR + r_{NO} \tag{2.34}$$

onde r_{HC}, a_{HC}, r_{NO} e a_{NO} são as constantes obtidas nas regressões lineares.

A Figura 3.12 exemplifica os resultados experimentais obtidos para as emissões de um veículo a diesel - um Ford F-250 1986 e sua respectiva regressão linear.

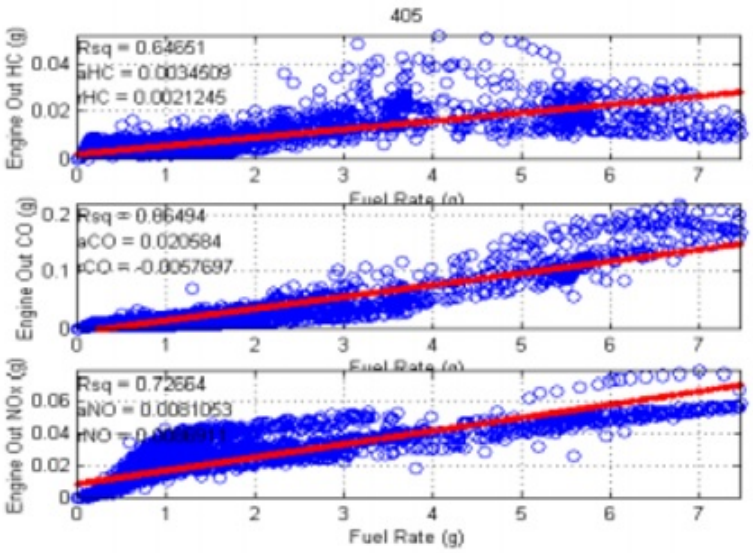

Figura 2.12: Resultados experimentais de emissões de poluentes do Ford F-250 (Barth et al., 2000)

2.8.6 Tratamento de Pós-Exaustão

O último módulo de análise do CMEM é o Tratamento pós-exaustão – no inglês: *Exhaust-After Treatment* – é frequentemente implementado em veículos leves movidos a gasolina. É caracterizado por possuir equações complexas em função da mistura ar-combustível. Nos veículos a diesel, este último módulo é desconsiderado por duas razões: a natureza dos motores a diesel dispensa a dependência na qualidade da mistura e a ausência de veículos a diesel que tenham sido testados com algum tipo de tratamento pós exaustão (Barth et al., 2004).

3 PROPOSTA PARA MODELAGEM DE EMISSÕES

Estudos anteriores acerca das emissões de poluentes ocasionadas por veículos urbanos verificaram forte correlação entre o consumo, emissões de poluentes e a potência demandada pelo veículo (Zhai et al., 2008, Barth et al., 2004). No final dos anos 1990, foi desenvolvido na Universidade da Califórnia, Riverside o CMEM – *Comprehensive Modal Emission Model*, um software capaz de prever as emissões de poluentes através de uma análise feita segundo por segundo para praticamente todos os tipos de veículos leves, como por exemplo veículos de passeio. A capacidade do modelo foi então estendida para veículos pesados, como por exemplo ônibus e caminhões movidos a diesel (Barth et al., 2004).

Na impossibilidade de se utilizar o software propriamente dito, adaptou-se a estrutura lógica do CMEM para modelagem das emissões à realidade existente nos ônibus urbanos que trafegam na cidade de Brasília - DF e também às limitações encontradas neste Trabalho de Graduação: o tempo limitado e a pouca verba disponível para a aquisição de equipamentos necessários para a realização de medições próprias.

O objetivo deste Capítulo é desenvolver um modelo capaz de estimar as emissões de poluentes e o consumo de combustível de um determinado ônibus em uma determinada rota. Assim, pode-se implementar uma estratégia de otimização dos parâmetros do veículo a fim de adequá-lo às especificidades desta rota em particular.

3.1 ESTRUTURA DA METODOLOGIA PROPOSTA

Buscando desenvolver uma metodologia de análise a partir da estrutura utilizada pelo CMEM, são feitas algumas considerações de modo a adequá-la a realidade deste Projeto de Graduação.

A Figura 3.1 apresenta o diagrama de blocos do modelo desenvolvido neste Projeto. Como não são feitos quaisquer levantamentos experimentais, elimina-se o módulo de Unidade de Controle do Motor (ECU), mostrado no diagrama de blocos do CMEM na Figura 2.11.

Considera-se também que não há qualquer tipo de Tratamento Pós-Exaustão. Segundo Barth et al. (2004), não há disponibilidade de dados de veículos pesados movidos a diesel com dispositivos de tratamentos do tipo pós-exaustão que tenham sido testados. Desta forma, pode-se considerar as emissões no escapamento como numericamente iguais às emissões do motor.

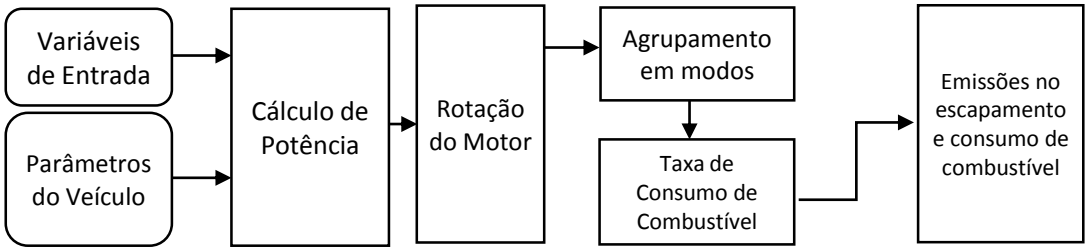

Figura 3.1: Diagrama de Blocos da Metodologia Proposta

Assim como na metodologia utilizada pelo CMEM, os *inputs* são as Variáveis de Entrada e os Parâmetros do Veículo. As variáveis de entrada são as condições as quais o veículo estará sujeito durante o seu trajeto. Por exemplo, a curva de velocidades a ser desenvolvida pelo veículo durante o trajeto, as condições da acabamento superficial da pista e as diferenças de elevação da rota a ser simulada. As características do veículo são os aspectos constitutivos do veículo, como massa, potência máxima, número de marchas, relações de redução na caixa de transmissão, tamanho do motor, etc.

A partir destes inputs, o próximo passo é o cálculo de potência ao longo do trajeto e da rotação do motor. De posse destes dois valores, consegue-se calcular o consumo de combustível e por fim obter uma estimativa da emissão de poluentes.

3.2 CÁLCULO DE POTÊNCIA

Nesta metodologia, busca-se obter informações a respeito da potência do veículo em cada instante do trajeto. Assim, define-se um intervalo incremental de tempo a partir do qual a potência é calculada a cada passo deste intervalo. Dessa forma, para um intervalo de tempo suficientemente pequeno, têm-se uma aproximação bastante razoável, porém discretizada, da potência do veículo em função do tempo.

A potência é determinada pelo cálculo do VSP a cada instante do trajeto percorrido pelo ônibus. Durante o trajeto, a velocidade, a aceleração e a inclinação da pista são variáveis com o tempo. Desta forma, reescreve-se a Equação 2.26 definida na Seção 2.5 deste trabalho da seguinte forma:

$$VSP(t_i) = v(t_i)(a(t_i) + gsen\theta(t_i) + \psi) + \zeta v(t_i)^3 \tag{3.1}$$

As funções velocidade, aceleração e inclinação ao longo do tempo são apresentadas nas subseções a seguir. Com o cálculo da potência sendo feito a cada instante de tempo, ao final do método podem ser avaliados os valores de consumo de combustível e emissões de poluentes para cada instante observado.

3.2.1 Curva de Velocidades

As curvas de velocidades são gráficos de velocidade pelo tempo padronizadas, que buscam reproduzir condições reais de trânsito de veículos. A EPA padroniza estes perfis desde os anos 1970 quando as medições de emissões começaram a ser realizadas nos Estados Unidos (Cappiello, 2002).

Em condições reais de operação, a curva de velocidades pode ser obtida através de sistemas de medição remotos, como por exemplo o GPS. No estudo realizado pela EPA em 2002, foram testados 14 ônibus em diversas rotas reais em parceria com a AATA – Ann Arbor Transit Authority, que forneceu os veículos para teste (Ensfield, 2002). Um exemplo de curva de velocidade obtida durante estes testes é mostrado na Figura 5.2.

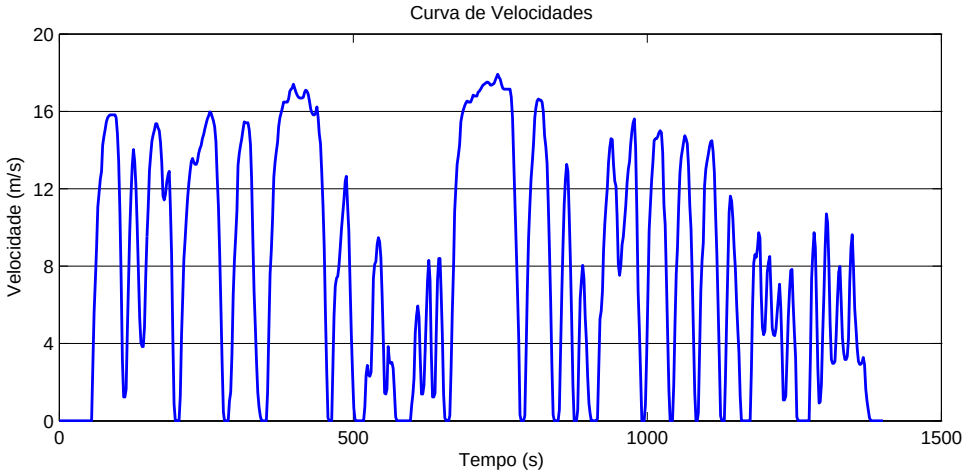

Figura 3.2: Curva de Velocidade em uma rota urbana - (EPA)

Como não foi possível encontrar os valores tabelados das medições realizadas pela EPA para elaboração da curva mostrada, a solução encontrada foi utilizar o *WebPlotDigitalizer*, uma ferramenta on-line de captura de imagens e localização de pontos cartesianos. As coordenadas destes pontos foram posteriormente inseridas em uma rotina em MATLAB onde foram eliminados quaisquer distorções geradas pela captura.

Conhecendo-se os valores de velocidades entre dois instantes de tempo consecutivos, é possível determinar a aceleração a cada instante do trajeto devido a relação diferencial que se estabelece entre velocidade e aceleração, conforme a Equação 3.2:

$$a(t_i) = \frac{v(t_{i+1}) - v(t_i)}{t_{i+1} - t_i} \tag{3.2}$$

onde $a(t_i)$ é a aceleração no i-ésimo instante, $v(t_i)$ é a velocidade no i-ésimo instante, $v(t_{i+1})$ é a velocidade após o i-ésimo instante e t_{i+1} e t_i são dois instantes de tempo consecutivos.

O método utilizado para captura dos valores a partir da curva fornecida pela EPA não está

livre de erros durante a medida. Nos pontos onde se formam vértices foram necessárias aproximações de modo a evitar cálculos da aceleração nestes instantes que resultariam em números muito altos e fisicamente irreais.

Os valores de velocidade e aceleração em função do tempo são organizados em um arquivo externo, contendo um vetor com duas colunas. Uma rotina no MATLAB carrega esta informação para proceder com a análise de poluentes. A rotina é mostrada no Anexo deste relatório.

3.2.2 Inclinação do Percurso

A definição da Potência Especifica leva em consideração os efeitos do trajeto. Estes efeitos são quantificados pela inclinação da pista, ou *road grade*, que são variáveis ao longo de todo trajeto. A variação deste parâmetro varia a condição de carregamento a qual o veículo está submetido e influi diretamente na potência a ser exigida do motor.

A Figura 3.3 apresenta um veículo esquemático percorrendo um trecho inclinado.

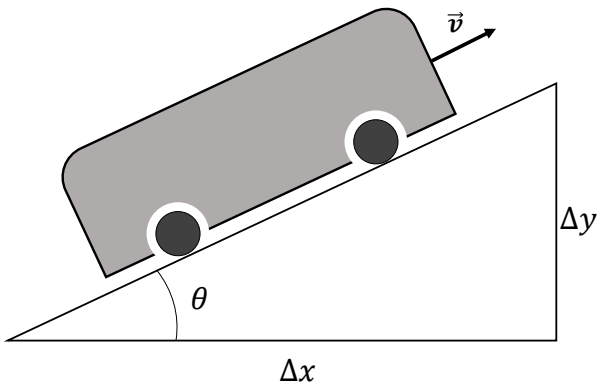

Figura 3.3: Exemplo de Perfil Topográfico de uma Rota

Se x denota a distância horizontal de determinada rota e y caracteriza as elevações do terreno nesta rota, a inclinação da pista é caracterizado pela razão entre a diferença de elevação Δy pela distância horizontal Δx percorrida neste trecho do trajeto. Assim, pode-se escrever o valor da inclinação da pista θ como:

$$\theta = \arctan \frac{\Delta y}{\Delta x} \tag{3.3}$$

Uma vez que o deslocamento horizontal é parametrizado como uma função temporal e o deslocamento vertical é parametrizado pelo deslocamento horizontal, pode-se reescrever a equação para a inclinação da pista como uma função temporal:

$$\theta(t_i) = \arctan \frac{\Delta y(t_i)}{\Delta x(t_i)} \tag{3.4}$$

A topografia das rotas testadas pela EPA, utilizadas para verificação desta metodologia, não foi disponibilizada de modo que fosse possível reproduzir os mesmos cálculos. Desta forma, os valores de inclinação utilizados foram dados relativos a uma rota existente do Distrito Federal, obtidos em trabalhos anteriores (Lopes, 2014).

A rota considerada é mostrada na Figura 3.4. O perfil topográfico da linha, mostrado na Figura 3.5, permitiu o cálculo das inclinações do trajeto por meio de aproximações por triângulos retângulos. Os valores das inclinações da rota são mostrados na Tabela 3.1.

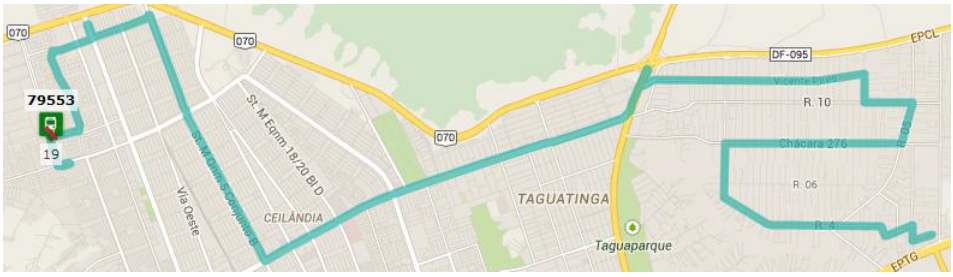

Figura 3.4: Rota de Ônibus Considerada (Lopes, 2014)

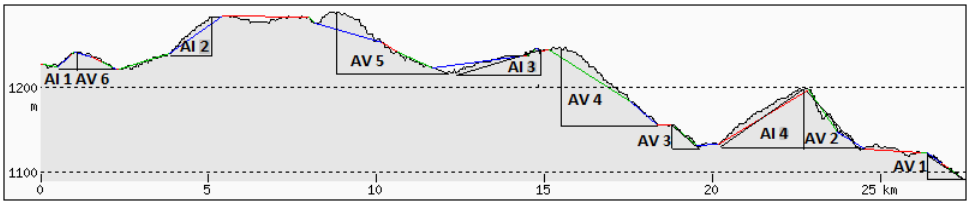

Figura 3.5: Elevações e Inclinações da Rota (Lopes, 2014)

Tabela 3.1: Inclinações da rota considerada (Lopes, 2014)

Trecho	Percurso (m)	Elevação (m)	(m/m)
AI 1	537	21.42	0.040
A1 2	1253	50	0.040
AI 3	2506	35.7	0.014
AI 4	2506	71.4	0.028
AV 1	1074	-28.56	-0.027
AV 2	1611	-71.4	-0.044
AV 3	716	-28.56	-0.040
AV 4	2864	-98.82	-0.032
AV 5	3222	-70.14	-0.022
AV 6	895	-21.42	-0.024

3.2.3 Termos de resistência

Na ausência de informações a respeito da geometria do ônibus ou qualidade da pavimentação das rotas testadas pela EPA em parceria com a AATA, foram utilizados os seguintes termos de resistência à rolagem ψ e de arrasto aerodinâmico ζ considerados por Zhai et al. (2008).

$$\psi = gC_{rol} = 0,092 \text{ m/s}^2$$
$$\zeta = \frac{1}{2}\frac{\rho C_D A v^2}{m} = 0,00021 \text{ m}^{-1}$$

3.2.4 Distribuição Temporal de Potência Específica

Utilizando-se os valores determinados nas seções anteriores e o código desenvolvido em MATLAB obteve-se a distribuição temporal da potência específica, que é mostrada na Figura 3.6. Nesta mesma figura, também são mostradas as contribuições da potência resistiva gerada pelas forças arrasto e de resistência ao rolamento.

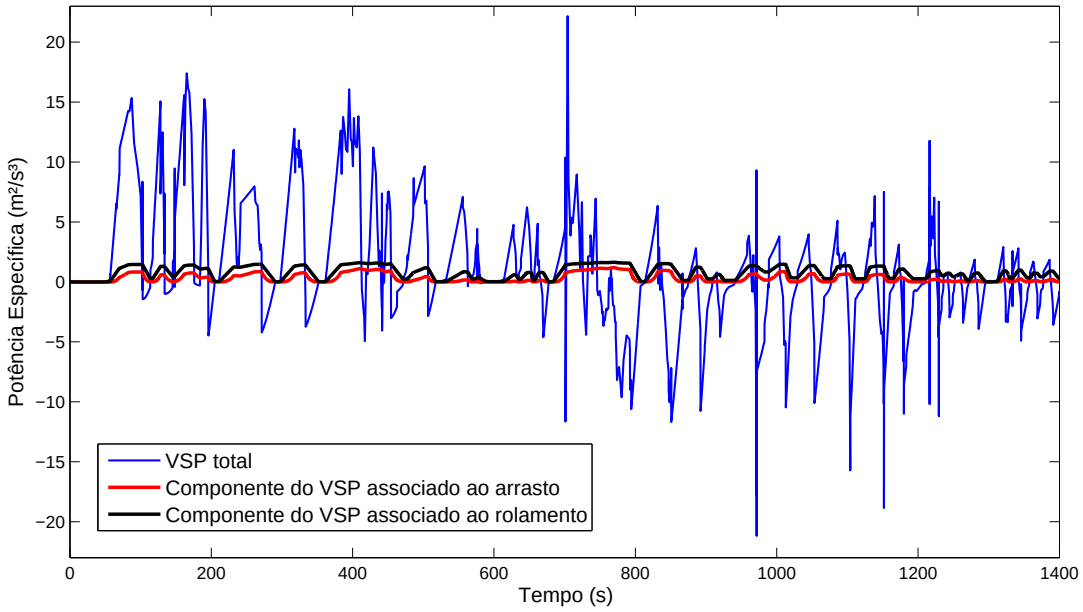

Figura 3.6: Distribuição Temporal de Potência Específica

Na Figura 3.6 verificam-se valores de potência específica negativos. A interpretação física é que, nesta situação, não há potência requerida para vencer a resistência da rota. O veículo pode estar trafegando num declive e assim a componente do peso estar favorável ao movimento deste, ou então experimentando acelerações negativas.

Potências negativas seriam erroneamente interpretadas no cálculo do consumo de combustível. Programa-se a rotina MATLAB para, nos casos de potência específica negativa, considerar que a potência utilizada pelo veículo é de 1 W (Colherinhas e Dias, 2014), necessária apenas para vencer os atritos internos.

3.3 AGRUPAMENTO EM MODOS

Após efetuar os cálculos da potência específica ao longo do trajeto, é conveniente agrupar estes valores em distribuições modais, de forma que as propriedades que são fortemente correlacionadas com o VSP, como o consumo de combustível e a emissão de poluentes, possam ser estimadas a partir de valores médios.

A caracterização de um modo deve respeitar duas condições: a primeira, de que cada modo deve produzir uma taxa de consumo médio de combustível estatisticamente diferente de qualquer outro modo; e a segunda, de que nenhum modo deve dominar a estimativa total de consumo de combustível (Zhai et al., 2008). Os modos são caracterizados de acordo com as faixas de potência definidas por Frey et al. (2007), conforme explicado na Seção 2.7.2 do Capítulo 2.

3.4 ESTIMATIVA DO CONSUMO DE COMBUSTÍVEL

O objetivo principal desta seção é descrever o método utilizado para cálculo do consumo médio de combustível a partir da distribuição modal do VSP. Devem ser determinados a rotação do motor e o fluxo de combustível sendo consumido para suprir a demanda de potência. Os procedimentos utilizados para cálculo dessas variáveis de entrada do modelo são explicitados a seguir.

3.4.1 Caracterísitcas do Veículo

O veículo considerado é o mesmo utilizado pelos testes realizados pela EPA em 2002. Estes ônibus foram fornecidos para testes pela Ann Arbor Transit Authority (AATA). Neste trabalho, mediu-se as emissões de ônibus modelo New Flyer 1996 equipados com motores Detroit Diesel Series 50. No momento da realização das medições, eram veículos com cerca de 6 anos de uso. Este motor possui 8,5 litros de cilindrada e peso total de 12 toneladas.

Como a abordagem utilizada pela EPA consistiu em medir diretamente as emissões a partir das concentrações dos gases do escapamento, nenhum dado relativo a qualquer componente constitutivo do veículo for informado nestes relatórios. Assim, algumas suposições baseadas em valores médios serão feitas conforme necessidade.

3.4.2 Cálculo da rotação do Motor

O cálculo da rotação em rpm é feito conforme a Equação 2.28 apresentada na seção 2.8.3.

$$N(t_i) = 2660\frac{R_a R_t}{r_r} v(t_i) \tag{3.5}$$

cnde R_a é a relação de redução do diferencial, R_t é a relação de redução da transmissão, r_r é o

raio dinâmico do pneu e $v(t_i)$ é a velocidade instantânea no instante de tempo t_i. Foi adotado um valor de redução do diferencial $R_a = 6,43$, valor encontrado para um ônibus de peso semelhante (Lopes, 2014). Para a razão de transmissão R_t foi adotado um valor unitário. Os valores de rotação foram calculados a partir dos valores médios de velocidade desenvolvidos em cada modo do VSP.

3.4.3 Cálculo do consumo de combustível

Na Seção 2.8.2 foram apresentados o conjunto de equações que o CMEM utiliza para cálculo do consumo de combustível. Para implementar as equações utilizadas pelo software, que estão bem descritas no relatório de desenvolvimento do software desenvolvimentocmem, esbarra-se no problema falta de valores numéricos para quantificar algumas das variáveis.

Entretanto, Giannelli et al. (2005) apresenta uma formulação aplicada à veículos a diesel bastante parecida com as equações do CMEM apresentadas na Seção 2.8.2. Também são encontrados vários valores numéricos aceitáveis e recomendáveis para todos os parâmetros. O consumo de combustível a cada instante de tempo t_i é quantificado, em g/s, por:

$$FR(t_i) = \frac{1}{LHV}\left(\frac{kN(t_i)V_D}{2000} + \frac{P(t_i)}{\eta}\right) \tag{3.6}$$

onde:

- LHV é o Lower Heating Value do combustível em kJ/g. Giannelli et al. (2005) estabelece o valor de 43.2 kJ/g para o óleo diesel;
- k é o coeficiente de atrito do motor, em kPa/rev. Para um motor de 8,5 L, assume-se $k = 92,6$ kPa (Giannelli et al., 2005);
- P é a demanda de potência do veículo, em kW. Pode ser obtida multiplicando o VSP pela massa do veículo vazio;
- η é a eficiência do motor, adimensional. Assume-se um valor típico de $\eta = 0,45$ (Giannelli et al., 2005);
- V_D é a cilindrada do motor, em litros. Neste caso, $V_D = 8,5$ L;
- N é a rotação do motor, em rotações por segundo.

3.5 ESTIMATIVA DE EMISSÕES DE POLUENTES

Os estudos disponíveis na literatura contam com uma grande coleta de dados experimentais das emissões dos veículos enquanto os testes foram realizados. Tais dados permitiram a elaboração de um modelo capaz de estimar as emissões de poluentes através de regressões lineares dos dados experimentais, como é o caso do CMEM.

Este Projeto de Graduação utiliza os dados dessas regressões lineares disponíveis na literatura no desenvolvimento da metodologia na medida em que não houve quaisquer coletas de dados e medições das emissões de poluentes feitas em ônibus brasileiros. A metodologia aqui apresentada não depende dos dados utilizados para os cálculos, mas os resultados obtidos são fortemente influenciados pela qualidade dos dados. A metodologia tem caráter geral e generalizante, e a realização de medições experimentais seria o próximo passo para a formulação de um modelo mais adequado a realidade dos ônibus brasileiros, porém, foge ao escopo deste trabalho.

Barth et al. (2000) modela as emissões de poluentes através de correlações lineares entre a emissão e consumo de combustível. Denotando por FR o consumo de combustível em g/s, e por a_{CO}, r_{CO},a_{HC}, r_{HC}, a_{NO} e r_{NO} as constantes obtidas nas regressões lineares para os poluentes considerados, tem-se que: Semelhantemente, as taxas de emissões de hidrocarbonetos (HC) e óxido de nitrogênio (NO_x) são descritos por equações análogas.

A taxa de emissões de CO em g/s é:

$$ECO = a_{CO}FR + r_{CO} \tag{3.7}$$

De maneira análoga, a taxa de emissões de HC em g/s é:

$$EHC = a_{HC}FR + r_{HC} \tag{3.8}$$

Por fim, a taxa de emissões de NO em g/s é:

$$ENO = a_{NO}FR + r_{NO} \tag{3.9}$$

Os valores utilizados para as constantes das regressões lineares foram levantados a partir de medições realizadas em caminhões pequenos a diesel mostrados na Figura 3.7 . Os valores das constantes utilizados nesta modelagem foram os valores médios encontrados na última linha da Tabela mostrada na Figura.

MY	Make	Test#	Model	a_{CO}	C_O	R^2_{CO}	a_{HC}	r_{HC}	R^2_{HC}	a_{NO}	r_{NO}	R^2_{NO}
95	Ford	400	F-350 4x4	0.0047	0.0039	0.1691	0.0006	0.0033	0.4516	0.0418	0.0037	0.9019
87	Ford	401	F-250 TB PU	0.0067	0.0009	0.6077	0.0026	0.0017	0.8363	0.0291	0.0082	0.8612
90	Dodge	402	250 PU 4x4	0.0045	0.0040	0.4859	0.0021	0.0038	0.4440	0.0435	-0.0111	0.8550
92	Dodge	403	Ram 250 LE	0.0023	0.0033	0.5125	0.0011	0.0023	0.5172	0.0449	-0.0040	0.8768
86	Ford	405	F-250 PU	0.0089	0.0010	0.6678	0.0035	0.0021	0.8649	0.0081	0.0087	0.7266
97	Dodge	406	RAM 2500	0.0021	0.0017	0.4300	0.0007	0.0012	0.2478	0.0319	0.0020	0.8870
96	Ford	407	F-350 4x4	0.0034	0.0027	0.1294	0.0003	0.0018	0.6692	0.0283	0.0003	0.8201
86	Ford	408	F-350 4x2	0.0063	0.0022	0.7220	0.0023	0.0022	0.4294	0.0295	0.0139	0.7478
83	Ford	409	F-350 4x2	0.0083	0.0086	0.6295	0.0027	0.0031	0.3727	0.0257	0.0072	0.7704
Average				0.0052	0.0031	0.4838	0.0018	0.0024	0.5370	0.0314	0.0032	0.8274

Figura 3.7: Coeficientes de Regressão Linear para cálculo de emissões (Barth et al., 2000)

3.6 RESULTADOS

Nesta seção são apresentados os resultados da implementação do método desenvolvido ao longo deste capítulo. O código da rotina em MATLAB desenvolvida para cálculo encontra-se no anexo deste documento.

Conhecendo-se a curva de velocidades obtida nas medições via GPS dos ônibus testados pela EPA, conhecendo-se minimamente algumas características destes veículos e supondo um valor de inclinação variável ao longo do percurso de acordo com os dados apresentados na Tabela 3.1, buscou-se verificar se os resultados de consumo de combustível e emissões de poluentes obtidos via medições reais seriam reprodutíveis utilizando a metodologia desenvolvida.

Os resultados são comentados um a um nas subseções seguintes e comparados com os resultados experimentais relatados na literatura.

3.6.1 Distribuição Modal de Potência

A distribuição do VSP foi calculada na rotina feita em MATLAB, de acordo com o perfil de velocidades e de acelerações, juntamente com os valores de inclinação ao longo da rota. Na Figura 3.8 são apresentados os valores da potência específica, que foram agrupados em modos.

Na rotina do MATLAB também foi inserido um contador de frequências com o objetivo de avaliar o tempo gasto em cada modo do VSP durante o trajeto considerado. Estes valores são particularmente importantes para avaliação da economia de combustível ao longo da rota considerada. Os tempos de viagem em cada modo são apresentados na Figura 3.9.

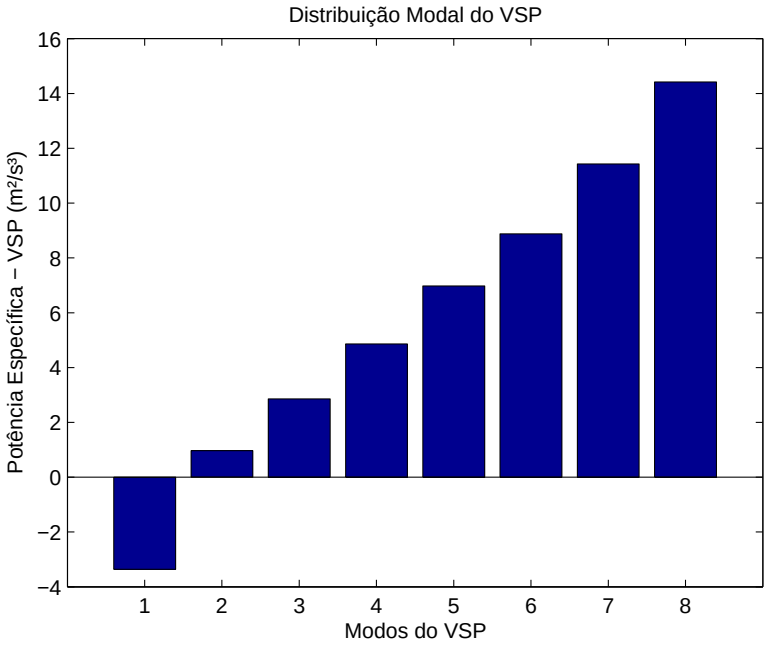

Figura 3.8: Distribuição Modal do VSP

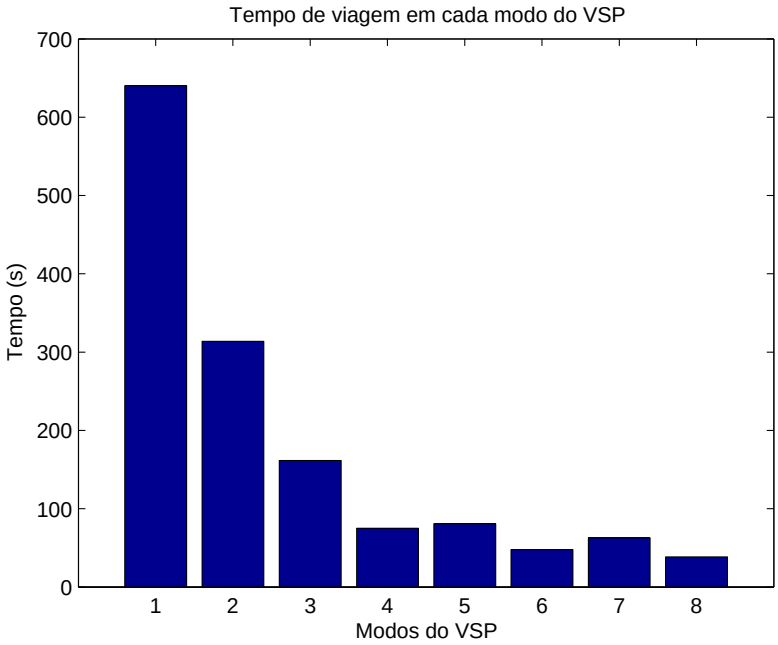

Figura 3.9: Tempo de Viagem em cada modo do VSP

Na Figura 3.10 observa-se a concentração das maiores frequências de ocorrência nos modos de menor potência específica. Este resultado é interessante do ponto de vista da curva de velocidades considerada, obtida de uma rota real onde o veículo parou em diversos pontos de ônibus para simular o embarque de passageiros.

3.6.2 Consumo Modal de Combustível

Na Figura 3.10 são mostrados os valores de consumo de combustível para cada modo obtidos a partir da modelagem desenvolvida. Verifica-se a tendência de um crescimento aproximadamente linear do consumo com relação à potência específica. Verificou-se um consumo máximo próximo de 9,5 ml/s, este ocorrendo no oitavo modo de distribuição.

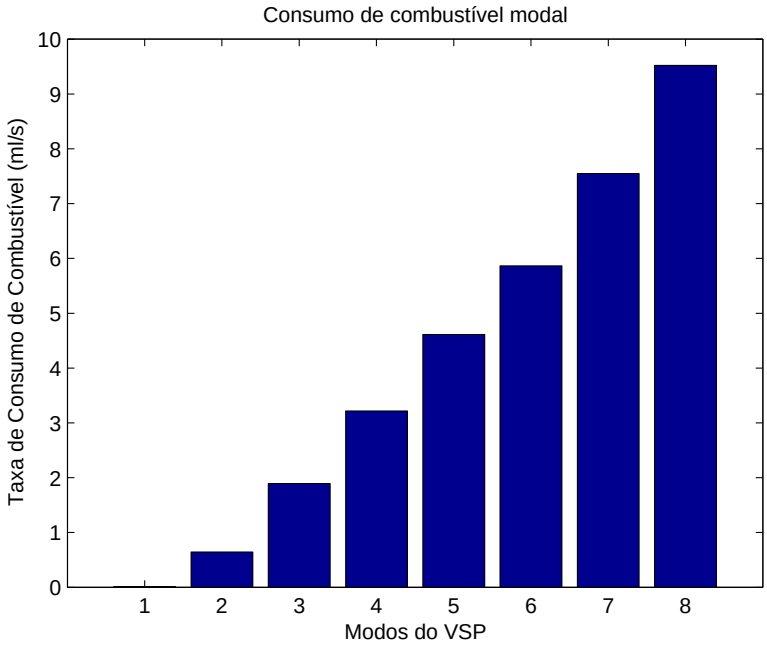

Figura 3.10: Consumo Modal de Combustível

Na Figura 3.11 são mostrados os resultados experimentais obtidos por Zhai et al. (2008)) quando foi analisado o consumo dos ônibus da AATA.

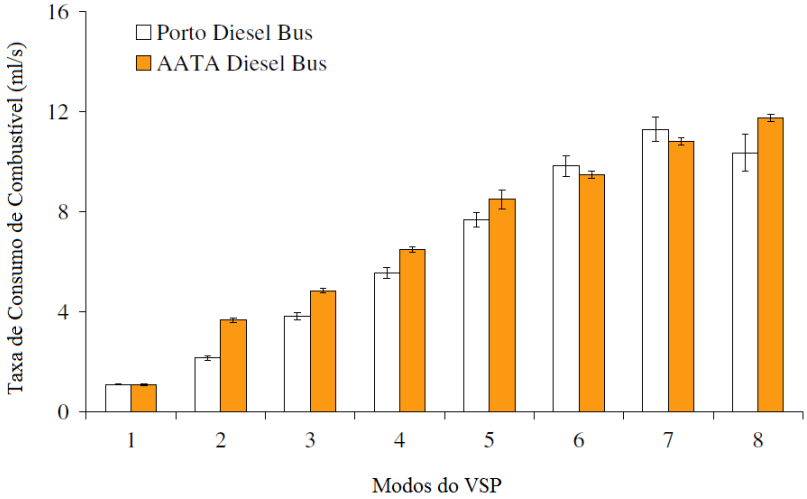

Figura 3.11: Consumo Modal de Combustível Experimental (Zhai et al., 2008)

O comparativo entre os resultados obtidos e os resultados experimentais disponíveis é feito a seguir. Na Figura 3.12 é feito o comparativo absoluto entre o consumo de combustível em ml/s em cada modo de potência.

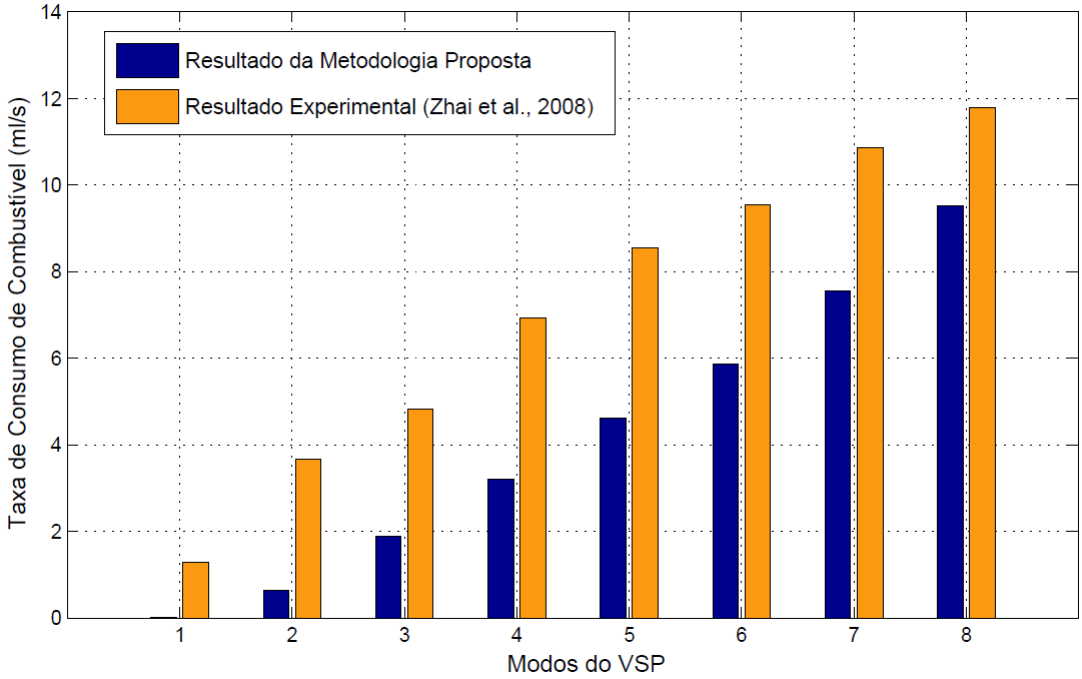

Figura 3.12: Comparativo do Consumo entre metodologia e resultados experimentais

Observa-se que as maiores diferenças entre resultados numéricos e experimentais ocorrem nos modos de menor valor. Os resultados numéricos se aproximam dos resultados experimentais nos modos de maior potência específica, porém, observa-se a mesma tendência de crescimento do consumo instantâneo à medida que o modo de potência específica aumenta.

3.6.3 Emissões Modais de Poluentes

Na Figura 3.13, Figura 3.14 e Figura 3.15 são mostrados os resultados verificados para as emissões de monóxido de carbono, hidrocarbonetos e óxidos de nitrogênio, respectivamente. Como resultado já esperado, todas as emissões são funções crescentes do consumo de combustível, verificando valores máximos de emissões em situações onde são exigidas maiores potências específicas.

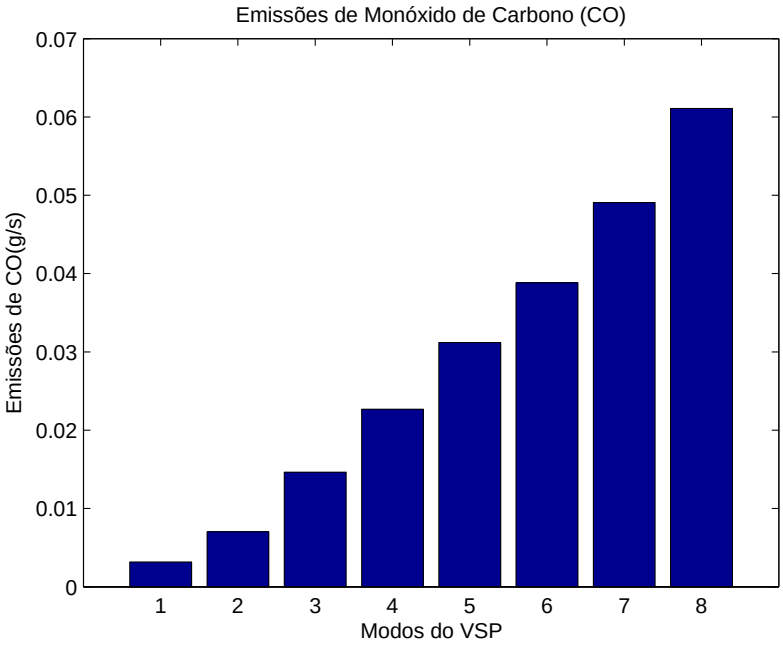

Figura 3.13: Emissões Modais de Monóxido de Carbono

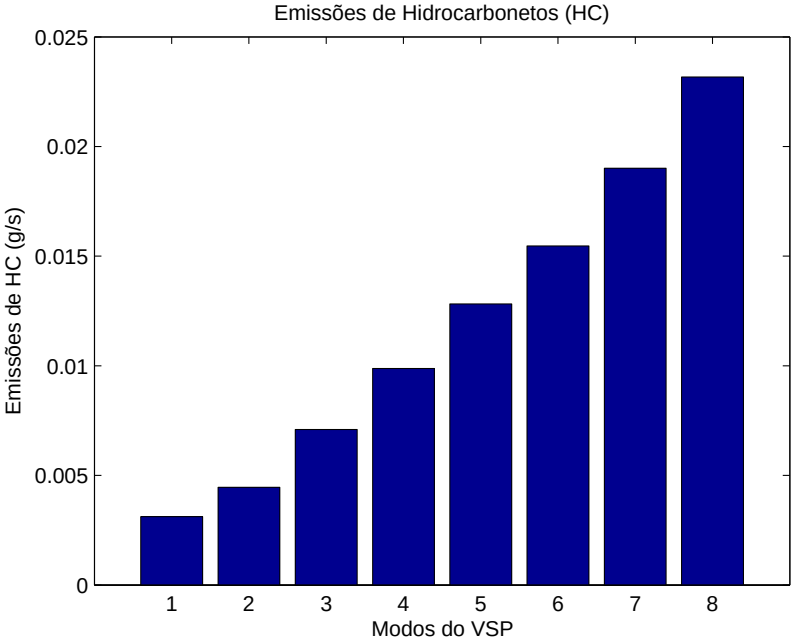

Figura 3.14: Emissões Modais de Hidrocarbonetos

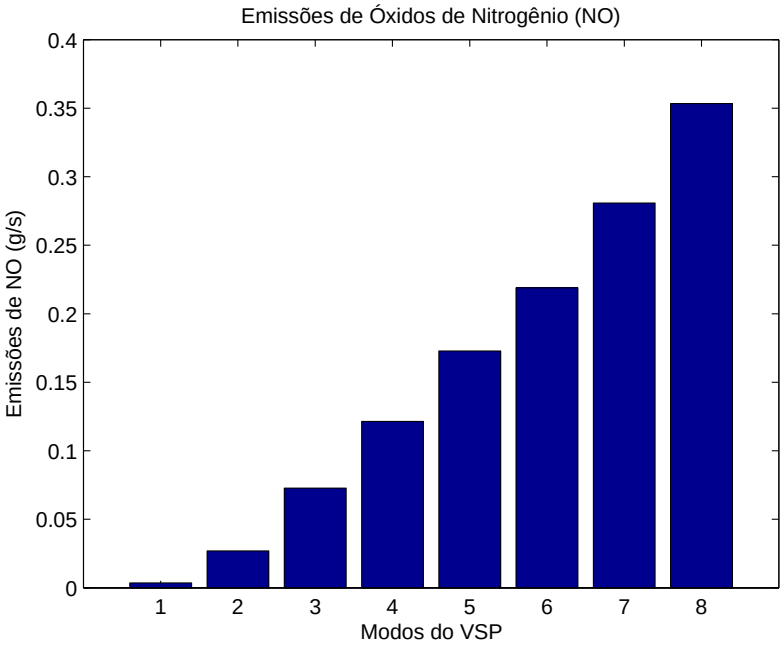

Figura 3.15: Emissões Modais de Óxidos de Nitrogênio

Os resultados obtidos pela metodologia desenvolvida neste capítulo são então comparados com os resultados experimentais, mostrados na Figura 3.16. A comparação dos valores experimentais e numéricos é mostrada na Tabela 3.2. O método encontrou valores com mesma ordem de grandeza dos resultados experimentais para dois poluentes (CO e NO). O modelo prevê com melhor precisão os valores de emissão de poluentes nos modos de maiores potências, e não capta as flutuações que podem ocorrer, como por exemplo um modo de menor potência emitindo mais poluentes que outro de potência mais elevada. Isso tudo devido a modelagem a partir de regressões lineares e a proporcionalidade das emissões e do consumo de combustível.

As emissões de HC no entanto divergiram por um fator de 10. Esta divergência pode ser justificada pela utilização das constantes de regressão linear que não são tão adequadas para o estudo realizado pela EPA em parceria com a AATA. Entretanto, pode-se observar que apesar das emissões de hidrocarbonetos modeladas terem sido 10 vezes maior que os resultados experimentais, a taxa de variação das emissões deste poluente de acordo com o modo é comparativamente a menor de todos os poluentes testados.

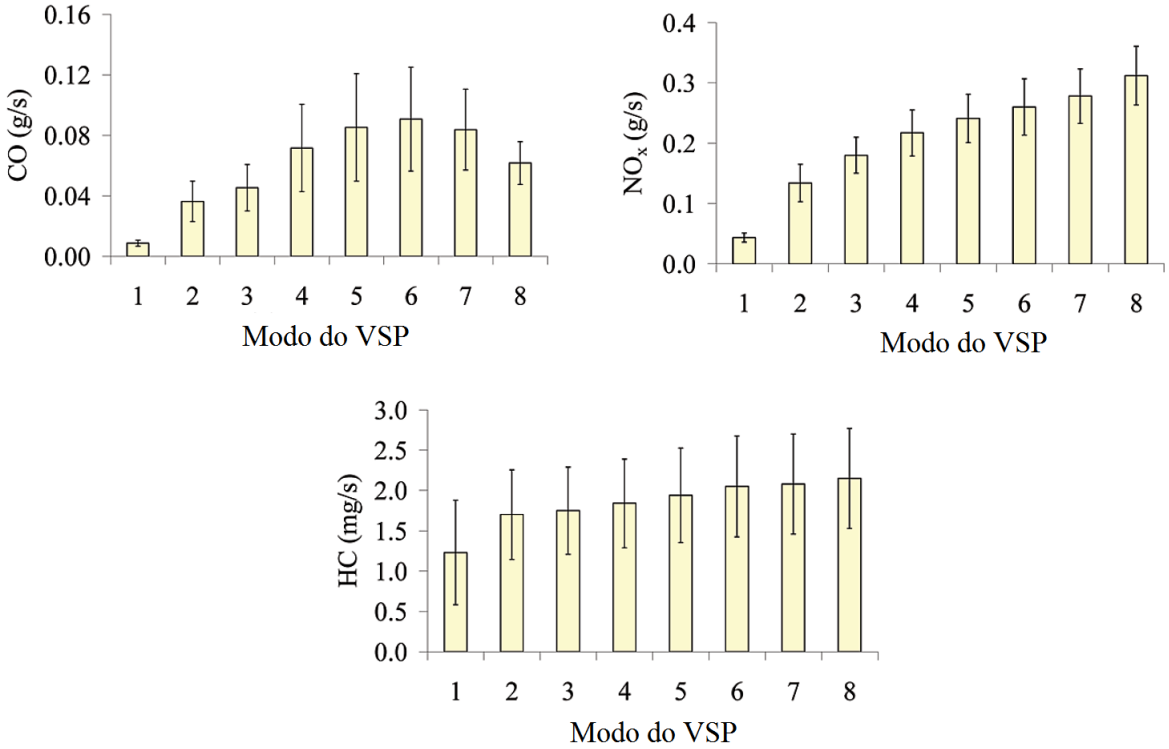

Figura 3.16: Emissões Modais Experimentais (Zhai et al., 2008)

Tabela 3.2: Comparativo entre valores numéricos e experimentais

Modo	**CO (g/s)**		**NO (g/s)**		**HC (g/s)**	
	Numérico	Experimental	Numérico	Experimental	Numérico	Experimental
1	0,045	0,01	0,012	0,05	0,0036	0,0013
2	0,007	0,03	0,015	0,15	0,0045	0,0017
3	0,015	0,04	0,073	0,80	0,0071	0,0018
4	0,023	0,07	0,121	0,21	0,0099	0,0019
5	0,031	0,09	0,173	0,25	0,0128	0,0020
6	0,039	0,1	0,220	0,26	0,0155	0,0021
7	0,049	0,08	0,281	0,29	0,0190	0,0022
8	0,060	0,06	0,353	0,31	0,0232	0,0023

3.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Embora os resultados numéricos tenham sido relativamente diferentes daqueles verificados experimentalmente, a ordem de grandeza para as taxas do consumo de combustível e de dois poluentes foram as mesmas daquelas encontradas experimentalmente. O resultado discordante para o poluente HC é cerca de 10 vezes maior do que o encontrado experimentalmente em trabalhos desenvolvidos na área.

A metodologia proposta adaptou a estrutura lógica do CMEM de forma a prever as emissões de poluentes. Entretanto, as constantes que modelam as emissões dependem do tipo de veículo analisado. A previsão será tão melhor quanto mais confiável for o valor destas constantes. As informações que não puderam ser obtidas acerca da rota percorrida pelos ônibus da AATA nos testes realizados pela EPA e as variáveis que precisaram ser arbitradas durante a modelagem também podem influenciar nas diferenças encontradas na verificação do método.

Mesmo assim, obteve-se uma metodologia capaz de estimar com relativa coerência a emissão de três poluentes de um ônibus percorrendo uma rota qualquer. Este método é dependente de vários parâmetros relativos ao ônibus e ao percurso, que podem ser otimizados visando minimizar consumo e emissões. Os resultados obtidos pelo método serão tão melhores quanto mais e melhores forem os dados relativos ao veículo e à rota em estudo considerados.

4 OTIMIZAÇÃO

A otimização em engenharia tem como objetivo a busca pelo melhor produto possível, dentro de determinadas condições de projeto. Uma solução ótima pode ser obtida modificando as variáveis de projeto de um produto já existente, por meio de testes de vários protótipos até se obter o produto desejado. Este processo, entretanto, pode ser lento e economicamente inviável.

Com o desenvolvimento de computadores com capacidades de processamento cada vez mais potentes, a introdução de métodos numéricos de otimização na engenharia foi possível e reduziu o tempo e o custo demandado em projeto.

Os métodos numéricos de otimização são classificados em métodos determinísticos e probabilísticos. Os métodos determinísticos correspondem a maioria dos métodos numéricos de otimização. Baseiam-se num algoritmo de busca local, o que lhes concede uma forte dependência do ponto de partida das variáveis. Por buscarem a maximização de uma função objetivo por meio do seu gradiente, este método pode convergir para um ponto de máximo local uma solução boa, porém não necessariamente a ótima. Os métodos determinísticos são eficientes quando aplicados a problemas em que as variáveis de projeto são contínuas e a função objetivo e suas restrições não apresentam características altamente não-lineares (Rodrigues, 2012).

Os métodos probabilísticos avaliam unicamente a função objetivo introduzindo parâmetros gerados por eventos aleatórios, dispensando a necessidade de a função objetivo possuir uma representação matemática. A característica em comum dos métodos probabilísticos é a sua capacidade de realizar uma busca global pelo ótimo no espaço de projeto (Rodrigues, 2012). A desvantagem em relação aos métodos determinísticos é o custo computacional demandado, uma vez que são necessários um elevado número de avaliações da função objetivo para a obtenção de um bom resultado.

A partir dos anos 1960 observou-se o surgimento de métodos probabilísticos inspirados em fenômenos naturais, estabelecendo-se assim uma forte relação com a teoria evolutiva de Darwin. A estes métodos, deu-se o nome de computação evolutiva ou evolucionária. A computação evolucionária pode ser subdivida em Programação Genética, Programação Evolutiva, Estratégia Evolutiva e Algoritmos Genéticos. Neste trabalho, o foco será unicamente na utilização de Algoritmos Genéticos como mecanismo para se realizar a otimização.

4.1 OS ALGORITMOS GENÉTICOS

Os Algoritmos Genéticos (AG) podem ser definidos como uma técnica de busca baseada numa metáfora do processo biológico de seleção natural (Linden, 2006).

A seleção natural presume que os genes dos indivíduos de uma população que mais se

adaptam as condições externas tendem a ser mais frequentes com o tempo. Um indivíduo mais adaptado a determinadas condições tem maiores chances de sobrevivência e reprodução dentro daquele ambiente. Dessa forma, seus genes são transferidos às futuras gerações, garantido que as características mais adaptadas sejam mais frequentes com o passar das gerações.

Um algoritmo genético busca utilizar o mesmo mecanismo da seleção natural para fornecer soluções mais adaptadas (ou otimizadas) para um determinado problema. Os algoritmos genéticos processam populações de indivíduos ou cromossomos. Como definido por Rodrigues (2012), um cromossomo é uma estrutura de dados, que podem ser expressos em vetores ou em uma cadeia de valores binários, reais ou combinação de ambos, que representa uma possível solução para o problema em estudo. Um conjunto de indivíduos é chamado de população.

Uma população inicial é gerada aleatoriamente e seus indivíduos são submetidos a uma função objetivo, que avalia a qualidade dos indivíduos de acordo com um ou vários critérios. Aos indivíduos mais aptos a estes critérios é atribuído um valor de aptidão, e quanto maior for este valor, maior é a probabilidade de as características deste indivíduo serem transferidas para as próximas gerações. Semelhantemente ao que ocorre na natureza, os indivíduos estão submetidos à operadores genéticos, que incluem os processos de reprodução/seleção, mutação e *cross-over*.

4.1.1 Codificação

As duas principais formas de codificação utilizadas em Algoritmos Genéticos são a Codificação Binária e a Codificação por Valor.

Codificação Binária:

Neste tipo de codificação, um vetor binário é utilizado para representar o genótipo de um indivíduo, onde cada parâmetro é representado por um conjunto de bits. A vantagem desta representação é a sua independência do tipo do problema: a representação em vetores binários permite que as operações padrões possam ser utilizadas (Spears et al., 1993). Esta codificação, no entanto, encontra problemas na avaliação de problemas que exigem várias variáveis e quando a precisão requerida é alta pois são necessários vetores excessivamente grandes para representação.

Codificação por Valor:

A codificação por valor é aplicada à problemas onde valores mais complexos são necessários. Em problemas em que as variáveis são parâmetros reais, a codificação por valor apresenta desempenho superior a codificação binária. Computacionalmente, são utilizados números de ponto flutuante para representação do cromossomo, cujo comprimento é o mesmo do vetor que representa a solução do problema. A implementação da codificação por valor implica em modificações a serem feitas nos operadores genéticos (Rodrigues, 2012).

4.2 POPULAÇÃO INICIAL

A população inicial corresponde ao primeiro conjunto de indivíduos a serem avaliados pela função objetivo da otimização. Pode ser definida de maneira completamente aleatória ou definida dentro de uma faixa onde já se conhece soluções aproximadas para o problema.

4.3 FUNÇÃO OBJETIVO

A função objetivo, também chamada de função de avaliação ou função fitness, é utilizada para quantificar o quão adaptado é um indivíduo ou, em outras palavras, avaliar quão boa é a solução para o problema. Na natureza, a função objetivo mede a capacidade de o indivíduo sobreviver as condições do ambiente e se reproduzir (Rodrigues, 2012). A função objetivo é a única ligação verdadeira do Algoritmo Genético com o problema real (Linden, 2006).

4.4 ELITISMO

A estratégia de Elitismo consiste na preservação e utilização dos melhores indivíduos encontrados na atual geração nas próximas gerações. Não é feito nenhum tipo de alteração nas características destes indivíduos, que são copiados diretamente para a próxima geração.

4.5 SELEÇÃO

A seleção introduz ao algoritmo genético a influência da função objetivo no processo de otimização. Os indivíduos mais aptos de acordo com a função objetivo, semelhantemente ao que acontece na seleção natural, têm maior probabilidade de serem selecionados. No entanto, não se exclui a possibilidade de um indivíduo de baixa aptidão de acordo com a função objetivo participar do processo de reprodução. Se destacam três importantes estratégias de seleção: seleção proporcional (ou roleta), dizimação e torneio.

4.5.1 Seleção Proporcional - Roleta

A seleção proporcional, também conhecida como roleta, é um método de seleção estocástica. Neste método a probabilidade de um indivíduo ser selecionado aleatoriamente é diretamente proporcional ao valor de sua função objetivo. A probabilidade p_i de um i-ésimo indivíduo ser selecionado é proporcional a sua função objetivo $f(x_i)$ dividido pelo somatório das funções objetivos de todos os indivíduos desta população.

$$p_i = \frac{f(x_i)}{\sum f(x_i)} \tag{4.1}$$

A interpretação deste método pode ser exemplificada com uma roleta. A área roleta é dividida em regiões proporcionais, de modo que indivíduos com maiores aptidões ocupam uma área maior da roleta. Dessa forma, após ser girada, a probabilidade de parada é proporcional a área ocupada por este indivíduo. Dessa forma, um indivíduo com baixa aptidão ainda possui chances de ser selecionado.

A roleta pode girar quantas vezes forem necessárias para selecionar indivíduos suficientes para aplicação dos operadores genéticos. A representação do método é mostrada na Figura 4.1.

Indivíduo	***Fitness***	***Fitness (%)***
1	12	23.08
2	8	15.38
3	9	17.31
4	6	11.54
5	12	23.08
6	5	9.62
Total	**52**	**100**

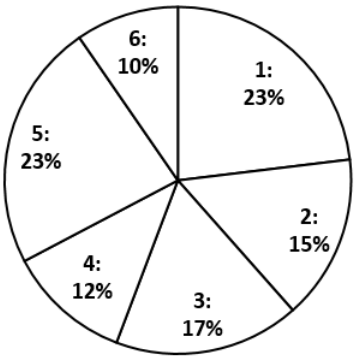

Figura 4.1: Método da Roleta (Rodrigues, 2012)

4.5.2 Dizimação

A estratégia de dizimação consiste em ordenar os indivíduos através do valor de suas funções objetivo e remover um número fixo de indivíduos considerados com baixa aptidão. Apesar de sua simplicidade, a simples eliminação de indivíduos considerados pouco aptos pode eliminar características genéticas vantajosas do processo. Estas características ainda podem ser relevantes no processo de otimização mesmo o indivíduo portador desta sendo considerado de baixa aptidão pela função objetivo.

4.5.3 Torneio

O torneio é uma estratégia de seleção que escolhe randomicamente dentro da população uma quantidade de indivíduos n_k que competem entre si. O indivíduo com maior aptidão é selecionado para a aplicação dos operadores genéticos, enquanto os outros são eliminados. Esta estratégia requer um número mínimo de dois indivíduos a serem selecionados: do contrário, não há competição. Quanto maior for o número de indivíduos n_k maior é a predominância dos indivíduos considerados mais aptos, pois sempre um deles será vencedor do torneio (Linden, 2006). A Figura 4.2 ilustra o método do torneio.

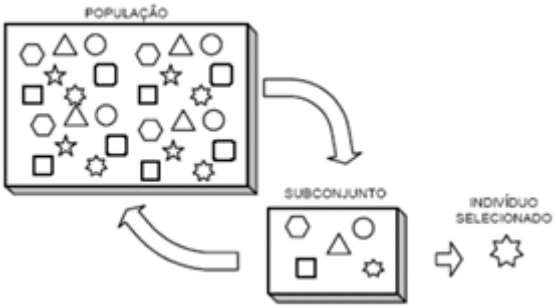

Figura 4.2: Método do Torneio (Mognon, 2004)

4.6 OPERADORES GENÉTICOS

Os operadores genéticos têm a função de transformar a população através de gerações, de modo a melhorar a aptidão dos indivíduos a cada sucessiva geração. Os operadores são fundamentais para a evolução da população, de modo que as características conquistadas pelas gerações anteriores sejam mantidas (Mognon, 2004).

Os operadores selecionam um par de indivíduos de uma população, que são denominados indivíduos pais, e através do cruzamento e/ou mutação dos cromossomos dos pais, geram um par de indivíduos filhos.

4.6.1 Cruzamento

O cruzamento, também chamado de crossover ou recombinação, consiste na permutação de material genético entre os indivíduos pais na geração dos cromossomos dos indivíduos filhos.

O cruzamento pode ser realizado de diversas maneiras. A mais simples, denominada cruzamento de ponto único, consiste na seleção aleatória de uma localização a partir do qual os materiais genéticos dos indivíduos pais são trocados entre si. A Figura 4.3 ilustra o funcionamento deste operador.

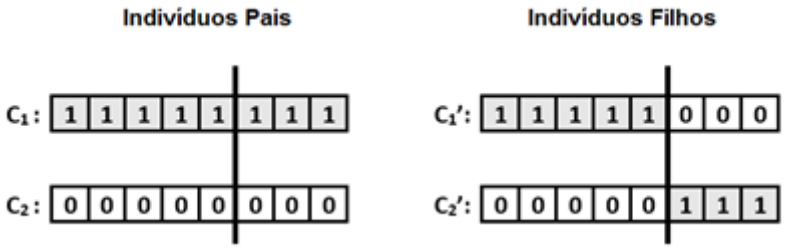

Figura 4.3: Cruzamento de Ponto Único

O cruzamento de ponto duplo seleciona duas localizações para dividir o cromossomo. Dessa forma, cada cromossomo é dividido em três partes e a troca do material genético é exemplificada

pela Figura 4.4.

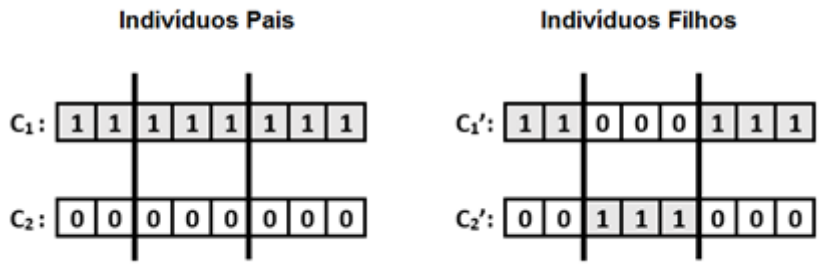

Figura 4.4: Cruzamento de Ponto Duplo

Outra forma de se realizar o cruzamento é selecionando pontos aleatórios para troca de material genético, conforme exemplificado na Figura 4.5, também chamado de cruzamento de pontos aleatórios.

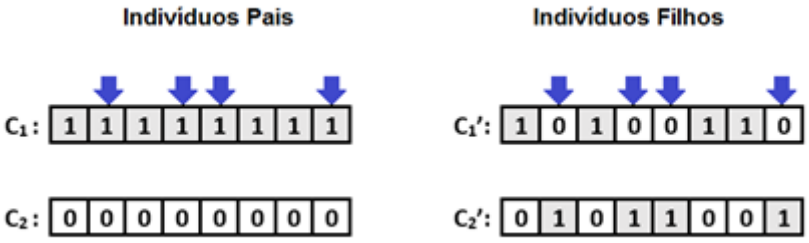

Figura 4.5: Cruzamento de Pontos Aleatórios

4.6.2 Mutação

A mutação corresponde a inserção de material genético na população através da troca aleatória de um ou mais nucleotídeos de um cromossomo. A ocorrência ou não da mutação é determinada por uma probabilidade de mutação p_m, que geralmente assume valores baixos. A probabilidade p_m é sugerida de 5% (Goldberg, 1989).

O material genético inserido pela mutação pode ser completamente inédito ou podem ser informações que tivessem sido perdidas em outras iterações. Em codificação binária, a simples alteração de um valor em um dos bits do cromossomo caracteriza o operador da mutação, como ilustrado na Figura 4.6

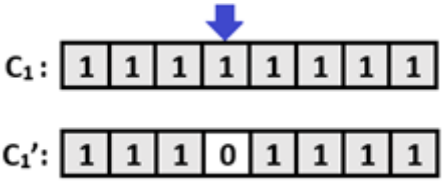

Figura 4.6: Mutação em Codificação Binária

4.7 CRITÉRIOS DE CONVERGÊNCIA

A fim de avaliar a convergência do algoritmo genético para uma solução dita ótima, deve-se estabelecer um critério de parada para a simulação.

Este critério pode se dar pela variabilidade genética da população através das gerações. A existência de indivíduos muito parecidos entre si, e com valores de aptidão semelhantes, pode indicar a existência de um máximo ou mínimo da função objetivo e que estes indivíduos se encontram próximos deste valor máximo ou mínimo. Este critério não está livre da ocorrência de convergência para um ponto de máximo ou mínimo local (Rodrigues, 2012).

Pode-se estabelecer um critério de parada baseado em um erro máximo admissível. Este critério é útil quando se conhece o valor da função objetivo requerido, de modo que o critério de parada é o encontro de um indivíduo que forneça um erro menor do que o estipulado.

Podem ser estipulados um número máximo de gerações permitido. A escolha do número de gerações a serem realizadas pelo programa pode afetar a convergência dos resultados. Um baixo número de gerações pode resultar em tempo insuficiente para o algoritmo investigar todas as possibilidades e convergir para um ponto que não é o ponto de máximo ou mínimo global.

Nenhum dos critérios está livre de falhas. Entretanto, entender as suas limitações e fundamental para o estabelecimento de um bom critério de parada. As estratégias de convergência podem ser combinadas entre si, de modo que se possa definir um número fixo de gerações a serem testadas a princípio. Pode-se avaliar a variabilidade genética da última geração e, em caso de alta diversidade entre os indivíduos, pode-se estender o número de gerações permitido (Mognon, 2004).

5 IMPLEMENTAÇÃO DA OTIMIZAÇÃO

Este Capítulo foca na implementação do Algortimo Genético para realizar a otimização dos parâmetros que afetam o desempenho do ônibus. Para tanto, utiliza-se as formulações apresentadas no Capítulo 2, a metodologia para emissão de poluentes apresentada no Capítulo 3, bem como o método de otimização por algoritmos genéticos descrito no Capítulo 4.

A estrutura principal do Algoritmo Genético utilizado para a implementação é a mesma desenvolvida por Colherinhas e Dias, que foi posteriormente adaptada no trabalho de Zeigerman e Reis para aplicação semelhante. As modificações necessárias para adaptar o código já existente à realidade deste trabalho são mostradas neste capítulo. A mais significativa delas se dá no carregamento de dados e na função objetivo. As funções de criação de população, seleção e operadores genéticos permanecem basicamente as mesmas.

O Algoritmo Genético é desenvolvido em MATLAB versão R2011a e rodado no sistema operacional Windows 8.1.

5.1 O PROBLEMA

O problema estudado neste Projeto de Graduação consiste em encontrar uma parametrização ótima para os limites de rotação das trocas de marchas de um ônibus urbano submetido aos esforços relativos à uma rota urbana qualquer. Por parametrização ótima, entende-se a parametrização das rotações que fornece as menores taxas de consumo de combustível e emissões de poluentes possíveis.

A modelagem matemática de um ônibus percorrendo uma rota é feita escolhendo-se: um modelo de veículo; uma curva de velocidade ao longo do trajeto; e uma curva que contém os valores da inclinação do percurso. Desta forma, a cada instante de tempo há um valor de velocidade e de inclinação associados. Assim, calcula-se em cada um destes instantes as forças resistivas ao movimento, a potência necessária para vencer as forças resistivas, o torque disponível, potência no motor disponível e o consumo instantâneo de combustível ao longo do trajeto.

Os efeitos das trocas de marchas de acordo com as parametrizações das rotações são avaliados de acordo com a potência e torque disponíveis no motor em cada valor de rotação. Foi necessário obter as curvas de Potência e Torque em função das rotações para efetuar a análise de maneira adequada. Como condição para disponibilizar estas curvas para este trabalho, o fabricante exigiu confidencialidade destas informações. Desta forma, as curvas exatas não podem ser divulgadas neste trabalho.

A avaliação da parametrização da rotação é feita conforme o veículo atende ou não as exigências de potência ao longo do trajeto e de acordo com o valor calculado para o consumo de

combustível. A utilização do algoritmo genético permite testar várias parametrizações geradas de modo aleatório e selecionar a melhor delas. Cada função que compõe o algortimo genético é detalhada nas seções subsequentes juntamente com sua implementação em MATLAB.

5.2 O VEÍCULO

Para modelar o problema mais próximo da realidade, utiliza-se dados fornecidos pela Expresso São José, empresa operadora de ônibus da cidade de Brasília – DF. O veículo selecionado utiliza chassis Volkswagen Volksbus 15-190 OD. As dimensões do chassis do veículo são mostradas na Figura 5.1, disponível no catálogo do fabricante encontrado online. As caracterísitcas do veículo presentes no catálogo são mostradas de maneira resumida na Tabela 5.1.

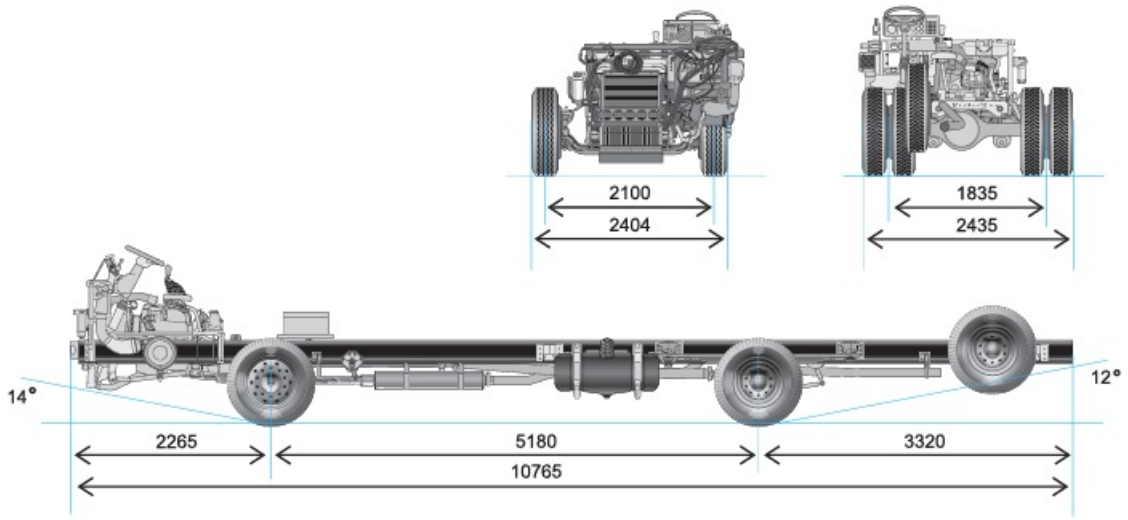

Figura 5.1: Dimensões do Chassis do Veículo considerado (MAN-LA)

5.3 O TRAJETO

O trajeto deve ser escolhido para fazer a modelagem do consumo e das emissões de poluentes de um ônibus percorendo uma rota urbana. Duas fontes de informação são capazes de descrever o trajeto. São elas:

a) Curva de velocidades: consiste em um gráfico de velocidade pelo tempo, de onde são extraídas informações a respeito da velocidade do veículo a cada instante de tempo do trajeto. Estas curvas podem ser obtidas via telemetria, por exemplo;

b) Curva de inclinação do percurso: obtidas pelas diferenças de elevação ao longo do trajeto, as curvas de inclinação fornecem, a cada instante de tempo, um valor para a inclinação da pista onde o veículo está situado.

Tabela 5.1: Dados do Veículo VW 15-190 OD (MAN-LA)

Motor	Modelo do Motor	MAN/D0834 190
	Número de Cilindros	4
	Cilindrada	4,6 L
	Potência Máxima	139 kW @ 2400 rpm
	Torque Máximo	700 Nm @ 1100 - 1600 rpm
	Norma de Emissões	Proconve Fase P-7 (Euro 5)
Transmissão	Modelo da Transmissão	ZF 6S 1010 BO
	Tipo e acionamento	Mecânico, a cabo
	Número de marchas	6 a frente, 1 a ré
	Relações de transmissão	1ª – 6,75:1
		2ª – 3,60:1
		3ª – 2,13:1
		4ª – 1,39:1
		5ª – 1,00:1
		6ª – 0,78:1
		Ré – 6,06:1
Rodas e Pneus	Aço (7,5” x 22,5”)	275/80 R22,5
Diferencial	Razão de Redução	5,86:1 ou 5,38:1 ou 6,75:1
Desempenho	Peso Bruto Total	15000 kgf
	Velocidade Máxima	93 - 110 km/h

5.3.1 Curva de Velocidades

Considera-se a curva de velocidades descrita na Figura 5.2. Obtida via medições de GPS nos testes realizados pela EPA com os ônibus da AATA, a curva foi escolhida por ter sido diretamente extraída de uma rota urbana e, por esta mesma razão, captar os efeitos dos pontos de parada e de coleta de passageiros.

Ainda que esta curva não tenha sido diretamente obtida de uma rota de Brasília, verificou-se que a velocidade máxima alcançada nesta está dentro dos limites permitidos e praticados em áreas urbanas do Distrito Federal.

Verificou-se também que a curva apresenta diversos trechos de aceleração, desaceleração e instantes onde a velocidade é zero, de modo a simular bem os pontos de parada ao longo do percurso. Alguns valores relativos a esta curva de velocidade são:

Tempo total em trajeto: 1400 s

Velocidade média: 28 km/h

Velocidade máxima: 64 km/h

Distância total percorrida: 10,9 km

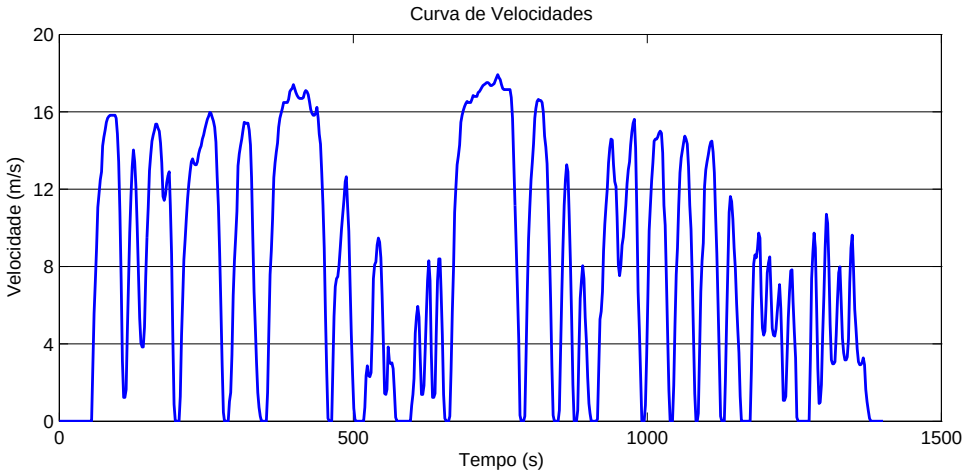

Figura 5.2: Curva de Velocidade em uma rota urbana - (EPA)

Não foi possível, no entanto, obter as tabelas que originaram o gráfico mostrado na Figura 5.2. Desta forma, a solução encontrada foi utilizar o *WebPlotDigitalizer*, uma ferramenta online de captura de imagens e localização de pontos cartesianos. As coordenadas destes pontos foram posteriormente inseridas em uma rotina em MATLAB onde foram eliminados quaisquer distorções geradas pela captura, e, assim, curva pode ser adequadamente reproduzida com 671 pontos. A análise se dá impondo ao ônibus a condição de que os valores presentes na curva de velocidades devem ser atingidos.

Como distância percorrida pela curva é de 10,9 km e as rotas analisadas tem distâncias percorridas maiores que este valor, repete-se o mesmo padrão verificado na Figura 5.2 até que a distância percorrida na curva de velocidades seja igual à distância do início ao fim da rota considerada.

A curva de velocidades é carregada no algoritmo genético a partir de um arquivo externo *speed1.mat*. Este arquivo consiste numa tabela com os valores de tempo, velocidade e aceleração. Um exemplo de como este arquivo é construído é mostrado na Tabela 5.2

Tabela 5.2: Exemplo de arquivo speed.mat

Tempo	Velocidade	Aceleração
t_1	v_1	a_1
t_2	v_2	a_2
t_3	v_3	a_3
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
t_n	v_n	a_n

5.3.2 Curvas de Inclinação do Percurso

Para definir completamente um trajeto, consideram-se os valores da inclinação ao longo do percurso. Isso implica em submeter o veículo a uma condição de carregamento dinâmica, onde a inclinação do terreno impõe uma força que pode atuar tanto na direção do movimento quanto na direção contrária, de acordo com o valor de inclinação naquele determinado instante.

O principal objetivo é simular uma condição mais real de tráfego do ônibus – em uma rota urbana real um ônibus urbano percorre trechos planos, em aclive e em declive – e verificar a implicação de diferentes topografias na parametrização dos veículos. Nesta etapa utilizam-se dados fornecidos pela Expresso São José a respeito das elevações do terreno de algumas rotas urbanas operadas pela empresa (MAN-LA et al., 2014).

Para garantir que cada instante de tempo avaliado está associado a um valor de velocidade e de inclinação, criou-se um rotina no MATLAB que avalia a distância percorrida pela curva de velocidades em cada instante de tempo e compara com a inclinação do percurso naquela distância. Desta forma, associa-se o valores de inclinação ao tempo de trajeto. Esta rotina é mostrada no Anexo deste trabalho.

O resultado é mostrado na Figura 5.3, onde são apresentadas as diferenças de elevação do terreno pela distância horizontal percorrida, a curva das inclinações durante o trajeto e a curva de velocidades considerada. Observa-se na curva de velocidades o padrão mostrado na Figura 5.2 sendo repetido para percorrer a mesma distância da rota a qual está associada.

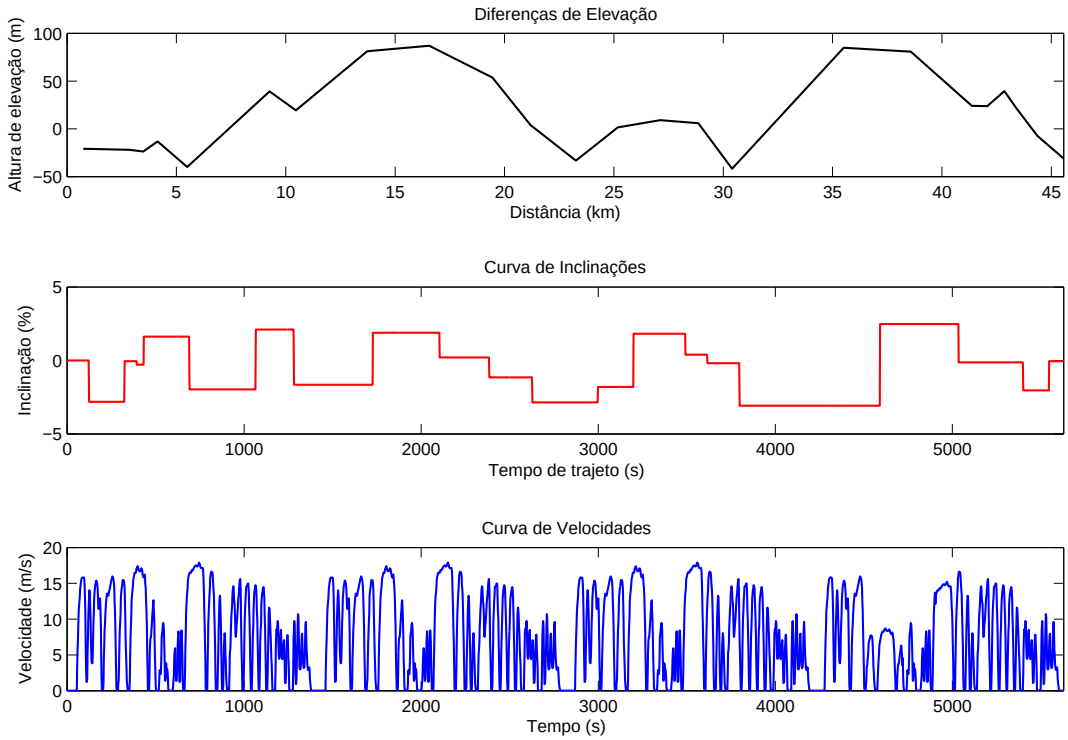

Figura 5.3: Diferenças de elevação, inclinação do trajeto e curva de velocidades

A curva de inclinações é carregada no algortimo a partir de um arquivo externo *road-grade.mat*. Este arquivo consiste numa tabela com os valores de tempo e inclinação da pista. A Tabela 5.3 exemplifica a estrutura deste tipo de arquivo.

Tabela 5.3: Exemplo de arquivo road-grade.mat

Tempo	Inclinação
t_1	θ_1
t_2	θ_2
t_3	θ_3
$\vdots$	$\vdots$
t_n	θ_n

5.4 O ALGORITMO GENÉTICO

O algoritmo genético utilizado neste trabalho para execução da rotina de otimização foi desenvolvido primeiramente no trabalho de Colheirinhas e Dias (2014) e posteriormente utilizado no trabalho de Zeigerman e Reis (2015). As adaptações feitas para este trabalho são descritas

nesta seção.

A Figura 5.4 ilustra o procedimento adotado pelo AG para selecionar indivíduos para as próximas gerações até que se obtenha uma solução ótima para o problema.

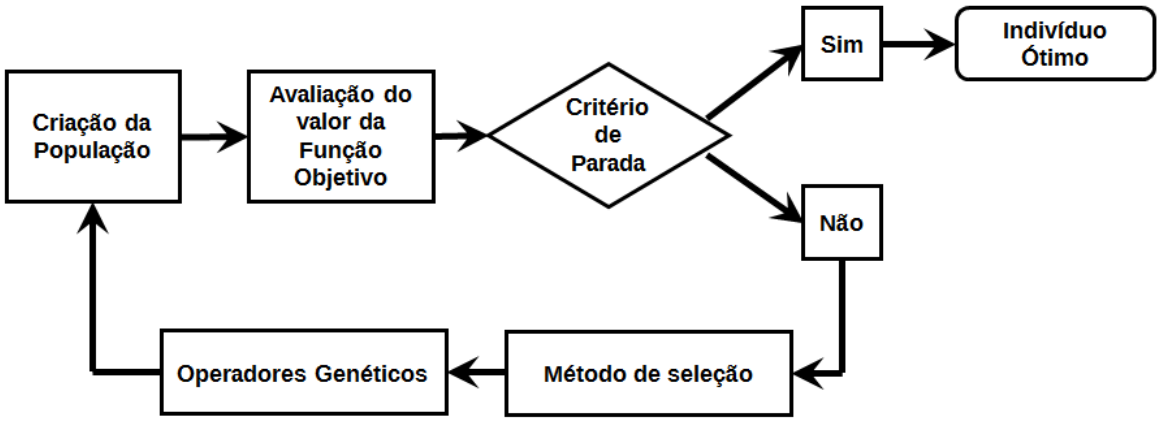

Figura 5.4: Fluxograma do Algoritmo Genético

A base de dados é inserida no algoritmo genético através de arquivos externos. Primeiramente, o código carrega as curvas de velocidade e de inclinação do trajeto e as curvas de potência e torque do veículo.

```
%% Selecionar base de dados

rota = input('Selecionar conjunto de dados: ');
if rota ==1
    load('speed1.mat')
    load('road_grade1.mat')
elseif rota ==2
    load('speed2.mat')
    load('road_grade2.mat')
elseif rota ==3
    load('speed3.mat')
    load('road_grade3.mat')
end
load('torque.mat')
load('power.mat')
```

A estrutura principal do Algoritmo Genético compreende um arquivo em MATLAB responsável por excecutar de maneira iterativa cada uma das funções que geram as populações iniciais, os mecanismos de seleção, os operadores genéticos, e a função objetivo, com a função de avaliar os indivíduos. O arquivo principal do algoritmo é apresentado resumidamente a seguir e em sua totalidade no Anexo deste relatório:

```
melhor = zeros(Nger,1);
medio = zeros(Nger,1);
```

```
pop = newpop(Nind,Rt,N,t_n);

for i = 1:Nger
    % Chamando a funcao fitness
    fit = fitness(pop,A,grade,T_co,bp)

    % Localizando o melhor individo
    [best,best_pos]= max(fit);
    melhor(i)= best;
    medio(i)= mean(fit);

    % Mecanismo de selecao
    seleciona=select(fit,pelit);

    % Operadores geneticos
    newpop=crossrc(pop,seleciona,pelit,pm);

    % Adeq. de valores
    newpop = adeq(newpop,Nind,Ncrom,dN,N);

    % Nova populacao
    pop = newpop;
end
```

5.5 CRIAÇÃO DA POPULAÇÃO INICIAL

A população inicial corresponde a um conjunto de indivíduos que serão avaliados na primeira iteração do algoritmo genético. Cada indivíduo gerado neste algoritmo corresponde a uma solução para as parametrizações para trocas de marchas, ou seja, corresponde a um vetor linha onde cada componente representa um valor de rotação parametrizado para realizar a troca de marchas.

$$I = \begin{bmatrix} N_1 & N_2 & N_3 & N_4 & N_5 & N_6 \end{bmatrix} \tag{5.1}$$

As rotações para trocas de marcha em cada indivíduo são geradas aleatoriamente dentro do intervalo de 1000 rpm a 2800 rpm, com valor incremental de 50 rpm. Estes valores são escolhidos com base nas curvas de desempenho do motor destes veículos: em geral, as curvas de potência e de torque para motores a diesel costumam apresentar seus valores mais altos dentro desta faixa de rotações.

O código para a criação da população inicial é:

```
% Nind = numero de individuos da populacao
% Ncrom = numero de cromossomos por individuo

function pop = newpop(Nind,Rt,N,t_n)
```

```
dN = 50;
N = 1000:dN:2800;
t_n = length(N);

%Rt = [6.75 3.6 2.13 1.39 1.00 0.78]
Ncrom = length(Rt);

pop = zeros(Nind,Ncrom);
for i = 1:Nind
    for j = 1:Ncrom
        % Escolhe-se um valor aleatorio inteiro qualquer.
        pos = round(rand*(t_n - 1)+ 1);
        % Define-se o elemento i,j da matriz fpn buscando
        % o elemento de posicao 'pos' no vetor N.
        pop(i,j) = N(pos);
    end
end
end
```

5.6 FUNÇÃO OBJETIVO

Cabe à função objetivo realizar testes com as características de cada indivíduo de cada população para avaliar o quão bem determinado indivíduo está em relação aos demais. A função testa cada um dos indivíduos utilizando os valores de suas componentes como os valores de parametrização para troca de marchas. O teste consiste em assumir que o ônibus está percorrendo o trajeto selecionado com a parametrização representada por aquele indivíduo sendo avaliado.

A cada instante do trajeto, são calculadas as forças resistivas, as rotações do motor, a potência e o torque disponível, a potência e o torque necessário para vencer o percurso, a aceleração máxima possível de ser alcançada e a taxa de consumo de combustível.

O desempenho do veículo não somente depende da parametrização das rotações como das relações de redução em cada marcha. Denotando por R_T o vetor que contém as seis relações de redução da transmissão do veículo, pode-se organizar as relações de redução em um vetor linha:

$$R_T = \begin{bmatrix} R_{t1} & R_{t2} & R_{t3} & R_{t4} & R_{t5} & R_{t6} \end{bmatrix} \tag{5.2}$$

A função objetivo avalia cada indivíduo de acordo com dois critérios: se há falha cinemática ou falha por falta de potência. A ocorrencia de falha significa que a parametrizão não atende pelo menos um destes critérios. Desta forma, penaliza-se duramente os indivíduos em que ocorre a falha, de modo a dificultar a propagação de suas características ao longo das gerações.

5.6.1 Verificação da Cinemática

Como o veículo inicia seu movimento partindo do repouso, assume-se que este parte da primeira marcha. Desta forma, seleciona-se a primeira razão de redução R_{t1}. A verificação de que a primeira marcha é adequada é feita comparando a rotação $N(i)$ calculada naquele instante com a rotação limite N_1 estabelecida para a primeira marcha. Como foi visto no Capítulo 2, a rotação é função das relações de transmissão e da velocidade de translação do veículo:

$$N(i) = 2660\frac{R_a R_t(i)}{r_r}v(i) \tag{5.3}$$

Caso a rotação $N(i)$ seja superior a rotação parametrizada N_1 para a primeira marcha, seleciona-se a segunda marcha e compara-se novamente a rotação $N(i)$ com a rotação parametrizada N_2, e assim sucessivamente, até que se alcance a sexta marcha.

Caso a rotação calculada $N(i)$ seja superior a rotação parametrizada N_6 para sexta marcha, considera-se que o veículo falhou. A mesma falha acontece se o veículo encontra-se em primeira marcha e a rotação calculada $N(i)$ é inferior a 800 rpm, valor de rotação considerado o mínimo para o bom funcionamento do veículo.

```
Nind = length(pop(:,1));
fit = zeros(Nind,1);
Rt = [6.75 3.6 2.13 1.39 1.00 0.78];
RT = [Rt1 Rt2 Rt3 Rt4 Rt5 Rt6];
Rt = RT(1);
L = length(t);

for k =1:Nind
    Nmax = pop(k,:);
    fail = 0;

    for i = 1:L
        Rt = RT(gear);
        Nt(i) = 2660*Ra*Rt*v(i)*3.6/rr;                    % [rpm]

        while Nt(i)> Nmax(gear)&& gear≠6
            gear = gear+1;
            if gear>6
                break
            end
            Rt = RT(gear);
            Nt(i) = 2660*Ra*Rt*v(i)*3.6/rr; % [rpm]

            if gear == 6 && Nt(i)> Nmax(6)
                fail = 1;
            end
        end

        if Nt(i) < 800 && gear≠1
            fail = 1;
        end
```

```
        if Nt(i) < 800
            Nt(i) = 800;
        end
```

5.6.2 Verificação da Potência

Uma vez que o aspecto cinemático das rotações e das marchas é verificado, a função objetivo avalia a potência e o torque necessários ao veículo para vencer o trajeto. Como visto no Capítulo 2, a resultante das forças resistivas atuantes no veículo F_{tot} em um dado instante de tempo é dada por:

$$F_{tot}(i) = F_{peso}(i) + F_{rol}(i) + F_{arrasto}(i) \tag{5.4}$$

$$F_{tot}(i) = mgsen\theta(i) + C_{rol}mg + \frac{1}{2}\rho C_D A v(i)^2 \tag{5.5}$$

O torque mínimo necessário ou requerido a ser aplicado nas rodas do veículo, em Nm, é:

$$T_{req}(i) = \frac{F_{tot}(i) r_r}{0.9 R_t(i) R_a} \tag{5.6}$$

E a potência necessária ou demandada pelo trajeto é calculada, em kW, a partir deste valor de torque:

$$P_{req}(i) = \frac{2\pi T_{req}(i) N(i)}{60000} \tag{5.7}$$

Conhecendo-se a potência necessária, a potência e torque disponíveis são avaliados em seguida, utilizando as curvas de desempenho do motor. Como mencionado anteriormente, estas curvas não puderam ser divulgadas neste trabalho a pedido do fabricante.

Estas curvas estão nos arquivos *power.mat* e *torque. mat* que são carregados no algoritmo logo de início. Ambos arquivos contêm os coeficientes de um ajuste polinomial da potência e do torque em função das rotações do motor. A cada instante avalia-se a potência disponível $P(N(i))$ e torque disponível $T(N(i))$ e compara-se com os valores de potência e torque solicitados no trajeto, denotados por $P_{req}(i)$ e $T_{req}(i)$, respectivamente.

Uma nova condição de falha é estabelecida: caso a potência disponível no motor seja menor que a potência requerida pelo trajeto, o veículo não é capaz de cumprir a tarefa e sua função fitness é duramente penalizada.

```
        Fi(i) = M*g*sin(grade(i));
        Frol(i) = M*g*Crol;
```

```
        Faero(i) = 0.5*rho_ar*Cd*A*v(i)^2;
        Ftot(i) = Fi(i) + Frol(i) + Faero(i);
        BTreq(i) = Ftot(i)*(rr/1000)/(Rt*Ra*0.9);
        BPreq(i) = 2*pi*BTreq(i)*Nt(i)/60000;
        dP(i) = BP(i) - BPreq(i);
        ac(i) = dP(i)*1000/(M*v(i));

        dBP(i)= BP(i) - BPreq(i);
        if dBP(i)≤ 0
            fail = 1;
        end
```

As acelerações contidas na terceira coluna da Tabela 5.2 são obtidas de acordo com a Equação 5.8. O cálculo das acelerações de acordo com esta equação pode gerar valores excessivos devido a própria imprecisão do método gráfico de obtenção de valores da curva de velocidades.

$$a_i = \frac{v(i+1) - v(i)}{t(i+1) - t(i)} \tag{5.8}$$

Desta forma, o próximo passo é corrigir quaisquer valores de acelerações excessivas que tenham sido carregadas no programa através da curva de velocidades. A partir da diferença de potência disponível e da exigida pelo trajeto, consegue-se calcular qual valor de aceleração o ônibus seria capaz de alcançar naquele instante. Assim, denotando por $dP(i)$ a diferença de potências no instante i:

$$dP(i) = P(i) - P_{req}(i) \tag{5.9}$$

A aceleração corrigida pode ser determinada em função desta diferença de potências. As grandezas estão todas em suas unidades padrão do SI:

$$a_c(i) = \frac{dP(i)}{mv(i)} \tag{5.10}$$

Caso o valor de aceleração corrigida $a_c(i)$ seja maior que o valor de aceleração na curva de velocidades $a(i)$, preserva-se o menor destes. Por fim, estabelece-se como potência mínima consumida a potência disponível a 800 rpm. Esta situação se dá ou quando o veículo encontra-se desacelerando num declive ou quando o veículo está parado.

Preocupa-se ainda em corrigir o efeito de acelerador atuado. Neste problema, considera-se sempre que a potência sendo consumida pelo motor é a maxima potência alcançada naquela rotação, ou seja, quando o acelerador do veículo está totalmente atuado. Desta forma, o consumo de potência é sobreestimado e consequentemente o consumo de combustível também. Considera-se que nas situações de potência P_{req} negativa a potência consumida $P(i)$ equivale à metade de seu valor naquela rotação. Se este valor for menor do que a potência mínima disponível a 800 rpm, conserva-se o ultimo valor.

```
        ac(i) = dP(i)*1000/(M*v(i));
            if ac(i) ≥ a(i)
            ac(i) = a(i);
        end

        if ac(i) < 0 && grade(i) < 0 && v(i) == 0
            N0 = 800;
            BP(i)= bp0 + bp1*N0 + bp2*N0^2 + bp3*N0^3 + bp4*N0^4 + ...
                bp5*N0^5 + bp6*N0^6 % = 45.0017 kW
        end

        if v(i)==0
            BPreq(i)= 0;
        end

        if BPreq(i) < 0
            aux(i) = BP(i);
            BP(i) = 0.5*aux(i);
            if BP(i) ≤ 45.0017;
                BP(i) = 45.0017;
            end
        end
```

5.6.3 Avaliação de Consumo

O próximo passo da função objetivo é avaliar o consumo de combustível que, de fato, irá medir quão boa é a parametrização das rotações em estudo. Desta forma, o atribui-se ao valor de fitness do indivíduo o próprio valor da economia de combustível durante o trajeto, medida em km/L, alcançada pela sua parametrização.

A taxa de consumo de combustível, em g/s, é avaliado de acordo com a Equação 3.6, que foi apresentada no Capítulo 3.

$$FR(i) = \frac{1}{LHV}\left(\frac{kN(i)V_D}{2000} + \frac{P(i)}{\eta}\right) \tag{5.11}$$

A taxa de consumo de combustível, conforme apresentada na Equação 5.11 é função da potência disponível no motor, em kW, e da rotação, em rps. O consumo volumétrico de combustível em cada intervalo de tempo do trajeto, dV, em litros, é calculado multiplicando a taxa de consumo instantânea $FR(i)$ por um incremento diferencial de tempo $dt(i)$ e dividindo-se pela densidade do diesel ρ_{diesel}.

$$dV(i) = \frac{FR(i)dt(i)}{\rho_{diesel}} \tag{5.12}$$

A economia de combustível f_e é avaliada calculando a distância total D percorrida no trajeto, em km, e dividindo pelo consumo de combustível total V_f, em litros.

$$D = \sum_{i=t_i}^{t_f} \frac{v(i)dt(i)}{1000} \tag{5.13}$$

$$V_f = \sum_{i=t_i}^{t_f} dV(i) \tag{5.14}$$

$$f_e = \frac{D}{V_f} \tag{5.15}$$

O próprio valor de f_e permite comparar os indivíduos entre si e decidir quem deles é o indivíduo mais econômico. Desta forma, é extremamente conveniente assumir este valor como o da função objetivo.

A implementação do consumo de combustível ao código é feita conforme mostrado a seguir:

```
            N_rps(i) = Nt(i)/60;
            FR(i) = (k*N_rps(i)*Vd/2000 + BP(i)/eta)*1/LHV;
            dV(i) = FR(i)*dt(i)/1000;

            if v(i)==0
                dV(i) = rho_diesel/3600;
            end
        end

        for i = 2:L
            dD(i) = v(i)*dt(i);
        end

        D = sum(dD)/1000;
        Vf = (sum(dV(i)/rho_diesel);
        fe = D/Vf;

        if fail == 1
            fe = fe/10000;
        end

        fit(k) = fe;

    end
```

Verifica-se nas últimas linhas do código a penalidade aplicada caso exista alguma falha durante o percurso. A ocorrência de qualquer uma das falhas citadas nesta seção ocasiona uma penalização no fitness do indivíduo. Esta penalização é feita dividindo-se a economia de combustível f_e por 10000.

Desta forma, os indivíduos que em algum momento da análise não passaram nos testes cinemáticos ou não tiveram potência o bastante para cumprir o trajeto são colocados numa situação mais crítica, de modo que as suas características dificilmente possam ser passadas adiante para as

próximas gerações.

Entretanto, estes indivíduos penalizados não são totalmente descartados: suas características podem ser recombinadas com as de outros indivíduos e gerar um novo indivíduo com fitness superior.

A próxima seção apresenta a implementação dos métodos de seleção, reprodução e mutação na criação de novas populações dentro do algoritmo genético.

5.7 CRIAÇÃO DE NOVAS POPULAÇÕES

As novas populações (ou gerações) são criadas selecionando-se indivíduos da população anterior. Para garantir a variabilidade genética entre populações consecutivas, utilizam-se os operadores genéticos.

5.7.1 Seleção

O mecanismo de seleção de indivíduos para as próximas gerações utiliza dois métodos: elitismo e seleção proporcional, ou roleta.

No elitismo seleciona-se uma quantidade de indivíduos mais adaptados da população atual para compor a próxima população ou geração. A partir de um valor de probabilidade de acontecer o elitismo p_{elit}, determina-se a quantidade de indivíduos n_{elit} que serão selecionados. Escolhe-se um valor de probabilidade de elitismo $p_{elit} = 0.15$.

O restante dos indivíduos da próxima população são selecionados pelo método da roleta.

```
function fselect = select(fitness,pelit)

pelit = 0.15;
Nind = length(fitness);
total = sum(fitness);
fitness = fitness/total;

% Elitismo
Nelit = round(Nind*pelit);
aux_fit = fitness;
fselect = zeros(Nind,1) ;

for i=1:Nelit
    [aux_max, aux_pos] = max(aux_fit);
    aux_fit(aux_pos)= 0;
    fselect(i)= aux_pos;

% Roleta
for i=Nelit+1:Nind
    soma=0;
    roleta=rand;
    for j=1:Nind
```

```
        soma = soma+fitness(j);
        if soma≥roleta
            fselect(i)=j;
            break;
        end
    end
end
end
```

5.7.2 Operadores Genéticos

A utilização de operadores genéticos na geração de novas populações tem como objetivo garantir variabilidade genética entre gerações. São aplicados dois operadores: Cruzamento de ponto único e Mutação.

O Cruzamento de ponto único é feito selecionando aleatoriamente dois indivíduos C_1 e C_2 e as suas características são combinadas de acordo com as Equações 5.16 e 5.17 para gerar dois novos indivíduos C_1' e C_2'. A constante k_a é selecionada aleatoriamente tal que $0 \leq k_a \leq 1$.

$$C_1' = k_a C_1 + (k_a - 1)C_2 \tag{5.16}$$

$$C_2' = (1 - k_a)C_1 + k_a C_2 \tag{5.17}$$

Ainda é incluído no código o mecanismo de Mutação, onde é selecionado um valor aleatório entre 0 e 1, que é posteriormente comparado com a probabilidade de ocorrer de mutação p_m. Caso este valor aleatório seja menor que a probabilidade de mutação, altera-se o valor das componentes dos indivíduos em até 5%. Caso contrário, utiliza-se apenas o operador Cruzamento.

A implementação é mostrada abaixo:

```
Nind = length(seleciona);
Lind = length(pop(1,:));
Nelit = round(Nind*pelit);
i = 1;

while i ≤ Nind
    vpai = round(rand*(Nind-1)+1);
    vmae = round(rand*(Nind-1)+1);
    indpai = seleciona(vpai);
    indmae = seleciona(vmae);

    pai = pop(indpai,:);
    mae = pop(indmae,:);

    cp = round(rand*(Lind-1)+1);
    rand1 = rand
    rand2 = rand;
```

```
    rand3 = rand;
    rand4 = rand;

    % Cross-over, mutacao
    if rand4 ≤ pm
        filho_1 = (rand1*pai+(1-rand1)*mae)*(0.95+(rand2*0.1));
        filho_2 = (rand1*pai+(1-rand1)*mae)*(0.95+(rand3*0.1));
    else

    % Cross-over apenas
        filho_1 = rand1*pai+(1-rand1)*mae;
        filho_2 =(1-rand1)*pai+rand1*mae;
    end

    fcross(variaveli,:) = filho_1;
    fcross(variaveli+1,:) = filho_2;
    variaveli=variaveli+2;
end

for i=1:Nelit
    fcross(i,:)= pop(seleciona(i),:);
end
end
```

5.7.3 Adequação de Valores

A adequação de valores é o último passo para a criação de uma nova população. A aplicação deste mecanismo se faz necessária pois após cruzamentos e mutações, os valores das rotações podem estar com números significativos demais, fora da precisão dos instrumentos de medição de rotações.

Os valores de rotação contidos em cada indivíduo da nova população são lidos e arredondados para o valor mais próximo admissível.

```
function newpop = adeq(newpop,Nind,Ncrom,dN,N)

for i = 1:Nind
    for j = 1: Ncrom
        pos = round((newpop(i,j) - N(1))/dN + 1);
        if pos ≤ 0
            pos = 1;
        end
        if pos > 37
            pos = 37;
        end
        newpop(i,j) = N(pos);
    end
end
end
```

5.8 AVALIAÇÃO DAS EMISSÕES DE POLUENTES

Ao final da rotina de otimização, os valores de tempo, velocidade, acelerações corrigidas, inclinações, taxa de consumo de combustível e rotações do motor são exportados para o programa que avalia as emissões. Como as emissões são funções diretas do consumo de combustível, um indivíduo otimizado para consumo mínimo implica em um indivíduo otimizado para emissões de poluentes mínimas.

Utiliza-se a metodologia de análise de poluentes apresentada no Capítulo 3. Primeiramente, calcula-se a Potência Específica Veícular - VSP em cada instante do trajeto considerado:

$$VSP(t_i) = v(t_i)(a(t_i) + gsen\theta(t_i) + \psi) + \zeta v(t_i)^3 \tag{5.18}$$

Os valores do VSP são então agrupados em modos para determinação das emissões. Diferentemente dos modos apresentados no Capítulo 3, que foram obtidos por faixas de potência, consideram-se modos de acordo com o apresentado por Frey et al. (2002), onde o agrupamento da potência específica, e consequentemente de emissões, é feito de acordo com condições de velocidade e aceleração. Como os dados que compoem as curvas de velocidade dificilmente apresentavam velocidade zero, mas valores muito próximos de zero, a forma de agrupar estes modos feita neste trabalho é mostrada na Tabela 5.4.

Tabela 5.4: Condições para agrupamento em Modos

Modo		**Condição**
1	Veículo Parado	$v \leq 0.005$ e $a \leq 0.005$
2	Velocidade de Cruzeiro	$v \neq 0$ e $a \leq 0.05$
3	Desaceleração	$v \neq 0$ e $a < 0$
4	Aceleração	$v \neq 0$ e $a > 0$

Definidos os modos, calcula-se a potência média e a taxa de consumo médio de combustível em cada um destes modos. Também são registrados a quantidade de tempo que o veículo encontra-se em cada modo. A potência média é simplesmente calculada pelo produto da massa do veículo e potência específica. As taxas de emissões, em g/s, são então avaliadas de acordo com as equações:

$$ECO = a_{CO}FR + r_{CO} \tag{5.19}$$

$$EHC = a_{HC}FR + r_{HC} \tag{5.20}$$

$$ENO = a_{NO}FR + r_{NO} \tag{5.21}$$

As regulações ambientais estabelecem os limites de emissões de poluentes na unidade g/kWh. Desta forma, para se estabelecer um comparativo, calcula-se as emissões nas unidades adequadas. As emissões totais de um determinado poluente no trecho considerado são dadas pela soma do produto da taxa em cada modo pelo tempo gasto, em segundos, em cada modo. Na Equação 5.22 é mostrado o cálculo das emissões totais de CO, em g. O procedimento para os outros poluentes é exatamente o mesmo.

$$ECO_{total} = t_1ECO_1 + t_2ECO_2 + t_3ECO_3 + t_4ECO_4 \tag{5.22}$$

Calcula-se a potência média em kW no trajeto e multiplica-se pelo tempo total do trajeto, em horas. Desta forma, obtém-se a energia em kWh gasta durante a viagem.

$$E_{kWh} = P_{med}t_f \tag{5.23}$$

As emissões em g/kWh serão calculadas dividindo-se as emissões totais pela energia gasta durante a viagem:

$$e_{CO} = \frac{ECO_{total}}{E_{kWh}} \tag{5.24}$$

Desta forma, as emissões podem ser avaliadas e comparadas com as regulamentações ambientais vigentes.

6 RESULTADOS

Neste Capítulo apresenta-se os resultados do código de otimização implementado. Foram considerados três diferentes trajetos para poder verificar a influência destes nas parametrizações de rotação para cada situação.

Com a finalidade de verificar em cada trajeto a melhoria causada pela otimização no consumo do veículo, a função objetivo é calculada considerando a parametrização das rotações que é utilizada nos ônibus da Expresso São José. Desta forma, pode-se comparar os valores otimizados com o valor de consumo de um caso não-ótimo.

6.1 TRAJETO 1

O Trajeto 1 corresponde a linha de ônibus 0.044, que conecta o Condomínio Sol Nascente, Setor "O"e Taguatinga Centro. A linha de ônibus é mostrada na Figura 6.1. Este trajeto possui pouco mais de 50 km em sua totalidade. As diferenças de elevação, as curvas de inclinação e de velocidades são mostradas na Figura 6.2.

Figura 6.1: Trajeto 1 - Linha de ônibus 0.044

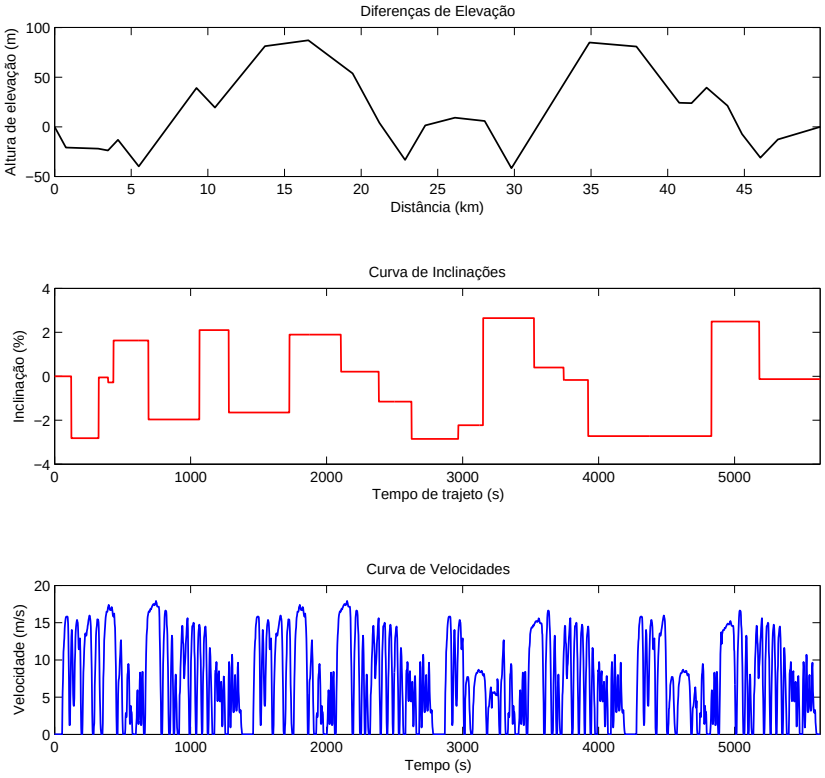

Figura 6.2: Trajeto 1 - Elevação, Inclinação e Velocidade

Denota-se por f_{e0} o valor da economia de combustível do veículo rodando com a parametrização não-ótima da empresa. A parametrização e economia de combustível são mostrados na Tabela 6.1.

Tabela 6.1: Parametrização Padrão para o Trajeto 1

Parametrização das Rotações					
N_1	N_2	N_3	N_4	N_5	N_6
1800 rpm	2200 rpm	2000 rpm	2000 rpm	1900 rpm	1900 rpm
Economia de Combustível					
f_{e0} = 1,501 km/L					

6.1.1 Parametrização Otimizada

A parametrização ótima obtida para o Trajeto 1 é mostrada na Tabela 6.2. Este resultado foi alcançado após um número de gerações n_{ger} = 100 com um número de indivíduos n_{ind} = 100 em cada população. O tempo de consumido pela execução do algoritmo foi de aproximadamente 18 minutos.

Tabela 6.2: Parametrização Otimizada para Trajeto 1

Parametrização das Rotações					
N_1	N_2	N_3	N_4	N_5	N_6
1700 rpm	1500 rpm	1300 rpm	1200 rpm	1900 rpm	1850 rpm
Economia de Combustível					
f_e = 1,7427 km/L					

6.1.2 Evolução da Função Fitness

A evolução da função fitness com o passar das gerações pode ser verificada na Figura 6.3. Observa-se que o valor médio da função fitness varia com as gerações devido ao aparecimento de indivíduos que são incapazes de cumprir o trajeto.

Como visto no Capítulo 5, os indivíduos incapazes de cumprir o trajeto, seja por falha cinemática ou por falta potência, são duramente penalizados e seu valor de fitness é prejudicado. A presença destes indivíduos nas populações ocasiona o abaixamento da média da função fitness naquela geração. Entretanto, observa-se que o valor do fitness máximo com o passar das gerações foi crescente.

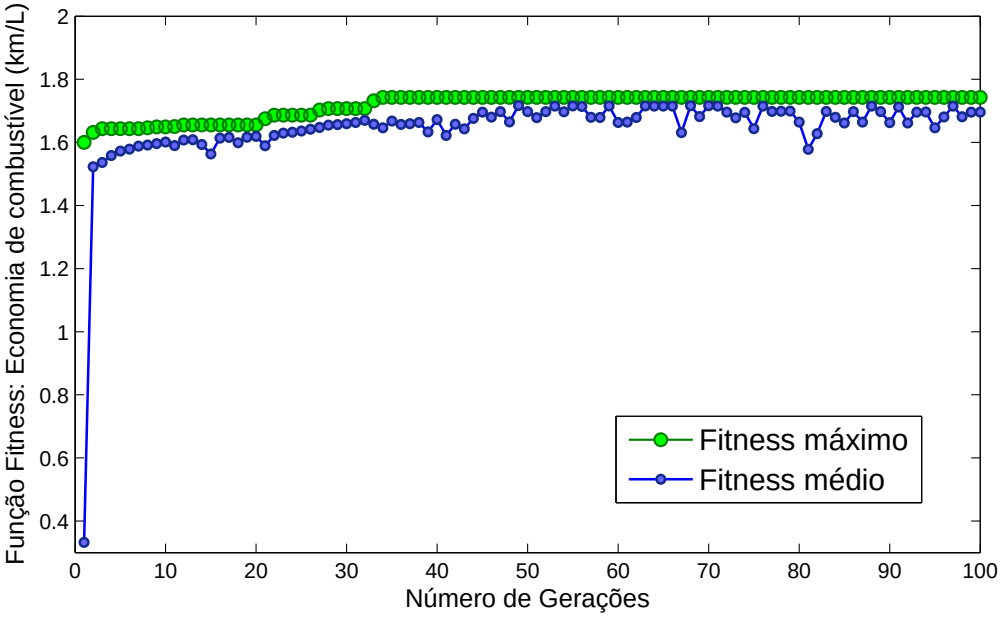

Figura 6.3: Trajeto 1 - Função Fitness ao longo das gerações

6.1.3 Análise de Poluentes

A análise de emissões de poluentes é feita considerando a parametrização ótima encontrada para o Trajeto 1. As taxas de poluentes em cada modo e as emissões totais são mostrados na Tabela 6.3 e comparados com os valores limites estabelecidos pela regulação do Proconve. Nota-se que as emissões totais durante o trajeto encontram-se abaixo dos valores limites estabelecidos pela norma

Tabela 6.3: Emissões de Poluentes no Trajeto 1

Poluente	**Taxa de Emissões**		**Emissões totais**	**Limites Permitidos**
	Modo	Taxa		**(Proconve P7/ Euro V)**
CO	1	0,0151 g/s	0,0011 g/kWh	1,5 g/kWh
	2	0,0249 g/s		
	3	0,0208 g/s		
	4	0,0220 g/s		
NO	1	0,0759 g/s	0,0060 g/kWh	2,0 g/kWh
	2	0,1347 g/s		
	3	0,1100 g/s		
	4	0,1174 g/s		
HC	1	0,0073 g/s	0,0005 g/kWh	0,46 g/kWh
	2	0,0106 g/s		
	3	0,0092 g/s		
	4	0,0096 g/s		

Pode-se visualizar a distribuição das taxas de emissões de poluentes com relação aos modos de agrupamento na Figura 6.4.

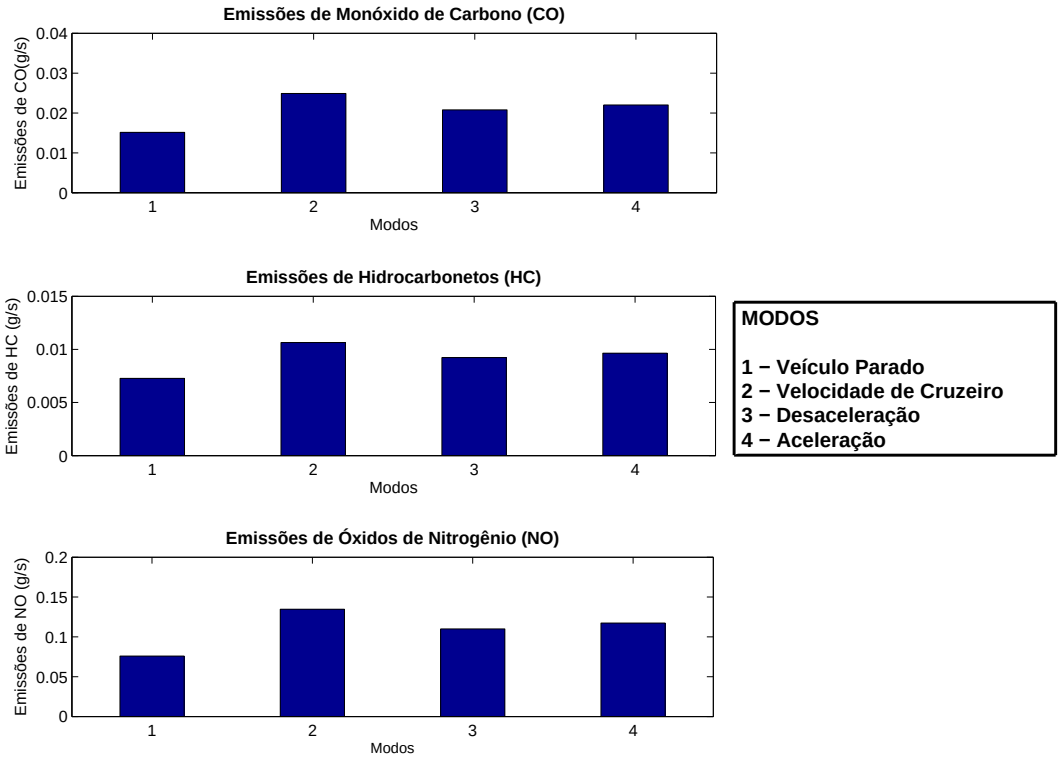

Figura 6.4: Trajeto 1 - Emissões de Poluentes

6.2 TRAJETO 2

O Trajeto 2 corresponde a linha de ônibus 0.957, que conecta o setor 'P' Norte até Vicente Pires. O traçado do trajeto é mostrado na Figura 6.5. A distância percorrida neste trajeto é de aproximadamente 60 km. As diferenças de elevação, as curvas de inclinação e de velocidades são mostradas na Figura 6.6.

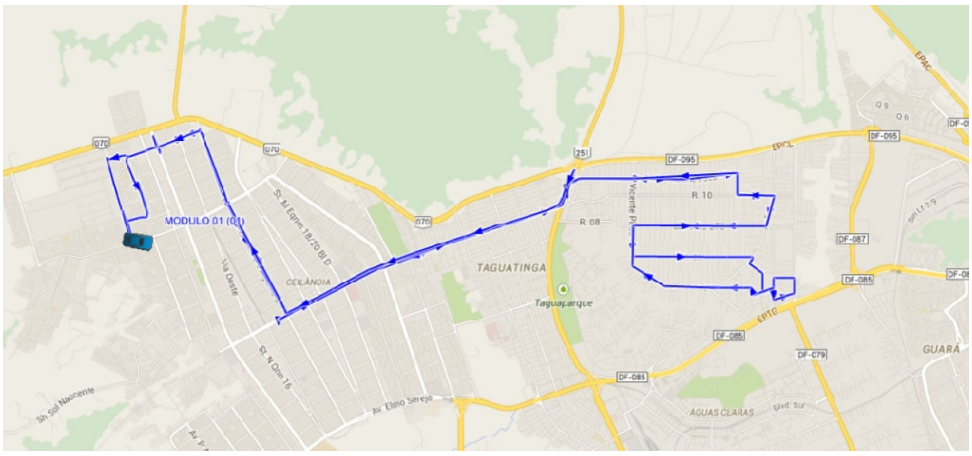

Figura 6.5: Trajeto 2 - Linha de ônibus 0.957

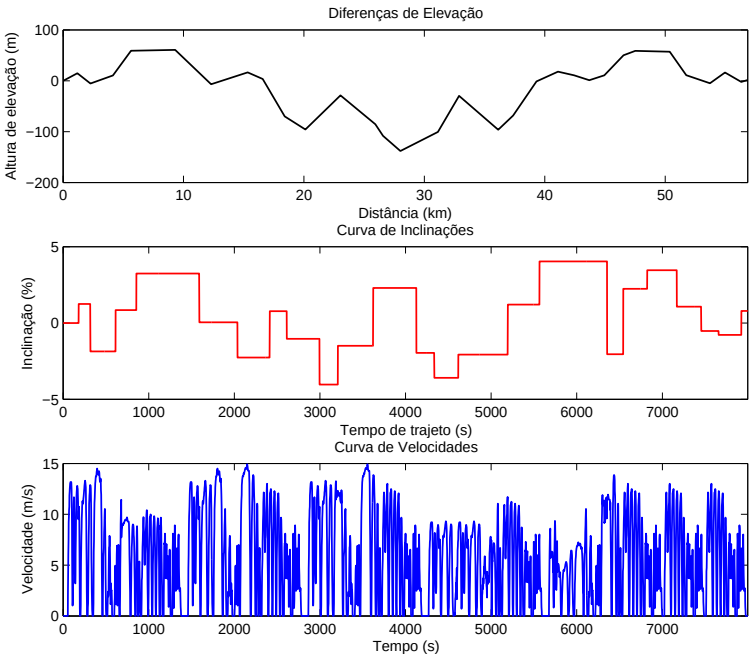

Figura 6.6: Trajeto 2 - Elevação, Inclinação e Velocidade

A economia de combustível do veículo rodando com a parametrização não-ótima da empresa é mostrada na Tabela 6.4.

Tabela 6.4: Parametrização Padrão para o Trajeto 2

Parametrização das Rotações					
N_1	N_2	N_3	N_4	N_5	N_6
1800 rpm	2200 rpm	2000 rpm	2000 rpm	1900 rpm	1900 rpm
Economia de Combustível					
f_{e0} = 1,1180 km/L					

6.2.1 Parametrização Otimizada

A parametrização ótima obtida para o Trajeto 2 é mostrada na Tabela 6.5. Este resultado foi alcançado após um número de gerações n_{ger} = 100 com um número de indivíduos n_{ind} = 100 em cada população. O tempo de consumido pela execução do algoritmo foi de aproximadamente 28 minutos.

Tabela 6.5: Parametrização Otimizada para Trajeto 2

Parametrização das Rotações					
N_1	N_2	N_3	N_4	N_5	N_6
1650 rpm	1400 rpm	1250 rpm	2100 rpm	1350 rpm	2250 rpm
Economia de Combustível					
f_e = 1,3015 km/L					

6.2.2 Evolução da Função Fitness

A evolução da função fitness com o passar das gerações pode ser verificada na Figura 6.7. As flutuações nos valores do fitness médio verificada para este caso se justificam pelo mesmo motivo verificado no Trajeto 1. Mesmo com variações na média, observa-se sempre o valor máximo crescendo até atingir a convergência com o passar das gerações.

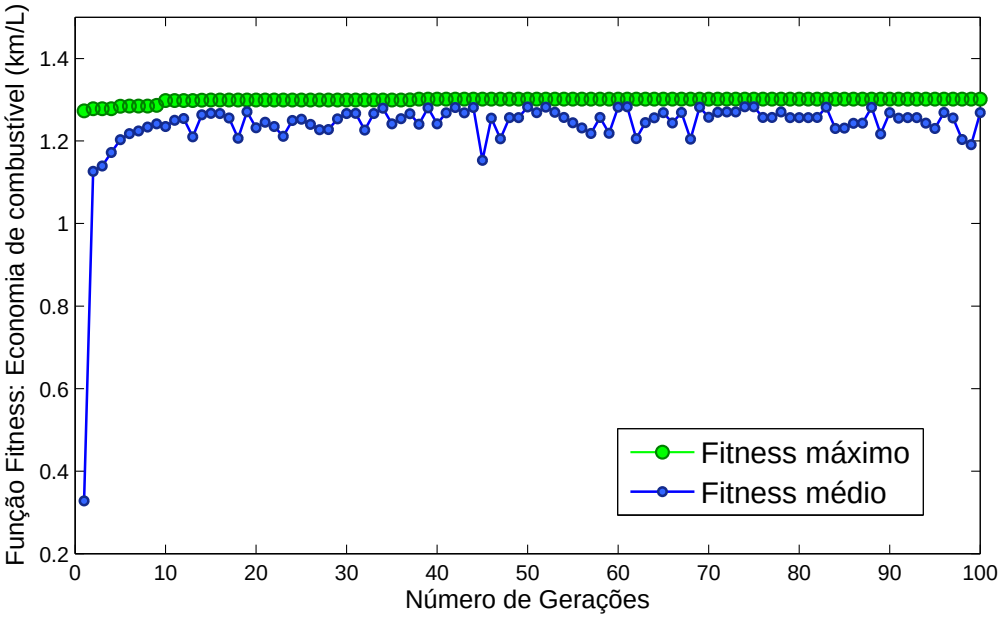

Figura 6.7: Trajeto 2 - Função Fitness ao longo das gerações

6.2.3 Análise de Poluentes

A análise de emissões de poluentes é feita considerando a parametrização ótima encontrada para o Trajeto 2. As taxas de poluentes em cada modo e as emissões totais são mostrados na Tabela 6.6 e comparados com os valores limites estabelecidos pela regulação do Proconve. Nota-se que as emissões totais durante o trajeto encontram-se abaixo dos valores regulamentados.

Tabela 6.6: Emissões de Poluentes no Trajeto 2

Poluente	**Taxa de Emissões**		**Emissões totais**	**Limites Permitidos**
	Modo	Taxa		**(Proconve P7/ Euro V)**
CO	1	0,0151 g/s	0,0011 g/kWh	1,5 g/kWh
	2	0,0241 g/s		
	3	0,0218 g/s		
	4	0,0236 g/s		
NO	1	0,0759 g/s	0,0060 g/kWh	2,0 g/kWh
	2	0,1302 g/s		
	3	0,1158 g/s		
	4	0,1268 g/s		
HC	1	0,0073 g/s	0,000493 g/kWh	0,46 g/kWh
	2	0,0104 g/s		
	3	0,0096 g/s		
	4	0,0102 g/s		

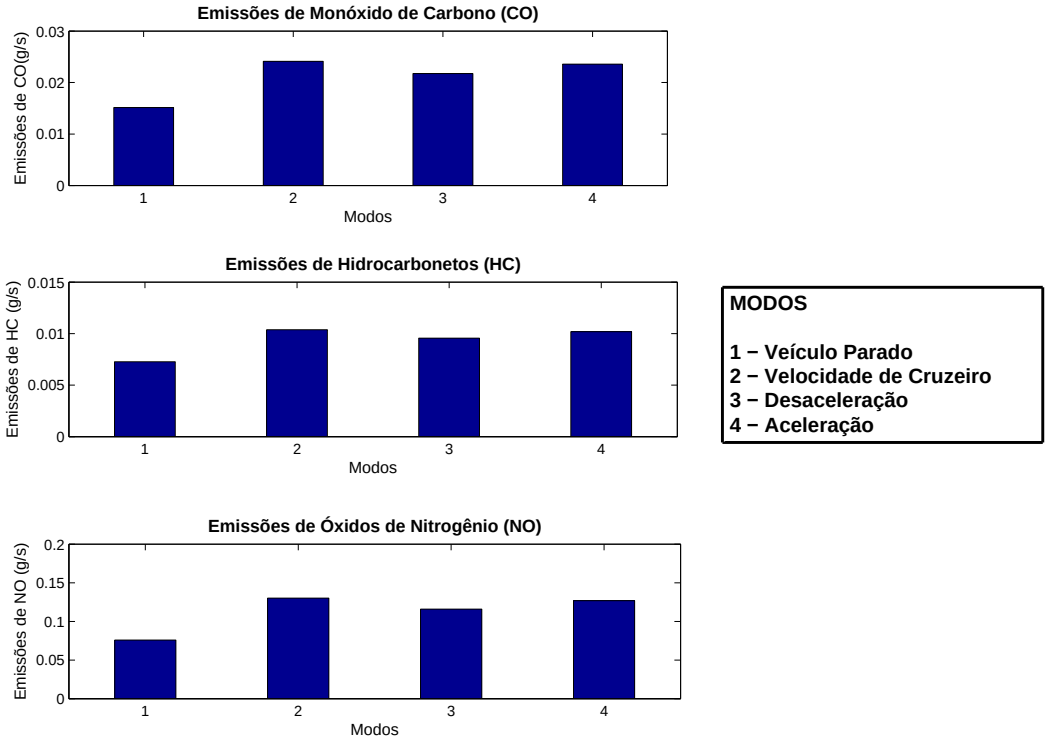

Figura 6.8: Trajeto 2 - Emissões de Poluentes

6.3 TRAJETO 3

O Trajeto 3 corresponde a linha de ônibus 0.886, que conecta o Riacho Fundo I ao Setor "O". O traçado do trajeto é mostrado na Figura 6.9. A distância percorrida neste trajeto é de 25 km. As diferenças de elevação, as curvas de inclinação e de velocidades são mostradas na Figura 6.10.

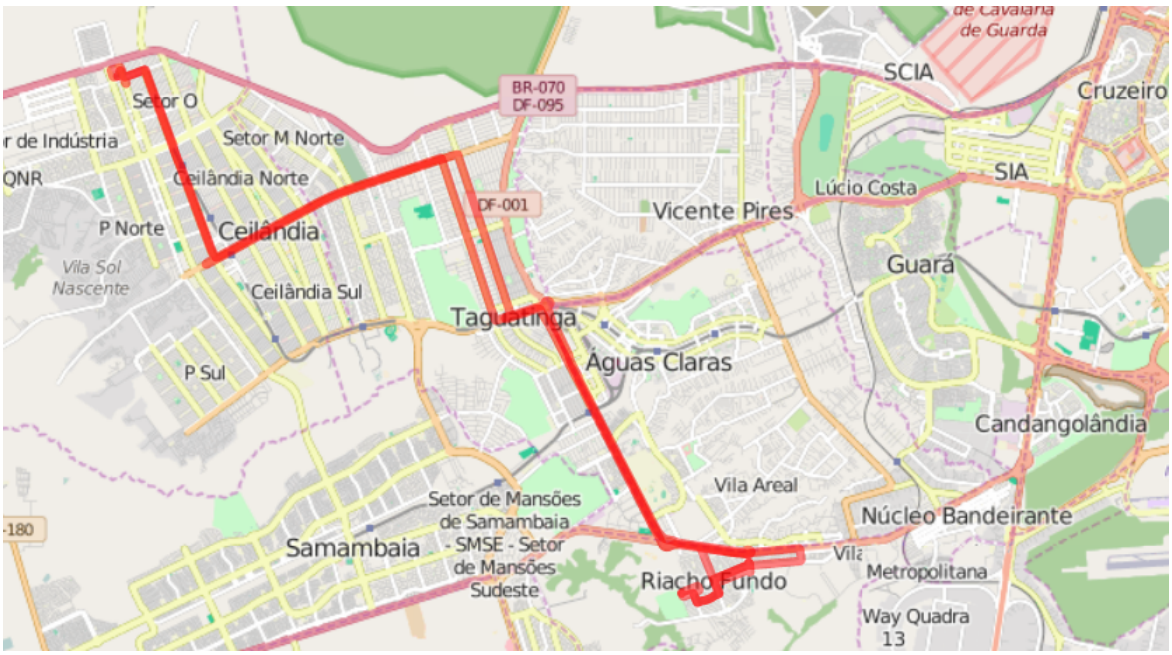

Figura 6.9: Trajeto 3 - Linha de Ônibus 0.886

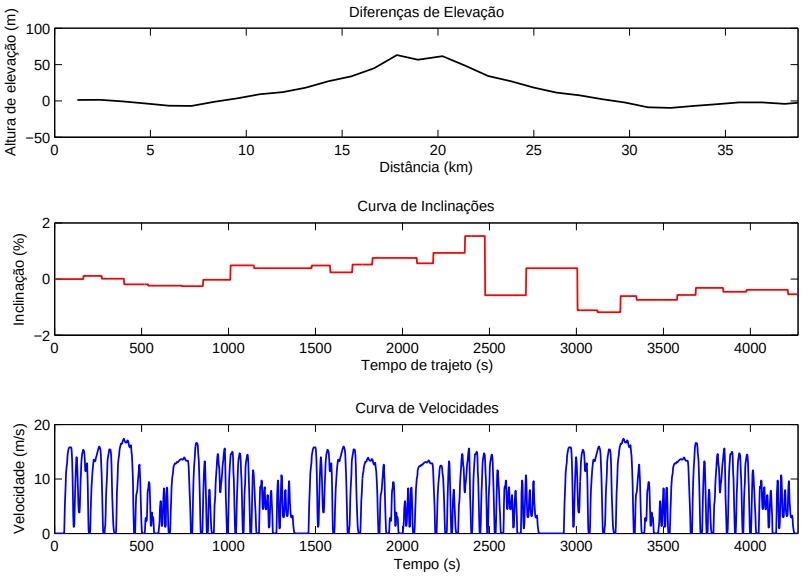

Figura 6.10: Trajeto 3 - Elevação, Inclinação e Velocidade

A economia de combustível do veículo rodando com a parametrização não-ótima da empresa é mostrada na Tabela 6.7.

Tabela 6.7: Parametrização Padrão para o Trajeto 3

Parametrização das Rotações					
N_1	N_2	N_3	N_4	N_5	N_6
1800 rpm	2200 rpm	2000 rpm	2000 rpm	1900 rpm	1900 rpm
Economia de Combustível					
f_{e0} = 1,2322 km/L					

6.3.1 Parametrização Otimizada

A parametrização ótima obtida para o Trajeto 3 é mostrada na Tabela 6.8. Este resultado foi alcançado após um número de gerações n_{ger} = 200 com um número de indivíduos n_{ind} = 50 em cada população. O tempo de consumido pela execução do algoritmo foi de aproximadamente 14 minutos.

Tabela 6.8: Parametrização Otimizada para Trajeto 3

Parametrização das Rotações					
N_1	N_2	N_3	N_4	N_5	N_6
1500 rpm	1600 rpm	1250 rpm	1150 rpm	1200 rpm	2000 rpm
Economia de Combustível					
f_e = 1,6127 km/L					

6.3.2 Evolução da Função Fitness

A evolução da função fitness com o passar das gerações pode ser verificada na Figura 6.11. As flutuações nos valores do fitness médio verificada para este caso se justificam pelos mesmos motivos verificados nos casos anteriores. Mesmo com variações na média, observa-se sempre o valor máximo crescendo até atingir a convergência com o passar das gerações.

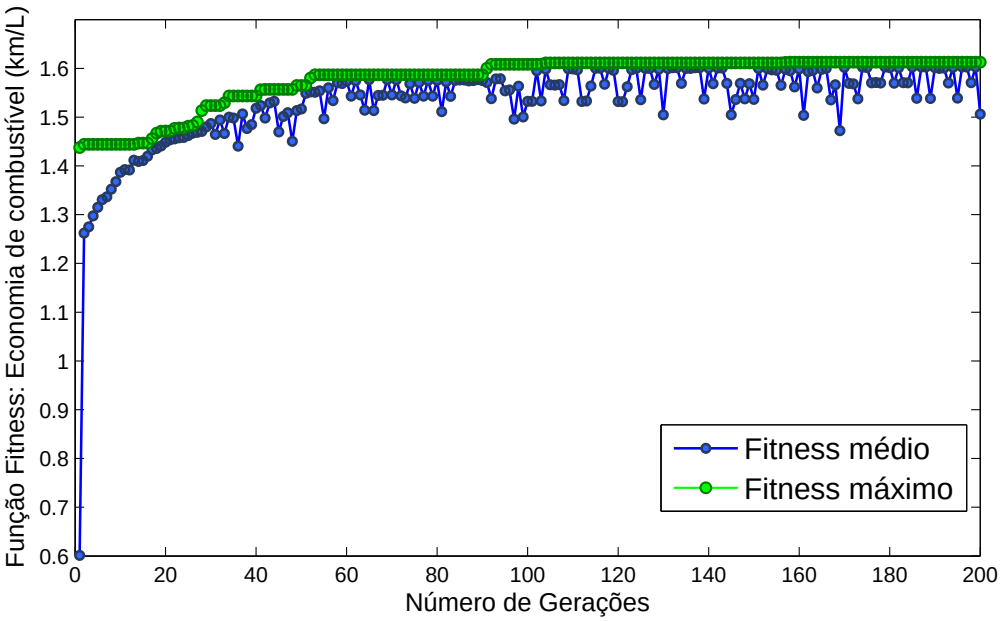

Figura 6.11: Trajeto 3 - Função Fitness ao longo das gerações

6.3.3 Análise de Poluentes

A análise de emissões de poluentes é feita considerando a parametrização ótima encontrada para o Trajeto 3. As taxas de poluentes em cada modo e as emissões totais são mostrados na Tabela 6.9 e comparados com os valores limites estabelecidos pela regulação do Proconve. Nota-se que as emissões totais durante o trajeto encontram-se abaixo dos valores limites estabelecidos pela norma. A distribuição das taxas de emissões de poluentes com relação aos modos de agrupamento é mostrada na Figura 6.12.

Tabela 6.9: Emissões de Poluentes no Trajeto 3

Poluente	**Taxa de Emissões**		**Emissões totais**	**Limites Permitidos**
	Modo	Taxa		**(Proconve P7/ Euro V)**
CO	1	0,0151 g/s	0,0011 g/kWh	1,5 g/kWh
	2	0,0267 g/s		
	3	0,0228 g/s		
	4	0,0242 g/s		
NO	1	0,0759 g/s	0,0060 g/kWh	2,0 g/kWh
	2	0,1459 g/s		
	3	0,1219 g/s		
	4	0,1304 g/s		
HC	1	0,0073 g/s	0,000487 g/kWh	0,46 g/kWh
	2	0,0113 g/s		
	3	0,0099 g/s		
	4	0,0104 g/s		

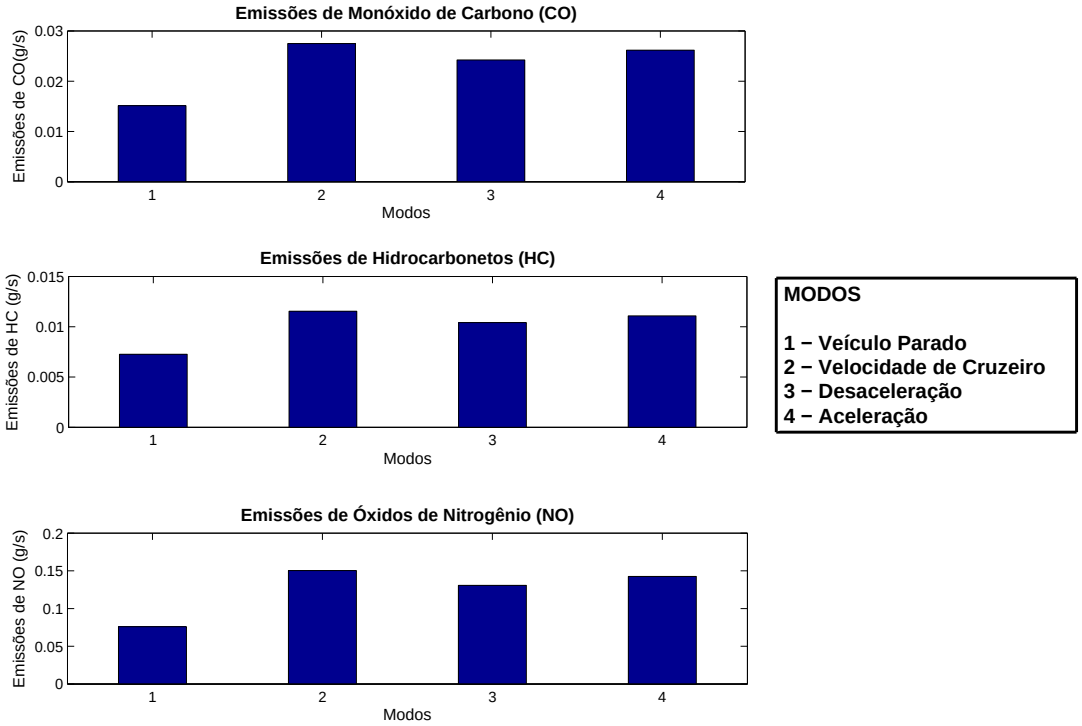

Figura 6.12: Trajeto 3 - Emissões de Poluentes

6.4 CRITÉRIOS DE CONVERGÊNCIA

Como apresentado na Seção 4.7 do Capítulo 4, o critério de parada de um algoritmo genético é feito baseado ou num erro máximo admissível, pela variabilidade genética da população, mantendo um número fixo de gerações ou mesmo com uma combinação destes.

Para cada um dos três casos apresentados e otimizados neste trabalho o controle da convergência foi feito testando-se várias combinações de número de indivíduos n_{ind} e número de gerações n_{ger}. Inicialmente, avaliou-se os três casos com o mesmo número de indivíduos e gerações. Porém, o que foi verificado quando se testou mais combinações para cada caso é que não necessariamente a parametrização ótima de cada trajeto foi encontrada com o mesmo número de indivíduos e gerações.

Apesar de a função objetivo essencialmente avaliar um ônibus percorrendo uma rota e buscar a melhor parametrização das rotações para esta rota em particular, cada rota considerada impõe um problema novo a ser otimizado, com diferentes condições de trajeto, quantidades diferentes de pontos a serem avaliados, que afetam diretamente no tempo de processamento.

Apresenta-se na Tabela 6.10 a influência das combinações de alguns números de gerações e indivíduos na parametrização e no valor da função fitness.

Tabela 6.10: Influência do número de gerações e indivíduos na Função Fitness

Rota	Combinação	Parametrização						Fitness	Tempo
1	$n_{ind} = 50$ $n_{ger} = 200$	1450	2100	1500	1150	2200	1850	1,6662 km/L	1034 s
1	$n_{ind} = 100$ $n_{ger} = 50$	1450	2050	1100	1150	2650	1900	1,7042 km/L	2614 s
1	$n_{ind} = 100$ $n_{ger} = 100$	1700	1500	1300	1200	1900	1850	1,7427 km/L	1081 s
2	$n_{ind} = 100$ $n_{ger} = 50$	1500	1350	1400	1900	1650	1500	1,2868 km/L	1072 s
2	$n_{ind} = 50$ $n_{ger} = 200$	1650	1350	2150	1900	2100	1100	1,1947 km/L	2052 s
2	$n_{ind} = 100$ $n_{ger} = 100$	1650	1400	1250	2100	1350	2250	1,3015 km/L	1678 s
3	$n_{ind} = 100$ $n_{ger} = 200$	2000	1600	1250	1150	1100	1550	1,6055 km/L	1266 s
3	$n_{ind} = 200$ $n_{ger} = 50$	1800	1700	1700	1150	1300	1800	1,5172 km/L	1500 s
3	$n_{ind} = 50$ $n_{ger} = 200$	1500	1600	1250	1150	1200	2000	1,6127 km/L	839 s

Os resultados na Tabela 6.10 mostram que a escolha do número de indivíduos e de gerações influenciam no indivíduo ótimo encontrado ao final da rotina. A quantidade de indivíduos na população inicial vai influir diretamente na variabilidade genética desta.

Uma população pequena está mais sujeita aos efeitos de baixa variabilidade. Por consequência, a atuação dos operadores genéticos acaba não resultando em indivíduos cuja função fitness se sobressaia significativamente sobre os demais, de modo que o resultado entregue pelo AG após todas as iterações é o valor ótimo, porém, não necessariamente o ótimo global.

Se maiores números de indivíduos proporcionam maior variabilidade genética na popula-

ção, o número de gerações permite a maior atuação dos operadores genéticos de modo que se possa obter novos indivíduos com fitness mais elevados. Observou-se nas curvas de evolução da função fitness mostradas nas Figuras 6.3, 6.7 e 6.11 que a partir da geração de número 40 a otimização já encontrava o indivíduo com a maior avaliação na função fitness.

Iniciando-se a otimização utilizando uma quantidade comum de indivíduos e gerações para os três casos, e considerando as especificidades de cada caso em particular, variou-se o o número de indivíduos e gerações baseado na convergência dos resultados. Testou-se vários números de gerações até que fosse verificado uma quantidade a partir da qual o aumento número de gerações apenas incrementa o custo computacional de execução da rotina, sem maiores mudanças nos valores de economia de combustível encontrados. Desta maneira, define-se o critério de parada da otimização.

6.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Aplicou-se a otimização via algoritmos genéticos para encontrar uma parametrização de rotações para troca de marchas de ônibus urbanos que fornecesse ao mesmo tempo o menor consumo de combustível possível (ou a maior economia de combustível possível) e as menores taxas de emissões de poluentes.

Testou-se três diferentes trajetos com diferentes inclinações e velocidades desenvolvidas. O que se observa é uma melhoria nos resultados para o consumo de combustível e consequentemente o de emissões, uma vez que este último é modelado como uma função do consumo.

Verifica-se que a troca de uma parametrização padrão para todos os veículos para uma parametrização otimizada para as especificidades de cada trajeto pode melhorar a economia de combustível em 16% nos Trajetos 1 e 2 e aproximadamente 30% no Trajeto 3, como pode ser verificado na Tabela 6.11.

Tabela 6.11: Avaliação Final na Melhoria da Economia de Combustível

Trajeto	Economia não-ótima	Economia otimizada	Melhoria
1	1,5010 km/L	1,7427 km/L	16,1 %
2	1,1180 km/L	1,3015 km/L	16,4 %
3	1,2322 km/L	1,6127 km/L	30 %

Os resultados sugerem que pode ser lucrativo do ponto de vista da empresa manter parametrizações diferentes para trajetos diferentes, uma vez que as parametrizações encontradas são bastante distintas entre si.

A modelagem considerada neste relatório considera uma situação onde o acelerador dos

veículos é 100% atuado. Esta aproximação não condiz fielmente com a realidade por superestimar o consumo de combustível. A utilização de uma curva de velocidades originária de um ônibus que não é o mesmo veículo testado neste trabalho também pode influir nas diferenças encontradas, uma vez que o ônibus da AATA pode ter potência mais elevada e um estilo de condução bastante distinto do praticado nas rotas modeladas neste problema.

Por esta razão, os resultados obtidos com as otimizações são comparados com os resultados utilizando a parametrização não-ótima da empresa e não com os valores reais de consumo disponibilizados pela Expresso São José (Lopes, 2014).

7 CONCLUSÕES

Ao término deste trabalho, verifica-se a vantagem da utilização dos algoritmos genéticos para encontrar soluções ótimas de problemas que dependem de diversas variáveis. No problema de encontrar uma parametrização ótima para as rotações dos ônibus, o algoritmo se mostra uma ferramenta bastante eficiente pois é capaz analisar diversas possíveis soluções do problema com relativa rapidez e baixo custo computacional.

Na prática da empresa operadora de ônibus, os veículos são todos configurados com a mesma parametrização independentemente do trajeto, e os resultados verificados neste projeto mostram que o valor ótimo de consumo pode diferir de acordo com o trajeto. Dentro da metodologia aqui apresentada, encontrou-se três parametrizações distintas para três diferentes tipos de rotas. Verificou-se que os menores valores de consumo de combustível e consequentemente os menores valores de emissões de poluentes ocorrem em parametrizações diferentes para cada trajeto considerado.

Verificou-se o ganho percentual alcançado na otimização. Foram estudados trajetos bastante distintos para poder verificar a influência destes nas parametrizações. No entanto, a verificação de mais rotas parecidas entre si poderia ser benéfica para encontrar uma parametrização que otimizasse a média destas rotas, e não necessariamente cada uma delas em particular. Na situação da empresa que opera em diversos trajetos, encontrar parametrizações que otimizem um conjunto de rotas parecidas entre si poderia ser uma estratégia mais interessante do que otimizar cada veículo para cada trecho operado.

Em termos de modelagem do problema, este trabalho avançou alguns passos em relação aos trabalhos anteriores: considerou-se uma condição onde os valores de inclinação são variáveis com o tempo de viagem, o que implica uma situação mais próxima das cargas dinâmicas atuando nos ônibus reais. O padrão utilizado nas curvas de velocidades foi obtido experimentalmente em testes de ônibus reais, e, ainda que este tenha sido retirado da literatura disponível, representa de maneira adequada as velocidades alcançadas por um ônibus percorrendo uma rota urbana.

A economia de combustível apresentou significativa melhoria nos casos que foram otimizados. Embora os valores encontrados para a economia de combustível estejam abaixo da média real da economia de combustível dos ônibus reais, a modelagem aqui estabelecida considera no cálculo do consumo a situação em que o acelerador está totalmente atuado e a potência é a máxima possível encontrada naquela faixa de rotação. Por este motivo, antes de cada otimização, verificou-se qual o consumo quando se considera a parametrização real dos veículos utilizados pela empresa.

A metodologia para avaliação das emissões de poluentes, desenvolvida com base no funcionamento do CMEM, tem as suas limitações. A modelagem das taxas emissões como funções lineares da taxa de consumo de combustível utilizando medições reais e depois um ajuste linear

é bastante prática. Porém, este trabalho utilizou valores dos coeficientes de regressão linear encontrados na literatura, que não foram obitdos com o modelo de ônibus estudado neste trabalho. Ainda que os valores encontrados para as taxas de emissões sejam bastante coerentes com aqueles verificados na literatura, a realização de testes experimentais medindo emissões dos poluentes e taxa de consumo de combustível dos ônibus de Brasília considerados neste trabalho poderia fornecer valores destes coeficientes mais próximos da realidade da cidade e, portanto, uma modelagem de emissões mais consistente e confiável.

Outro aspecto que a otimização pode ser beneficiada é relativo às curvas de velocidades. Por repetirem um padrão que fora encontrado na literatura, a dinâmica do ônibus ao longo dos três trajetos tendeu a ser parecida. Pode-se observar este resultado quando compara-se as taxas emissões por modos em cada trajeto – ainda que exista alguma variação nos valores encontrados, a ocorrência dos modos tende a ser parecida. Este resultado é razoável uma vez que a variavel VSP é muito mais sensível aos termos de inércia $v(t)[a(t) + gsen\theta(t)]$ do que aos termos de resistência à rolagem ou arrasto. A aquisição de dados relativos a velocidade e inclinação do trajeto obtidos via telemetria de um ônibus percorrendo uma determinada rota resolveria os problemas que decorrem da repetição de um padrão para adequar a distância percorrida no trajeto.

Como sugestão para trabalhos futuros, a utilização de dados adquiridos via telemetria poderia mudar a abordagem do problema: uma vez que os dados obtidos são de um veículo que já cumpriu a tarefa, a verificação de potência disponível deixa de ser um fator tão crítico para falha. Combinado com a localização exata dos pontos de parada ao longo do percurso, poderia-se otimizar a curva de velocidades para uma situação mais econômica, por exemplo.

Uma análise mais profunda acerca da influência na otimização das populações iniciais, da escolha dos números de indvíduos e de gerçãoes poderia de alguma forma contribuir para redução do custo computacional necessário para excecutar as rotinas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAÚJO, C. A. M. *Ônibus: Transporte Público Brasileiro*. [S.l.]: Edição do Autor, 2012.

BARTH, M.; AN, F.; YOUNGLOVE, T.; LEVINE, C.; SCORA, G.; ROSS, M.; WENZEL, T. *Development of a Comprehensive Modal Emissions Model*. [S.l.]: National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board of the National Academies, 2000.

BARTH, M.; SCORA, G.; YOUNGLOVE, T. Modal emissions model for heavy-duty diesel vehicles. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Transportation Research Board of the National Academies, n. 1880, p. 10–20, 2004.

CAPPIELLO, A. *Modeling Traffic Flow Emissions*. Tese (Doutorado) — Massachusetts Institute of Technology, 2002.

COLHERINHAS, G. B.; DIAS, P. H. C. Otimização paramétrica via algoritmos genéticos da cadeia cinemática automotiva por meio de investigação das razões de transmissão. (Projeto de Graduação) – Universidade de Brasília, 2014.

CONAMA. *Resolução n. 403 do Conselho Nacional do Meio Ambiente*. [S.l.]: Diário Oficial da União, 2008.

ENSFIELD, C. On-road emissions testing of 18 tier 1 passenger cars and 17 diesel powered public transport buses. *USEPA Statement of work, ref.# QT-MI-01-000659*, 2002.

FREY, H.; UNAL, A.; CHEN, J.; LI, S.; XUAN, C. Methodology for developing modal emission rates for epa's multi-scale motor vehicle & equipment emission system. *Ann Arbor, Michigan: US Environmental Protection Agency*, 2002.

FREY, H. C.; ROUPHAIL, N. M.; ZHAI, H.; FARIAS, T. L.; GONÇALVES, G. A. Comparing real-world fuel consumption for diesel-and hydrogen-fueled transit buses and implication for emissions. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Elsevier, v. 12, n. 4, p. 281–291, 2007.

GIANNELLI, R.; NAM, E.; HELMER, K.; YOUNGLOVE, T.; SCORA, G.; BARTH, M. Heavy-duty diesel vehicle fuel consumption modeling based on road load and power train parameters. SAE International, 2005.

GILLESPIE, T. D. *Fundamentals of Vehicle Dynamics*. [S.l.]: Warrendale: SAE, 1992.

GOLDBERG, D. E. *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*. [S.l.]: The University of Alabama: Addison-Wesley Publishing Company, 1989.

HOFF, C. J.; GREGORY, D. W. *Introduction to Automotive Powertrains*. [S.l.]: Kettering University, 2003.

JIMENEZ-PALACIOS, J. L. *Understanding and Quantifying Motor Vehicle Emissions with Vehicle Specific Power and TILDAS Remote Sensing*. Tese (Doutorado) — Massachusetts Institute of Technology, 1998.

LINDEN, R. *Algoritmos Genéticos - Uma importante ferramenta de Inteligência Computacional*. [S.l.]: BRASPORT, 2006.

LOPES, L. F. Estudo dos parâmetros de influência no consumo de combustível de Ônibus urbanos. (Projeto de Graduação) – Universidade de Brasília, 2014.

MAN-LA. *Catálogo Ônibus VW 15-190 OD*. [S.l.: s.n.]. https://www.man-la.com/produtos-volkswagen/modelo/onibus-1/15-190-od-53. Disponível em www.man-la.com/produtos-volkswagen/modelo/onibus-1/15-190-od-53 - Accesso em 04/2016.

MAN-LA; NETZ; LTDA, E. S. J. *Relatório Técnico: Programa de Medição de Consumo de Combustível em Veículos de Clientes - MAN-LA e Expresso São José Ltda*. [S.l.: s.n.], 2014.

MOGNON, V. *Algoritmos Genéticos Aplicados na Otimização de Antenas*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Paraná, 2004.

RODRIGUES, A. P. d. S. P. *Uma Metodologia Híbrida de Otimização Aplicada às Pás de Turbinas Hidráulicas Axiais*. Tese (Doutorado) — Universidade de Brasília, 2012.

SCORA, G.; BARTH, M. Comprehensive modal emissions model (cmem), version 3.01. *User Guide. Centre for Environmental Research and Technology. University of California, Riverside*, 2006.

SPEARS, W. M.; JONG, K. A. D.; BÄCK, T.; FOGEL, D. B.; GARIS, H. D. An overview of evolutionary computation. In: SPRINGER. *Machine Learning: ECML-93*. [S.l.], 1993. p. 442–459.

ZEIGERMAN, I.; REIS, I. B. Otimização do limite de rotação de Ônibus urbanos usando algoritmos genéticos. (Projeto de Graduação) – Universidade de Brasília, 2015.

ZHAI, H.; FREY, H. C.; ROUPHAIL, N. M. A vehicle-specific power approach to speed-and facility-specific emissions estimates for diesel transit buses. *Environmental science & technology*, ACS Publications, v. 42, n. 21, p. 7985–7991, 2008.

ANEXOS

Este Capítulo apresenta os códigos desenvolvidos em MALTAB para implementação da metodologia de otimização.

GERADOR DE DADOS

Este programa gera os dados necessários para a otimização acessando o arquivo .txt que contém as elevações do trajeto e o arquivo .txt que contém a curva de velocidades para este trajeto. Como resultado final, obtém-se dois arquvivos .mat contendo a curva de velocidades e a curva de inclinação de acordo com cada instante de tempo presente na curva de velocidades.

O código está presente no arquivo gerador_dad.m

```
clear all
close all
clc

% Gerador de dados

rota = input('Selecione uma rota : ');
if rota == 1
        file = 'rota1-044.txt';
elseif rota == 2
        file = 'rota2-957.txt';
elseif rota == 3
        file = 'elevacoes_rota_0866.txt';
end

elevacoes = importdata(file);
x0 = elevacoes(:,1);
y0 = elevacoes(:,2);

x(1) = x0(1);
y(1) = y0(1);
for i = 2:(length(elevacoes))
    x(i) = x(i-1) + x0(i);
    y(i) = y(i-1) + y0(i);
end

X = max(x);
Y = max(abs(y));

%% Curva de velocidades

if rota ==1
      file1 = 'speed1.txt';
elseif rota == 2
```

```
      file1 = 'speed2.txt';
elseif rota == 3
      file1 = 'speed3.txt';
end

A = importdata(file1);
t = A(:,1);      % Tempo
v = A(:,2);      % Velocidade
a = A(:,3);      % aceleracao
L = length(t);

for i = 1:L-1
    dt(i+1) = t(i+1) - t(i);
end
dt_av = sum(dt)/numel(dt);

s(1) = 0;
for i = 1:L-1
s(i+1) = s(i) + v(i+1)*(t(i+1) - t(i)) + 0.5*a(i+1)*(t(i+1)-t(i))^2;
end
dist = max(abs(s));


%% Inclinacao ao longo do tempo
for i=1:length(s)
    for j=1:length(x)
        if s(i) > x(j)
            if x0(j) == 0
                grade(i) = 0;
            else
            grade(i) = y0(j)/x0(j);
            end
        else
            continue
        end
    end
end


if rota == 1
        save 'road_grade1.mat' grade
        save 'speed1.mat' A
elseif rota == 2
        save 'road_grade2.mat' grade
        save 'speed2.mat' A
elseif rota == 3
        save 'road_grade3.mat' grade
        save 'speed3.mat' A
end
```

AVALIAÇÃO DE EMISSÕES DE POLUENTES

Este programa avalia as emissões de poluentes geradas pelo indivíduo ótimo. O código está disponível no arquivo emissoes.m

```
clear all
close all
clc

%% Carregamento de dados

load('output.mat')
t = out(:,1);
v = out(:,2);
a = out(:,3);
bp = out(:,4);
FR = out(:,6);
dt = out(:,7);
grade = out(:,8);
L = length(t);

%% Mais dados

M = 15000;                              % massa do onibus (kg) -
rho_diesel = 0.83;                      % densidade do oleo diesel em g/cm3
rho_ar = 1.2;                           % Densidade do ar, kg/m3
A = 8.3;                                % Area frontal do onibus, m2
Crol = 0.011;                           % Coeficiente de resistencia ao ...
   rolamento
Cd = 0.65;                              % Coeficiente de arrasto aerodinamico
Ra = 5.83;                              % Raz o de reducao do diferencial
rr = 0.4962*1000;                       % Raio de roda, mm
Rt = [6.75 3.6 2.13 1.39 1.00 0.78];    % Raz es de transmiss o
g = 9.81;                               % Gravidade, m/s2
Vd = 4.6;                               % cilindrada do motor (L)
eta = 0.45;                             % eficiencia do motor - ...
   GIANNELLI, 2005
k = 0.926*100;                          % coeficiente de friccao no ...
   motor, kJ/rev*litro - GIANNELLI, 2005
LHV = 43.2;                             % fuel lower heating value
phi = g*Crol;                           % termo de resist. a rolagem
ksi = 0.5*rho_ar*Cd*A/M;                % termo de resist. aerodinamica
aCO = 0.0052;
rCO = 0.0031;
aHC = 0.0018;
rHC = 0.0024;
aNO = 0.0314;
rNO = 0.0032;

%% Calculo do VSP

for i = 1:L
    VSP(i) = v(i)*(a(i) + g*sin(grade(i)) + phi) + ksi*v(i)^3;
end
```

```
%% Agrupamento em Modos

Q = 4; % quantidade de modos considerados
T_modo = zeros([1 Q]); % tempo gasto em cada modo
qtd = zeros([1 Q]); % quantidade de ocorrencia de cada modo
sum_v = zeros([1 Q]); % soma das velocidades em cada modo
sum_VSP = zeros([1 Q]); % soma dos VSP em cada modo
sum_FR = zeros([1 Q]); % soma dos FR em cada modo

for k = 1:length(VSP)

     % Parado
     if v(k) ≤ 0.005 && abs(a(k)) ≤ 0.005
         T_modo(1) = T_modo(1) + dt(k);
         qtd(1) = qtd(1) + 1;
         sum_v(1) = sum_v(1) + v(k);
         sum_VSP(1) = sum_VSP(1) + VSP(k);
         sum_FR(1) = sum_FR(1) + FR(k);

     % Cruzeiro
     elseif abs(v(k)) ≠ 0 && abs(a(k)) < 0.05
         T_modo(2) = T_modo(2) + dt(k);
         qtd(2) = qtd(2) + 1;
         sum_v(2) = sum_v(2) + v(k);
         sum_VSP(2) = sum_VSP(2) + VSP(k);
         sum_FR(2) = sum_FR(2) + FR(k);

     % Desaceleracao
     elseif v(k) ≠ 0 && a(k) < 0
         T_modo(3) = T_modo(3) + dt(k);
         qtd(3) = qtd(3) + 1;
         sum_v(3) = sum_v(3) + v(k);
         sum_VSP(3) = sum_VSP(3) + VSP(k);
         sum_FR(3) = sum_FR(3) + FR(k);

     % Aceleracao
     elseif v(k) ≠ 0 && a(k) > 0
         T_modo(4) = T_modo(4) + dt(k);
         qtd(4) = qtd(4) + 1;
         sum_v(4) = sum_v(4) + v(k);
         sum_VSP(4) = sum_VSP(4) + VSP(k);
         sum_FR(4) = sum_FR(4) + FR(k);

     end
end

% Calculo do VSP medio e da taxa de consumo media
 for k = 1:length(qtd)
    VSP_med(k) = sum_VSP(k)/qtd(k);
    FR_med(k) = sum_FR(k)/qtd(k);
 end

%% Taxa de Emiss es de Poluentes

TE_NO = aNO*FR_med + rNO; % g/s
TE_CO = aCO*FR_med + rCO; % g/s
```

```
TE_HC = aHC*FR_med + rCO; % g/s

disp('Emissoes de NO')
disp(TE_NO)

disp('Emissoes de CO')
disp(TE_CO)

disp('Emissoes de HC')
disp(TE_HC)

%% Poluentes totais emitidos, em g

NO = dot(TE_NO,T_modo);
CO = dot(TE_CO,T_modo);
HC = dot(TE_HC,T_modo);

P_av = mean(bp)*1000;  % bp em kW. Converte pra W.
P_kWh = P_av*max(t)/3600;

e_no = NO/P_kWh;
e_co = CO/P_kWh;
e_hc = HC/P_kWh;


disp('Emissoes de NO em g/kwh')
disp(e_no)

disp('Emissoes de CO em g/kwh')
disp(e_co)

disp('Emissoes de HC em g/kwh')
disp(e_hc)
```