

INSTITUTO FEDERAL DE GOIÁS
MESTRADO EM TECNOLOGIA DE
PROCESSOS SUSTENTÁVEIS

**ESTRATÉGIA PARA REDUÇÃO DO TEMPO DE
PERMANÊNCIA DOS VEÍCULOS NO TRÁFEGO
URBANO**

Danilo Fernando Alves da Silva

[IFG] & [PPGTPS]
[Goiânia - Goiás - Brasil]
20 de dezembro de 2021

INSTITUTO FEDERAL DE GOIÁS
MESTRADO EM TECNOLOGIA DE
PROCESSOS SUSTENTÁVEIS

**ESTRATÉGIA PARA REDUÇÃO DO TEMPO DE
PERMANÊNCIA DOS VEÍCULOS NO TRÁFEGO
URBANO**

Danilo Fernando Alves da Silva

Dissertação apresentada à Banca Examinadora como exigência parcial para a obtenção do título de Mestre em Tecnologia de Processos Sustentáveis pelo Instituto Federal de Goiás (IFG), sob a orientação do Prof. Dr. Wesley Pacheco Calixto e coorientação do Prof. Dr. Sérgio Botelho de Oliveira.

[IFG] & [PPGTPS]
[Goiânia - Goiás - Brasil]
20 de dezembro de 2021

Si381e Silva, Danilo Fernando da.
Estratégia para redução do tempo de permanência dos veículos no tráfego urbano / Danilo Fernando da Silva. – Goiânia: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, 2021.
125 f. : il.

Orientador: Prof. Dr. Wesley Pacheco Calixto.
Coorientador: Prof. Dr. Sérgio Botelho de Oliveira.

Dissertação (Mestrado) – Mestrado Profissional em Tecnologia de Processos Sustentáveis, Coordenação do Programa de Mestrado em Tecnologia de Processos Sustentáveis, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

1. Tráfego veicular. 2. Modelagem computacional. 3. Modelagem de sistemas. I. Calixto, Wesley Pacheco (orientador). II. Oliveira, Sérgio Botelho de (coorientador). III. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás. IV. Título.

CDD 388.41

Ficha catalográfica elaborada pela Bibliotecária Karol Almeida da Silva Abreu CRB1/2.740
Biblioteca Professor Jorge Félix de Souza,
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Goiânia.

**TERMO DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAÇÃO
NO REPOSITÓRIO DIGITAL DO IFG - ReDi IFG**

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Digital (ReDi IFG), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IFG.

Identificação da Produção Técnico-Científica

- | | |
|--|---|
| <input type="checkbox"/> Tese | <input type="checkbox"/> Artigo Científico |
| <input checked="" type="checkbox"/> Dissertação | <input type="checkbox"/> Capítulo de Livro |
| <input type="checkbox"/> Monografia – Especialização | <input type="checkbox"/> Livro |
| <input type="checkbox"/> TCC - Graduação | <input type="checkbox"/> Trabalho Apresentado em Evento |
| <input type="checkbox"/> Produto Técnico e Educacional - Tipo: _____ | |

Nome Completo do Autor:

Matrícula:

Título do Trabalho:

Autorização - Marque uma das opções

1. Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso aberto);
2. Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG somente após a data ___/___/____ (Embargo);
3. Não autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso restrito).

Ao indicar a opção **2 ou 3**, marque a justificativa:

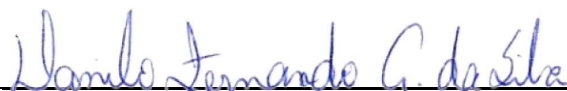
- O documento está sujeito a registro de patente.
 O documento pode vir a ser publicado como livro, capítulo de livro ou artigo.
 Outra justificativa: _____

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O/A referido/a autor/a declara que:

- i. o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- ii. obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- iii. cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

_____ Goiânia, 20 / 12 / 2021.
Local Data



Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
CÂMPUS GOIÂNIA

PARECER 14/2021 - GYN-CMTPS/GYN-DPPGE/CP-GOIANIA/IFG

**SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
IFG CÂMPUS GOIÂNIA
MESTRADO EM TECNOLOGIA DE PROCESSOS SUSTENTÁVEIS**

DANILO FERNANDO ALVES DA SILVA

ESTRATÉGIA PARA REDUÇÃO DO TEMPO DE PERMANÊNCIA DOS VEÍCULOS NO TRÁFEGO URBANO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Processos Sustentáveis do Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de Goiás como requisito parcial à obtenção do título de Mestre.

Área de Concentração: Tecnologia de Sistemas de Produção Limpa. Linha de Pesquisa: Energias Renováveis e Engenharia Econômica Aplicada.

Aprovada em: 20/08/2021

Presidente e Orientador: Prof. Dr. WESLEY CALIXTO PACHECO – PPGTPS IFG

Avaliador: Prof. Dr. SÉRGIO BOTELHO DE OLIVEIRA – PPGTPS IFG

Avaliador: Prof. Dr. CLÓVES GONÇALVES RODRIGUES – FIS/PUC Goiás

Avaliador: Dr. LEONARDO GARCIA MARQUES – COMP/IFG Câmpus Itumbiara

Avaliador: Prof. Dr. MÁRCIO RODRIGUES DA CUNHA REIS – ENGPROD/IFG Câmpus Senador Canedo

Avaliadora: Prof.ª Dr.ª ALANA DA SILVA MAGALHÃES – IFG Câmpus Goiânia

Documento assinado eletronicamente por:

- Clóves Gonçalves Rodrigues, CLÓVES GONÇALVES RODRIGUES - OUTROS - IFG - CÂMPUS GOIÂNIA (10870883000225), em 02/11/2021 12:42:53.
- Wesley Pacheco Calixto, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 20/08/2021 19:03:22.
- Sergio Botelho de Oliveira, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 20/08/2021 19:03:50.
- Leonardo Garcia Marques, ANALISTA DE TEC DA INFORMACAO, em 22/08/2021 23:15:41.
- Alana da Silva Magalhaes, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 23/08/2021 07:58:37.
- Marcio Rodrigues da Cunha Reis, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 13/09/2021 09:37:51.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 19/08/2021. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifg.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 191919

Código de Autenticação: 82e5072fa8



Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás

Rua 75, nº 46, Centro, GOIÂNIA / GO, CEP 74055-110

(62) 3227-2811 (ramal: 2811)

*“Assim como casas são feitas de pedras, a ciência é feita de fatos.
Mas uma pilha de pedras não é uma casa e uma coleção de fatos não
é, necessariamente, ciência”.*

JULES HENRI POINCARÉ

A minha fé, em primeiro lugar. Em seguida a minha esposa e as minhas filhas que mesmo sem saber serviram de combustível infundível para chegar até aqui. A minha madrinha/mãe Irene que tanto me motivou e me apoiou. Aos meus pais que sempre me apoiaram e me mostraram que somente a educação faz um futuro melhor.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, sinceramente ao meu orientador Wesley Pacheco Calixto, pelos conhecimentos transmitidos, a competência, pela confiança, paciência e amizade.

Aos meus colegas e amigos da turma 2018/2 do curso de Mestrado em Tecnologias em Processos Sustentáveis do Instituto Federal de Goiás. Em especial ao Clebes A. Silva, Luiza R. Vitor e João R. B. de Paiva, pelas dicas de escrita, apoio e sugestões ao longo do trabalho.

A Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de Goiás (FAPEG) pelo apoio financeiro deste trabalho. A todos os membros do NEXT (IFG).

A minha família, pelo constante apoio e pela paciência em todos os momentos.

A todos que diretamente ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

RESUMO

Este trabalho tem o intuito de desenvolver modelagem computacional para analisar métodos de otimização e reduzir as emissões de gases em tráfego veicular urbano. A metodologia proposta utiliza sistemas a eventos discretos em conjunto com métodos de otimização buscando reduzir o tempo de permanência dos veículos na via. O modelo computacional é testado com dados reais e os valores de emissões são medidos antes e após a implementação dos parâmetros otimizados. De acordo com os resultados obtidos, o processo de simulação e o método de otimização são eficientes em reduzir as filas, minimizando o tempo médio de permanência na via em $\approx 5\%$ e aumentando a quantidade de veículos que trafega no local em $\approx 2\%$, quando considerado o sistema aberto. Considerando o sistema fechado, há redução de emissões nos semáforos.

Palavras-chave: Modelagem de sistemas, Processo de otimização, Sistema a eventos discretos, Tráfego veicular, Modelagem computacional.

STRATEGY TO REDUCE THE STAY TIME OF VEHICLES IN URBAN TRAFFIC

ABSTRACT

This work aims to develop computational modeling to analyze optimization methods and reduce gas emissions in urban vehicular traffic. The proposed methodology uses discrete event systems together with optimization methods seeking to reduce the time that vehicles remain on the road. The computer model is tested with real data and emission values are measured before and after the implementation of the optimized parameters. According to the results obtained, the simulation process and the optimization method are efficient in reducing queues, minimizing the average time spent on the road by $\approx 5\%$ and increasing the number of vehicles that travel at the site by $\approx 2\%$, when considered the open system. Considering the closed system, there is a reduction in emissions at traffic lights.

Keywords: Systems modeling, Optimization process, Vehicle traffic, Computational modeling.

SUMÁRIO

Pág.

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE SÍMBOLOS

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO	27
CAPÍTULO 2 SISTEMA, MODELO E SIMULAÇÃO	33
2.1 Definição de sistema	33
2.2 Sistemas abertos e fechados	34
2.3 Sistemas a eventos discretos	34
2.4 Modelo de sistema	35
2.5 Simulação do modelo de sistema	36
2.5.1 Softwares de simulação de tráfego veicular	36
2.6 Distribuições probabilísticas	37
2.7 Considerações	39
CAPÍTULO 3 PROCESSOS DE OTIMIZAÇÃO	41
3.1 Otimização	41
3.2 Algoritmos determinísticos	42
3.2.1 Algoritmo de Nelder-Mead	43
3.3 Métodos heurísticos	43
3.3.1 Algoritmo de força bruta	44
3.3.2 Algoritmo genético	45
3.4 Considerações	46
CAPÍTULO 4 METODOLOGIA	47
4.1 Contextualização	47
4.2 Coleta de dados	48
4.3 Construção do simulador	49
4.4 Testes e validação do modelo	49

4.5	Aplicação do processo de otimização	51
4.6	Análise da emissão de gases	51
4.7	Considerações	52
CAPÍTULO 5 RESULTADOS		53
5.1	Ambiente para estudo de caso	53
5.2	Coleta de dados para o estudo de caso	54
5.3	Construção do simulador e validação do sistema	56
5.4	Estudo de caso considerando o sistema fechado	59
5.5	Otimização dos tempos dos estágios dos semáforos	61
5.6	Estudo das emissões de gases na Av. Universitária	67
5.7	Discussão	69
CAPÍTULO 6 CONCLUSÃO		71
6.1	Contribuições do trabalho	71
6.2	Sugestões para trabalhos futuros.	72
APÊNDICE A		73
APÊNDICE B		77
APÊNDICE C		85
APÊNDICE D		107
APÊNDICE E		109
APÊNDICE F		117
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS		119

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
2.1 Domínios de sistemas.	33
2.2 Trajetória típica de sistema a eventos discretos.	35
3.1 Otimização baseada em simulação.	41
3.2 Métrica para escolha do método de otimização.	42
3.3 Fluxograma do Algoritmo de Força Bruta.	44
3.4 Fluxograma do algoritmo genético clássico.	45
4.1 Modelo de formação de filas FIFO.	47
4.2 Fluxograma da metodologia proposta.	48
4.3 Fluxograma hipotético do sistema real.	50
5.1 Mapa do trecho da Av. Universitária entre Rua 239 e Praça Cívica.	54
5.2 Diagrama do modelo proposto para a Av. Universitária.	58
5.3 Teste de aderência: a) semáforo α_1 nas quartas-feiras media anual de veículos, b) função de densidade de probabilidade, c) semáforo α_7 nas terças-feiras média anual de veículos, d) função de densidade de probabilidade e e) semáforo α_{13} nos sábados média anual de veículos, f) função de densidade de probabilidade.	60
5.4 Média de tráfego veicular com dados reais e simulados: a) semáforo α_1 nas quartas-feiras, b) semáforo α_2 nos domingos, c) semáforo α_7 nas terças-feiras e d) semáforo α_{13} nos sábados.	61
5.5 Resultado de simulações considerando o sistema fechado: a) semáforo α_1 nas quartas-feiras media anual de veículos, b) semáforo α_7 nas terças-feiras média anual de veículos e c) semáforo α_{13} nos sábados média anual de veículos.	62

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
4.1 Fatores gerais de emissão de gases por categoria veicular.	51
5.1 Semáforos que contabilizam os veículos que entram na Av. Universitária.	55
5.2 Tempos dos ciclos semaforicos da Av. Universitária.	56
5.3 Média anual de veículos no semáforo α_1	56
5.4 Testes de aderência no semáforo α_1 nas terças-feiras.	59
5.5 Valores médios dos tempos de tráfego na via e quantidade de veículos por dia e período predefinido considerando o sistema aberto.	64
5.6 Valores anuais médios dos tempos de tráfego na via e quantidade de veículos considerando o sistema aberto.	65
5.7 Tempos otimizados dos ciclos semaforicos da Av. Universitária considerando o sistema aberto.	65
5.8 Valores médios dos tempos de tráfego na via e quantidade de veículos por dia e período predefinido considerando o sistema fechado.	66
5.9 Valores anuais médios dos tempos de tráfego na via e quantidade de veículos considerando sistema fechado.	66
5.10 Tempos otimizados dos ciclos semaforicos da Av. Universitária considerando o sistema fechado.	67
5.11 Comparativo das emissões no sistema real \times otimizado considerando o sistema aberto.	68
5.12 Comparativo anual das emissões no sistema real \times otimizado considerando o sistema aberto.	68
A.1 Média anual de veículos no semáforo α_2	73
A.2 Média anual de veículos no semáforo α_4	73
A.3 Média anual de veículos no semáforo α_7	74
A.4 Média anual de veículos no semáforo α_{12}	74
A.5 Média anual de veículos no semáforo α_{13}	75
B.1 Testes de aderência no semáforo α_1 nos domingos.	77
B.2 Testes de aderência no semáforo α_1 nas segundas-feiras.	77
B.3 Testes de aderência no semáforo α_1 nas quartas-feiras.	77
B.4 Testes de aderência no semáforo α_1 nas quintas-feiras.	77
B.5 Testes de aderência no semáforo α_1 nas sextas-feiras.	77
B.6 Testes de aderência no semáforo α_1 nos sábados.	78
B.7 Testes de aderência no semáforo α_2 nos domingos.	78

B.8	Testes de aderência no semáforo α_2 nas segundas-feiras.	78
B.9	Testes de aderência no semáforo α_2 nas terças-feiras.	78
B.10	Testes de aderência no semáforo α_2 nas quartas-feiras.	78
B.11	Testes de aderência no semáforo α_2 nas quintas-feiras.	78
B.12	Testes de aderência no semáforo α_2 nas sextas-feiras.	79
B.13	Testes de aderência no semáforo α_2 nos sábados.	79
B.14	Testes de aderência no semáforo α_4 nos domingos.	79
B.15	Testes de aderência no semáforo α_4 nas segundas-feiras.	79
B.16	Testes de aderência no semáforo α_4 nas terças-feiras.	79
B.17	Testes de aderência no semáforo α_4 nas quartas-feiras.	79
B.18	Testes de aderência no semáforo α_4 nas quintas-feiras.	80
B.19	Testes de aderência no semáforo α_4 nas sextas-feiras.	80
B.20	Testes de aderência no semáforo α_4 nos sábados.	80
B.21	Testes de aderência no semáforo α_7 nos domingos.	80
B.22	Testes de aderência no semáforo α_7 nas segundas-feiras.	80
B.23	Testes de aderência no semáforo α_7 nas terças-feiras.	80
B.24	Testes de aderência no semáforo α_7 nas quartas-feiras.	81
B.25	Testes de aderência no semáforo α_7 nas quintas-feiras.	81
B.26	Testes de aderência no semáforo α_7 nas sextas-feiras.	81
B.27	Testes de aderência no semáforo α_7 nos sábados.	81
B.28	Testes de aderência no semáforo α_{12} nos domingos.	81
B.29	Testes de aderência no semáforo α_{12} nas segundas-feiras.	81
B.30	Testes de aderência no semáforo α_{12} nas terças-feiras.	82
B.31	Testes de aderência no semáforo α_{12} nas quartas-feiras.	82
B.32	Testes de aderência no semáforo α_{12} nas quintas-feiras.	82
B.33	Testes de aderência no semáforo α_{12} nas sextas-feiras.	82
B.34	Testes de aderência no semáforo α_{12} nos sábados.	82
B.35	Testes de aderência no semáforo α_{13} nos domingos.	82
B.36	Testes de aderência no semáforo α_{13} nas segundas-feiras.	83
B.37	Testes de aderência no semáforo α_{13} nas terças-feiras.	83
B.38	Testes de aderência no semáforo α_{13} nas quartas-feiras.	83
B.39	Testes de aderência no semáforo α_{13} nas quintas-feiras.	83
B.40	Testes de aderência no semáforo α_{13} nas sextas-feiras.	83
B.41	Testes de aderência no semáforo α_{13} nos sábados.	83
C.1	Comparativo da quantidade média anual de veículos em dados reais e simulados nos domingos no semáforo α_1	85
C.2	Comparativo da quantidade média anual de veículos em dados reais e simulados nas segundas-feiras no semáforo α_1	85

C.3	Comparativo da quantidade média anual de veículos em dados reais e simulados nas terças-feiras no semáforo α_1	86
C.4	Comparativo da quantidade média anual de veículos em dados reais e simulados nas quartas-feiras no semáforo α_1	86
C.5	Comparativo da quantidade média anual de veículos em dados reais e simulados nas quintas-feiras no semáforo α_1	87
C.6	Comparativo da quantidade média anual de veículos em dados reais e simulados nas sextas-feiras no semáforo α_1	87
C.7	Comparativo da quantidade média anual de veículos em dados reais e simulados nos sábados no semáforo α_1	88
C.8	Comparativo da quantidade média anual de veículos em dados reais e simulados nos domingos no semáforo α_2	88
C.9	Comparativo da quantidade média anual de veículos em dados reais e simulados nas segundas-feiras no semáforo α_2	89
C.10	Comparativo da quantidade média anual de veículos em dados reais e simulados nas terças-feiras no semáforo α_2	89
C.11	Comparativo da quantidade média anual de veículos em dados reais e simulados nas quartas-feiras no semáforo α_2	90
C.12	Comparativo da quantidade média anual de veículos em dados reais e simulados nas quintas-feiras no semáforo α_2	90
C.13	Comparativo da quantidade média anual de veículos em dados reais e simulados nas sextas-feiras no semáforo α_2	91
C.14	Comparativo da quantidade média anual de veículos em dados reais e simulados nos sábados no semáforo α_2	91
C.15	Comparativo da quantidade média anual de veículos em dados reais e simulados nos domingos no semáforo α_4	92
C.16	Comparativo da quantidade média anual de veículos em dados reais e simulados nas segundas-feiras no semáforo α_4	92
C.17	Comparativo da quantidade média anual de veículos em dados reais e simulados nas terças-feiras no semáforo α_4	93
C.18	Comparativo da quantidade média anual de veículos em dados reais e simulados nas quartas-feiras no semáforo α_4	93
C.19	Comparativo da quantidade média anual de veículos em dados reais e simulados nas quintas-feiras no semáforo α_4	94
C.20	Comparativo da quantidade média anual de veículos em dados reais e simulados nas sextas-feiras no semáforo α_4	94
C.21	Comparativo da quantidade média anual de veículos em dados reais e simulados nos sábados no semáforo α_4	95

C.22	Comparativo da quantidade média anual de veículos em dados reais e simulados nos domingos no semáforo α_7	95
C.23	Comparativo da quantidade média anual de veículos em dados reais e simulados nas segundas-feiras no semáforo α_7	96
C.24	Comparativo da quantidade média anual de veículos em dados reais e simulados nas terças-feiras no semáforo α_7	96
C.25	Comparativo da quantidade média anual de veículos em dados reais e simulados nas quartas-feiras no semáforo α_7	97
C.26	Comparativo da quantidade média anual de veículos em dados reais e simulados nas quintas-feiras no semáforo α_7	97
C.27	Comparativo da quantidade média anual de veículos em dados reais e simulados nas sextas-feiras no semáforo α_7	98
C.28	Comparativo da quantidade média anual de veículos em dados reais e simulados nos sábados no semáforo α_7	98
C.29	Comparativo da quantidade média anual de veículos em dados reais e simulados nos domingos no semáforo α_{12}	99
C.30	Comparativo da quantidade média anual de veículos em dados reais e simulados nas segundas-feiras no semáforo α_{12}	99
C.31	Comparativo da quantidade média anual de veículos em dados reais e simulados nas terças-feiras no semáforo α_{12}	100
C.32	Comparativo da quantidade média anual de veículos em dados reais e simulados nas quartas-feiras no semáforo α_{12}	100
C.33	Comparativo da quantidade média anual de veículos em dados reais e simulados nas quintas-feiras no semáforo α_{12}	101
C.34	Comparativo da quantidade média anual de veículos em dados reais e simulados nas sextas-feiras no semáforo α_{12}	101
C.35	Comparativo da quantidade média anual de veículos em dados reais e simulados nos sábados no semáforo α_{12}	102
C.36	Comparativo da quantidade média anual de veículos em dados reais e simulados nos domingos no semáforo α_{13}	102
C.37	Comparativo da quantidade média anual de veículos em dados reais e simulados nas segundas-feiras no semáforo α_{13}	103
C.38	Comparativo da quantidade média anual de veículos em dados reais e simulados nas terças-feiras no semáforo α_{13}	103
C.39	Comparativo da quantidade média anual de veículos em dados reais e simulados nas quartas-feiras no semáforo α_{13}	104
C.40	Comparativo da quantidade média anual de veículos em dados reais e simulados nas quintas-feiras no semáforo α_{13}	104

C.41	Comparativo da quantidade média anual de veículos em dados reais e simulados nas sextas-feiras no semáforo α_{13} .	105
C.42	Comparativo da quantidade média anual de veículos em dados reais e simulados nos sábados no semáforo α_{13} .	105
D.1	Parâmetros da distribuição de probabilidade generalizada de Pareto no semáforo α_1 .	107
D.2	Parâmetros da distribuição de probabilidade generalizada de Pareto no semáforo α_2 .	107
D.3	Parâmetros da distribuição de probabilidade generalizada de Pareto no semáforo α_4 .	107
D.4	Parâmetros da distribuição de probabilidade generalizada de Pareto no semáforo α_7 .	107
D.5	Parâmetros da distribuição de probabilidade generalizada de Pareto no semáforo α_{12} .	107
D.6	Parâmetros da distribuição de probabilidade generalizada de Pareto no semáforo α_{13} .	107

LISTA DE SÍMBOLOS

$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5, \alpha_6, \alpha_7, \alpha_8,$	
$\alpha_9, \alpha_{10}, \alpha_{11}, \alpha_{12}, \alpha_{13}, \alpha_{14}$	– Semáforos
β	– Parâmetro de de forma
$E_{linha,i}$	– Quantidade de emissões do poluente i
$F_{e,i}$	– Fator de emissão de poluente
$F_{r,j}$	– Número total de veículos de uma categoria j
$F(t_{med})$	– Média total do tempo de permanência dos veículos na via
$f(x)$	– Função de avaliação
L	– Comprimento total da via
M	– Modelo
N	– Quantidade de veículos que trafegou no período estudado
NO_x	– Óxido de nitrogênio
NO_2	– Dióxido de nitrogênio
p	– Número de possíveis soluções
ρ	– Parâmetro de localização
q	– Número de eventos
S	– Sistema
σ	– Desvio
x	– Matriz com parâmetros
t	– Tempo das emissões de poluentes
θ	– Parâmetro de escala
\bar{t}_i	– Tempo gasto por veículos
t_1, t_2, t_3, t_4	– Instantes de tempo
x_1, x_2, x_3, x_4	– Estados de um sistema
ζ, η, γ	– Eventos

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AIC	–	<i>Akaike Information Criterion</i>
AG	–	Algoritmo Genético
ANFAVEA	–	Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores
AV	–	Avenida
CH_4	–	Metano
CO	–	Monóxido de carbono
CONTRAN	–	Conselho Nacional de Trânsito
CO ₂	–	Dióxido de carbono
COV	–	Compostos orgânicos voláteis
DENATRAN	–	Departamento Nacional de Trânsito
EPA	–	<i>United States Environmental Protection Agency</i>
FIFO	–	<i>First in first out</i>
IoV	–	<i>Internet of Vehicles</i>
HC	–	Hidrocarbonetos
MP	–	Material particulado
NM	–	Algoritmo de Nelder-Mead
NMHC	–	Hidrocarbonetos não metano
OICA	–	<i>Organisation Internationale des Constructeurs d'Automobiles</i>
PDF	–	<i>Probability Density Function</i>
PROCONVE	–	Programa de Controle de Poluição do Ar dos Veículos Automotores
PROMOT	–	Programa de Controle de Poluição do Ar por Motocicletas e Veículos Similares
PRONAR	–	Programa Nacional de Controle de Qualidade do Ar
PTV	–	<i>Planung Transport Verkehr</i>
RCHO	–	Aldeídos
RN	–	Rede neural artificial
SED	–	Sistemas a eventos discretos
SIG	–	Sistema de Informações Geográficas
SMT	–	Secretaria Municipal de Trânsito
SUMO	–	<i>Simulation of Urban Mobility</i> (Simulação de mobilidade urbana)

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

O crescente desenvolvimento da sociedade se dá em parte com a participação dos meios de transportes, que são agentes facilitadores das relações humanas. Na sociedade atual existem vários tipos de transportes, desde transportes de animais, humanos a objetos dos mais variados. Dos vários tipos de transportes, vários tipos de combustíveis são utilizados. Diversos tipos de veículos utilizam energia produzida através da queima de combustíveis fósseis e esta dependência carrega alguns ônus como: i) a baixa eficiência energética, ii) emissões de gases altamente prejudiciais ao meio ambiente, iii) altos custos de manutenção e iv) entre vários outros (ZHANG; BATTERMAN, 2013; BORN et al., 2015; TURKY et al., 2009).

O crescimento da frota de veículos automotores faz com que os veículos sejam a principal fonte de gases poluentes distribuídos em áreas urbanas no mundo (HABERMANN et al., 2011). Os congestionamentos de veículos aumentam o desgaste ocasionado no meio ambiente com as emissões de gases como: i) monóxido de carbono (CO), ii) dióxido de carbono (CO₂), iii) compostos orgânicos voláteis (COV) ou hidrocarbonetos (HC), iv) óxido de nitrogênio (NO_x) e v) material particulado (MP). A frota mundial de veículos conta com o crescimento de mais de 90 milhões de unidades por ano. A China produz aproximadamente 29% de todos veículos disponíveis para venda no mundo (OICA, 2019). No Brasil em 2018 são licenciados mais de 2,5 milhões de veículos, entre nacionais e importados (ANFAVEA, 2018). Este crescimento da frota de veículos ocasiona problemas de tráfego para motoristas, pedestres e prejuízo para o meio ambiente (BORN et al., 2015).

Em 1980 o Brasil percebe a necessidade de monitorar as emissões de gases por fontes veiculares, criando pela força da lei os programas brasileiros de controle e redução de emissões de poluentes: i) Programa Nacional de Controle de Qualidade do Ar (PRONAR), ii) Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores (PROCONVE) e iii) Programa de Controle da Poluição do Ar por Motocicletas e Veículos Similares (PROMOT) (CANCELLI; DIAS, 2014). O PRONAR, por exemplo, tem alguns objetivos, dentre outros: i) a definição de limites de emissão para fontes poluidoras e dos padrões de qualidade do ar, ii) a implantação da rede nacional de monitoramento da qualidade do ar, iii) a criação do inventário nacional de fontes e emissões e iv) a capacitação laboratorial e de recursos humanos.

Várias são as estratégias para redução de poluentes emitidos por veículos. Mene-

guette et al. (2016) afirmam que o congestionamento do tráfego veicular provoca aumento na emissão de gases e ocasiona problema de mobilidade urbana, que causa estresses aos motoristas e perdas econômicas. Os autores abordam solução utilizando rede neural artificial (RNA) para detecção, disseminação e controle de estradas congestionadas com base na comunicação entre os veículos. Esta solução apresenta redução do consumo de combustíveis de até 8%, redução nas taxas de emissões de CO₂ em até 35% e redução do tempo de percurso quando comparadas com outras soluções testadas.

Carmo (2016) realiza estudo sobre os sistemas de transporte e circulação, afirmando que estes são áreas de importância estratégica no desenvolvimento de qualquer país. O autor propõe metodologia que utiliza o Sistema de Informações Geográficas (SIG), para auxiliar à programação dos semáforos urbanos e assim encontrar configurações que contemplem a questão espaço-temporal nos principais pontos de congestionamentos da cidade. Como resultado o autor apresenta o modelo de arquitetura para o SIG que contempla a questão espacial da medida de desempenho da rede semaforica. A solução proposta pelo autor pode suprir a falta de ferramentas automatizadas para gerenciamento de tráfego.

Habermann et al. (2011) realizam revisão bibliográfica em 513 artigos, afirmando que a poluição atmosférica tem como um de seus fatores causadores, o constante aumento do tráfego veicular urbano, que também é uma das preocupações de saúde pública. Os autores constroem base de dados na qual elegem 35 artigos com dados viários e de tráfego veicular, realizando testes associativos entre poluição do ar e os impactos na saúde. A análise do material indica que são utilizados diferentes indicadores do tráfego veicular para caracterizar a poluição atmosférica e que em decorrência da poluição atmosférica, múltiplos desfechos de saúde são observados como, por exemplo, agravos cardíacos, respiratórios entre vários outros. O trabalho de Habermann et al. (2011) deixa a lacuna para estudos que indiquem a distância do fluxo veicular \times análise da ocorrência da poluição do ar e os impactos na saúde.

Nos Estados Unidos, Zhang e Batterman (2013) apresentam análise dos impactos da poluição do ar em usuários de veículos e pessoas que transitam ou habitam próximos às vias de tráfego veicular. Os autores utilizam simulação para estimar as concentrações do gás dióxido de nitrogênio (NO₂) e análise incremental para estimar os impactos da poluição e caracterizar os riscos. O estudo indica que os riscos são influenciados por fatores de emissões em congestionamentos, na qual a relação do gás NO₂ está relacionada com as alterações no tempo de viagem, tipo de estrada e

localização. Os resultados do estudo apontam que usuários, transeuntes e moradores nas proximidades das rodovias estão sujeitos ao aumento de 20% a 45% em doenças respiratórias e outras.

No *Houston Ship Cannel*¹, Estados Unidos, Zhang et al. (2017) analisam área que possui fluxo de veículos que emitem partículas finas (PM₂₅) e óxido de nitrogênio (NO_x). Com dados do inventário de estradas do departamento de transportes do Texas e as taxas de emissões calculadas por simulador, desenvolvido pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (*United States Environmental Protection Agency* – EPA), aplica-se o modelo de dispersão de alta resolução espacial e temporal. Os resultados indicam que a maior fonte de PM₂₅ são os caminhões movidos a diesel e com relação ao NO_x, carros e caminhões apresentam contribuições similares. Os autores demonstram que o tráfego veicular é fonte significativa de poluição do ar na região estudada e quando comparada a outras regiões, esta tem relação tráfego/poluição mais elevada que outras áreas de risco ambiental.

Smit et al. (2010) informam que o transporte rodoviário é normalmente uma das principais fontes de poluição do ar nas áreas urbanas. Os autores afirmam a necessidade crescente de estimar a quantidade de poluição produzida no transporte rodoviário, principalmente para que medidas de redução da poluição sejam propostas. Smit et al. (2010) propõe metanálise de 50 estudos que tratam da validação de vários tipos de modelos de emissão de gases. Este e outros trabalhos são indicativos que nos últimos anos a preocupação com o crescimento das emissões de poluentes por veículos automotores tem aumentado, sendo que no Brasil há diversas regulamentações no sentido de controlar estas emissões.

Cancelli e Dias (2014) apresentam metodologia para cálculo das emissões veiculares de frotas brasileiras, dividida em cálculos para fluxo de veículos com fonte em linha e fluxo com fonte em área, usando como base os dados do relatório final do primeiro inventário nacional de emissões atmosféricas por veículos automotores rodoviários (MMA, 2011). É desenvolvido software que calcula os dados como: emissões × por categoria de veículo × poluente, emissões horárias × poluente e os fluxos de emissão × poluente. O software desenvolvido considera os critérios que estão presentes nas legislações brasileiras.

O problema de congestionamento em conjunto com a alta destruição do meio ambiente e o risco na saúde, produzem várias mortes no mundo. A relação destes

¹Porto marítimo mais movimentado do mundo, no canal para embarcações oceânicas entre os terminais da área de Houston e do Golfo do México.

problemas provocam mudanças no comportamento dos transeuntes. Na China, Liu (2006) apresenta estudo com mais de 500.000 pedestres mortos entre os anos de 2000 e 2004 ocasionadas por veículos automotores. O autor modela e simula o comportamento de pedestres em vias rodoviárias através de animação computadorizada com modelagem de cinemática inversa. O pedestre virtual é considerado agente com arquitetura cognitiva, utilizando a teoria das possibilidades de Gibson, simulando as percepções. A análise na mudança do comportamento de pedestre apresenta aplicações como previsão de acidentes com pedestres e veículos em movimento.

Na cidade de Sibui/Romênia, Coman e Badea (2017) abordam o problema dos congestionamentos veiculares enfrentados pelos usuários das vias urbanas. Os autores propõem otimização que passa por modelagem baseada em agentes em conjunto com software de simulação. A configuração de tempo das fases de cada semáforo é considerada para otimização. É realizada otimização discreta no qual os resultados obtidos apontam redução de 20% do tempo gasto no trajeto dos veículos.

Turky et al. (2009) realizam trabalho para reduzir os congestionamentos veiculares em Kajang/Malásia. Os autores informam que os algoritmos utilizados no local de estudos são ineficientes ao não considerar a natureza dinâmica do tráfego. Desta forma, os autores propõem otimização do tráfego veicular utilizando algoritmo genético. Os resultados obtidos apresentam a redução da fila de veículos de sete para um, em determinado trecho e a diminuição do tempo de espera dos pedestres de 20s para 8s.

Pop (2017) propõe resolver alguns problemas gerados pelo congestionamento de veículos em Timisoara/Romênia. O autor utiliza abordagem por sistemas de tráfego inteligente, mediante ferramenta de otimização. Na solução da problemática, o autor considera que os semáforos têm tempos entre dez e cinquenta segundos para cada uma das fases, otimizando os melhores tempos para cada semáforo. Nos resultados, o tempo médio para travessia da via reduz em até 32,15%, indicando que é possível melhorar o fluxo utilizando processo de otimização.

Na cidade de Tamil Nadu/Índia, o departamento de trânsito não consegue utilizar os dados de tráfego e em consequência disto, ocorrem congestionamentos e acidentes de trânsito. Kumar et al. (2018) utilizam a Internet em Veículos (*Internet of Vehicles* – IoV²), em conjunto com o algoritmo de colônia de formigas e lógica *fuzzy* para

²Paradigma desenvolvido originalmente com a ajuda da Internet para Coisas (*Internet of Things* – IoT). O IoV é amplamente utilizado em vários ambientes, incluindo comunicações, transporte, informação e tecnologia automotiva.

simular e modelar o tráfego veicular em Tamil Nadu, fornecendo a estes as melhores rotas entre dois pontos em tempo real. Comparando com outros algoritmos de mesmo propósito, os resultados obtidos reduzem em até 75% o tempo gasto em alguns trajetos. O método apresentado por Kumar et al. (2018) reduz o tempo de viagem de um ponto ao outro atuando como gerenciador de tráfego baseado em IoV.

Wei e Wang (2001) utilizam lógica *fuzzy* em programação semafórica para determinar o tempo do ciclo do cruzamento com quatro aproximações, onde são possíveis alterações de acordo com o fluxo de tráfego. Os autores utilizam o conceito de grau de urgência, que descreve as diferentes requisições dos usuários pelo sinal verde. O algoritmo desenvolvido é capaz de decidir entre ampliar ou encurtar a fase atual de operação e o início do novo ciclo de operação. Os resultados apresentam redução de 15% a 25% na quantidade de paradas e de 15% a 30% no tempo de espera dos veículos.

Born (2015) descreve o crescimento populacional do município da cidade de Rio Grande/Brasil e o conseqüente aumento no tráfego veicular, ocasionado pela concentração de empresas do polo naval. No auxílio do problema do tráfego, a autora utiliza solução baseada em algoritmo genético (AG) em conjunto com o software de simulação de mobilidade urbana (*Simulation of Urban Mobility* – SUMO). Os resultados apresentam que o AG é promissor na otimização de semáforo, no entanto, há amplo espectro de métodos de otimização e cada método tem melhor comportamento dependente da dinâmica do sistema.

A maioria dos trabalhos apresentados anteriormente são desenvolvidos para coletar dados, analisar e simular o tráfego urbano de veículos. Dentre os vários trabalhos, a maioria são desenvolvidos para quantificar as emissões de poluentes que são liberados no tráfego urbano de veículos. Os trabalhos propõem soluções com base em otimização para reduzir o tempo médio de fila no tráfego veicular e com foco na análise dos impactos de poluentes, na saúde dos usuários das vias rodoviárias, na quantificação dos poluentes emitidos e na validação de métodos utilizados para esta quantificação. A proposta de uso de métodos de otimização determinísticas, heurísticas e híbridas visando a redução da fila ao mesmo tempo que quantifica e reduz a taxa de emissões de poluentes, é a lacuna que justifica este trabalho.

À medida em que a população de determinada cidade cresce, aumenta-se a quantidade de veículos e se a gestão da cidade não está preparada para esta demanda, ocorre os congestionamentos. Com o aumento dos congestionamentos, aumenta-se as emissões de poluentes. O problema que surge na tentativa de reduzir o congesti-

onamento é obter os tempos entre as fases dos semáforos das vias. Cada via tem dinâmica própria, sendo cada via um sistema diferente, aumentando a dificuldade no processo de simulação e otimização. De posse do problema a ser resolvido, formula-se a hipótese primária: **se** é possível realizar a simulação do sistema de tráfego urbano de veículos e **se** é possível realizar o processo de otimização, então pode-se reduzir o tempo de permanência na via e conseqüentemente analisar as emissões de poluentes.

O principal objetivo deste trabalho é estabelecer modelo de cálculo que auxilie no processo de otimização e por conseqüência reduza o tempo de permanência na via além de analisar as emissões de gases. Têm-se ainda como objetivos específicos: i) construir modelo que represente a via de tráfego veicular considerando o sistema aberto e o sistema fechado, ii) simular a via de tráfego veicular e validar a simulação com dados reais, iii) desenvolver metodologia para reduzir a fila de veículos na via e conseqüentemente reduzir o tempo de permanência na via e iv) utilizar metodologia para cálculo da quantidade de emissões de poluentes e comparar os resultados antes e após a aplicação da metodologia para redução da fila de veículos, considerando tanto o sistema aberto quanto o sistema fechado.

Este trabalho está dividido em seis capítulos: no [Capítulo 2](#) são apresentados os conceitos de sistema, modelo e simulação, destacando os sistemas de simulação de tráfego veicular. O [Capítulo 3](#) descreve o processo de otimização e conceitualiza alguns métodos de otimização. No [Capítulo 4](#) é apresentada a metodologia proposta e o [Capítulo 5](#) dispõe os resultados obtidos utilizando a metodologia proposta. O [Capítulo 6](#) apresenta as conclusões obtidas neste trabalho.

CAPÍTULO 2

SISTEMA, MODELO E SIMULAÇÃO

Este capítulo aborda os conceitos de sistema, modelo e simulação. Descreve sucintamente a fundamentação de sistema a eventos discretos, softwares de simulação de tráfego veicular e distribuição probabilística.

2.1 Definição de sistema

Sistema é o conjunto de elementos, materiais ou imateriais, entre os quais pode-se definir relações que operam como estrutura organizada (COSTA, 2011). Forrester (1968) descreve o sistema como partes que realizam interações e que geram causa e efeito. Bertalanffy (2006) define sistema como conjunto de partes diferentes com interrelação formando totalidade organizada que possui único propósito.

Segundo Mobus e Kalton (2015), os sistemas podem ser divididos em três áreas: i) sistemas no mundo, ii) sistemas na mente e iii) sistemas no abstrato. Estes campos referem-se a ontologia, epistemologia e matemática/semiótica. O sistema que constitui a realidade só pode ser abstraído matemática e simbolicamente depois de ser expresso mentalmente, como ilustra a Figura 2.1, adaptada de Mobus e Kalton (2015).

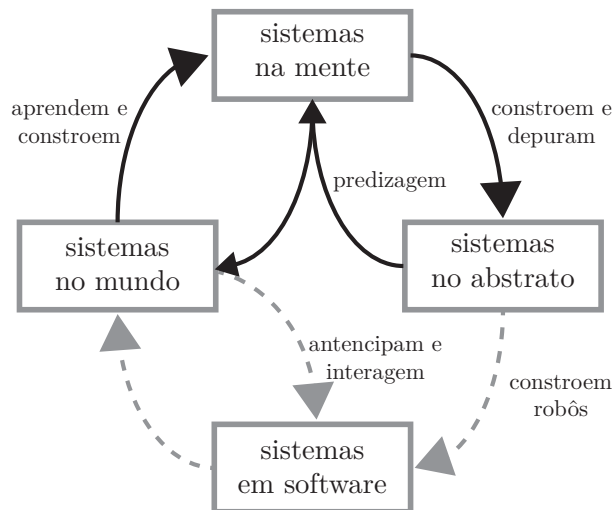


Figura 2.1 - Domínios de sistemas.

Na pesquisa de sistemas, é necessário determinar o que são os elementos, as interações entre os elementos internos e as interações entre os elementos internos e

externos ao sistema. Portanto, o sistema adota conceitos complexos e não lineares nos quais múltiplas variáveis devem ser consideradas (LEMES, 2012).

2.2 Sistemas abertos e fechados

O sistema pode ser considerado como porção limitada do objeto em estudo, na qual ocorrem interações de vários elementos de forma organizada. Normalmente o sistema integra subsistemas que estabelecem relações entre si (CHIAVENATO, 2021). Os sistemas podem ser considerados: i) aberto, ii) fechado e iii) isolado. O sistema aberto é o sistema que interage continuamente com seus arredores. A interação surge na forma de informações, energia ou transformações materiais na fronteira do sistema. O sistema aberto se opõe ao sistema isolado que não troca energia, matéria ou informação com o meio ambiente (BERTALANFFY, 2006; CHIAVENATO, 2021).

Segundo Chiavenato (2021) o sistema aberto caracteriza-se por intercâmbio de transações com o ambiente que conserva-se constantemente no mesmo estado, este processo é denominado autorregulação. Este fenômeno ocorre apesar do fato da matéria e da energia que o integram se renovarem constantemente. No sistema aberto as fontes podem está dentro ou fora do sistema. O sistema fechado são caracterizados por não interagirem com o ambiente, por não possuírem capacidade de crescimento e também pelo fato de que seu estado final sempre será o mesmo do seu estado original. Este tipo de sistema não compete com outros sistemas (LARA; FRYSZMAN, 2018; CHIAVENATO, 2021). No sistema fechado a fonte pertence ao sistema, não havendo troca de informações com outros sistemas, ocorrendo apenas transferência de energia.

2.3 Sistemas a eventos discretos

Sistema a eventos discretos (SED) é definido como sistema cuja evolução dinâmica depende da ocorrência de eventos físicos, em intervalos de tempo em geral irregulares e desconhecidos. Entre a ocorrência de dois eventos em sequência, o sistema permanece em determinado estado e a transição ou mudança de estado no sistema é ocasionada pela ocorrência de evento, de forma que sua evolução no tempo é representada pela trajetória percorrida no espaço dos estados (KELTON; LAW, 2000; CURY, 2001).

A Figura 2.2, adaptada de Cury (2001), ilustra a trajetória na qual ocorrem os eventos ζ , η e λ . Observa-se que único evento pode ter efeitos diferentes, de acordo com o estado em que ocorre. O sistema estando no estado x_2 e ocorrendo o evento λ , o es-

tado seguinte será o x_3 . A trajetória segue indefinidamente, incluindo a possibilidade de ocorrência de outros eventos. Contudo, em qualquer sistema observado assume-se que o número total de eventos distintos é finito (FISHMAN, 2001; CASSANDRAS; LAFORTUNE, 2008).

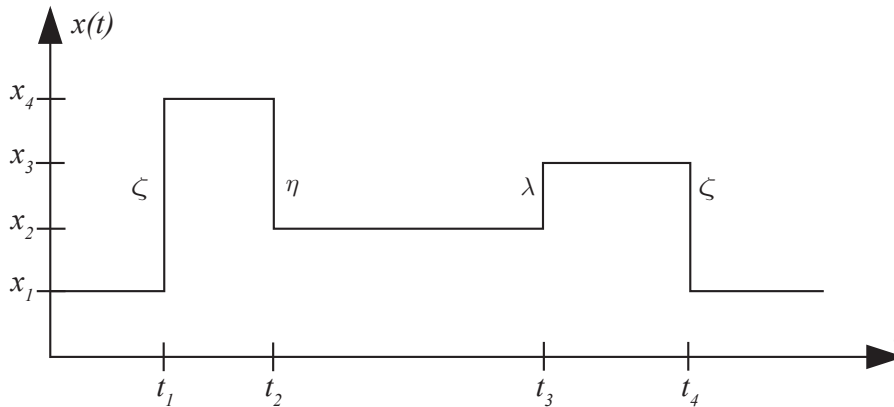


Figura 2.2 - Trajetória típica de sistema a eventos discretos.

2.4 Modelo de sistema

Modelo é a representação formal baseada na teoria ou a descrição detalhada com base na observação empírica, podendo ser a combinação dos dois. Para Minsky (1988), M é o modelo do sistema S se M concede respostas semelhantes às respostas do sistema S . Desta forma, no modelo não se busca todas as respostas sobre o sistema S , somente aquelas dentro de escopo específico. Chwif e Medina (2015) descrevem o conceito de modelo como abstração da realidade, que tem similaridade com o comportamento do sistema real, contudo sendo mais simples que o próprio sistema.

Lemes (2012) afirma que a produção de modelos é técnica comum no processo de desenvolvimento de sistema. O conhecimento precoce de especificações do sistema provê ganhos financeiros e tempo de projeto na medida em que reduz a necessidade de retrabalhos sobre a versão final do produto. Não existe forma de representar todas as especificações de determinado sistema real em único modelo, em contraponto, é inviável a criação de único modelo para cada característica do sistema. Sendo assim, é preciso especificar quais as características do sistema que se pretende analisar e a partir disto, iniciar a seleção dos elementos que devem estar presentes no modelo.

Fishman (2001) descreve alguns propósitos para construção do modelo: i) permitir

análise e organização de crenças teóricas e observações empíricas sobre o sistema deduzindo as implicações lógicas desta organização, ii) levantar a perspectiva da necessidade de detalhes e relevância de partes do sistema, iii) aumentar a velocidade das análises e conclusões sobre o sistema real, iv) fornecer estrutura para testes e possíveis modificação do sistema, v) permitir o controle/manipulação da variação das variáveis de entrada sem utilizar diretamente o sistema real e vi) oferecer custo financeiro menor que o realizado diretamente no sistema real.

2.5 Simulação do modelo de sistema

Segundo Schriber (1974) simulação é a aplicação do modelo em sucessões de testes alterando as variáveis de entrada, buscando os valores de saída ao longo do tempo. Saliby e Araújo (2001) define simulação como sendo o recurso primário para resolução de problemas reais. Existem algumas vantagens no uso da simulação: i) em alguns casos é o único processo disponível de pesquisa para sistemas com alta complexidade e elementos estocásticos, que não podem ser representados por modelo analítico, ii) permite estimar o desempenho de determinado sistema sob o conjunto de parâmetros estipulados, iii) permite observar o sistema controlando o tempo de forma que as particularidades do sistema possam ser analisadas e comparadas para identificar qual delas melhor atende a determinado requisito específico (LAW, 2007; ASSIS et al., 2015).

A simulação computacional permite responder a várias questões sobre o sistema simulado, alterando, por exemplo, o valor dos parâmetros de entrada do modelo e observando certas características do sistema. Segundo Reis (2014) representar o desempenho do sistema real é o que se objetiva na simulação. Contudo, para isto ser realizado, deve haver software de simulação compatível que tenha a capacidade de processar os dados simulados e estabelecer o comportamento aceitável.

2.5.1 Softwares de simulação de tráfego veicular

Atualmente no mercado existem várias opções de softwares de simulação para as mais variadas aplicações, sejam estes softwares de licença aberta ou licença comercial. Na simulação de tráfego urbano veicular, existe o *Planung Transport Verkehr* - (PTV) VISSIM. Este software é original da Universidade Karlsruhe/Alemanha e utiliza modelo psicofísico de acompanhamento de carros para o movimento longitudinal e algoritmo baseado em regras para o movimento lateral (LIU et al., 2012; HUANG et al., 2013).

Outra opção de ferramenta de simulação de tráfego veicular é o *Simulation of Urban Mobility* (SUMO) que é um dos principais softwares utilizados para tráfego veicular, com simulação microscópica de trânsito. Tem o intuito de auxiliar a comunidade científica de pesquisa de tráfego veicular como ferramenta de controle e otimização de tráfego. O SUMO é o conjunto de aplicações que simula cenários de tráfegos em grande escala (BORN, 2015; KRAJZEWICZ et al., 2012).

O Software AnyLogic, que é a ferramenta para modelagem e simulação multimétodos, é focado nas áreas de saúde, indústria, logística, processos, dinâmica social, ecossistemas, defesa, gerenciamento de projetos, infraestrutura em tecnologia da informação, dinâmica de pedestres, tráfego veicular, aeroespacial e fotovoltaico (ANDRES et al., 2016; ZLATANOVSKA et al., 2018).

O AnyLogic simula tráfego veicular com movimentos de retornos em cruzamentos não sinalizados e permite criação de modelos com configurações geométricas detalhadas como calçadas, paradas de transporte público, travessia de pedestres, faixas de tráfego exclusivas entre várias outras. O Software AnyLogic é o único que possui ao mesmo tempo modelagem baseada em agentes, simulação a eventos discretos e dinâmica de sistema (GRIGORYEV, 2016; POP, 2017). Isto o torna o software mais completo para o estudo de sistemas de tráfego veicular.

2.6 Distribuições probabilísticas

Souza (2011) define distribuição de probabilidade sendo a descrição da probabilidade para cada valor da variável aleatória X , de modo que para todo valor individual de X , $0 \leq P(x) \leq 1$ (a probabilidade de x está entre zero e um) e que para todos os valores possíveis de X , $\sum P(X) = 1$ (o somatório da probabilidade de x é igual a um). Modelos de distribuição são expressões que sintetizam o comportamento de variáveis aleatórias quanto à possibilidade de ocorrência de seus valores.

Nelson e Yamnitsky (1998) afirmam que a distribuição da variável aleatória X é comparada através dos testes de aderência e pode ser aproximada por uma das distribuições probabilísticas: normal, beta, exponencial, gama, uniforme, Weibull, lognormal, Erlang, Poisson, Birnmaun-Saunders, generalizada de Pareto, triangular entre várias outras. A escolha do modelo de distribuição apropriado é o ponto de máxima importância na análise de dados (BOZDONGAN, 1987). Dentre os critérios para a seleção dos testes, os baseados no máximo da função de verossimilhança são os mais utilizados como: i) teste da razão de verossimilhança (TRV), ii) critério de informação de Akaike (AIC) e iii) critério Bayesiano (BIC) (ANDRE, 2008;

BOZDONGAN, 1987).

Os três critérios apesar de possuírem conceitos diferentes em relação aos modelos de avaliação, utilizam a mesma base estatística, o máximo da função de verossimilhança como medida do ajustamento. No entanto, definem valores críticos diferentes e esta é a principal diferença entre os três métodos (ANDRE, 2008). Cada função de distribuição tem forma matemática distinta, produzindo resultados distintos que dependem de vários parâmetros estatísticos. A distribuição normal (Gauss, Laplace ou Laplace-Gauss) é matematicamente dados por:

$$f(X_n) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2}, -\infty < x < \infty \quad (2.1)$$

na qual x é o valor real atribuído a todos os elementos de X , dado por $x = X(s)$ sendo X é a função do espaço amostral s , μ é a média da distribuição de X e σ é o desvio padrão da distribuição de X . A distribuição binomial é dada por:

$$f(X_b) = \binom{n}{x} p^x q^{n-x} \quad (2.2)$$

na qual p é a probabilidade de ocorrência do evento, q é a probabilidade de não ocorrência do evento e n é o número de experimentos realizados (SPIEGEL, 1978). A distribuição Birnbaum-Saunders é composta por dois parâmetros de forma: i) $\alpha > 0$ e ii) $\beta > 0$ (LEMONTE; CORDEIRO, 2011), (LEMONTE et al., 2008) e é dada por.

$$f(X_t) = \beta \left[\frac{\alpha x}{2} + \left\{ \left(\frac{\alpha x}{2} \right)^2 + 1 \right\}^{\frac{1}{2}} \right]^2 \quad (2.3)$$

A distribuição generalizada de Pareto é comumente utilizada para modelar caudas de outra distribuição. São três parâmetros que compõem a distribuição generalizada de Pareto: i) parâmetro de forma, ii) parâmetro de escala e iii) parâmetro de localização (EMBRECHTS et al., 1997; KOTZ; NADARAJAH, 2000). A distribuição generalizada de Pareto possui três formas básicas e cada forma corresponde a uma distribuição que limita os dados de excedência para a classe diferente de distribuição adjacente: i) distribuições cujas as caudas diminuem exponencialmente, levando a zero o parâmetro de forma, ii) distribuições cujas caudas diminuem polinomialmente, levando o parâmetro de forma a valor positivo e iii) distribuições cujas caudas são finitas,

levando o parâmetro de forma a valor negativo (EMBRECHTS et al., 1997; KOTZ; NADARAJAH, 2000).

2.7 Considerações

Este capítulo abordou os conceitos de sistemas, modelos e simulação. Apresentou de forma resumida os conceitos sobre sistema a eventos discretos, que podem ser utilizados para modelar sistemas reais de tráfego veicular, descreveu ainda algumas funções de distribuições probabilísticas, que são importantes para identificar o comportamento de variáveis aleatórias dentro do sistema. O próximo capítulo trata do processo de otimização.

CAPÍTULO 3

PROCESSOS DE OTIMIZAÇÃO

Este capítulo está direcionado a apresentação dos processos de otimização através dos seus conceitos e aplicações. São apresentados algoritmos que auxiliam no processo de otimização abordando características individuais para que se possa visualizar as melhores aplicações de cada um.

3.1 Otimização

Silva (2005b) define que otimizar é melhorar algo existente (sistema real) ou não (simulador), a fim de aumentar o desempenho sem ter que testar todas as possibilidades envolvidas, reduzindo o tempo de busca pela melhor solução. No problema a ser otimizado, o sistema ou modelo é conhecido e a saída é a desejada. A tarefa é encontrar a entrada que corresponde a saída desejada (CHWIF; MEDINA, 2015; EIBEN; SMITH, 2015). A Figura 3.1, adaptada de Souza (2019), ilustra o processo de otimização na qual a simulação avalia os candidatos à solução fornecidos pelo método de otimização e retorna os indicadores de desempenho usados para orientar a otimização.

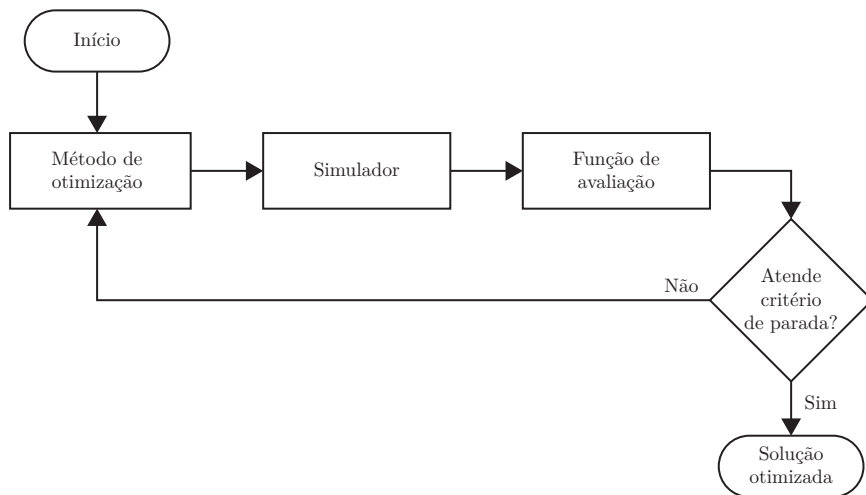


Figura 3.1 - Otimização baseada em simulação.

Dependendo do problema de otimização, podem existir vários problemas matemáticos associados, vinculados a diferentes formulações ou a distintas técnicas de resolução (CALIXTO, 2008). Os métodos de otimização são conhecidos como métodos de programação matemática e os tópicos de probabilidade aplicada são usados na

predição de resultados de sequência de eventos incertos (GAVIRA, 2003).

São quatro os tipos de métodos que envolvem o processo de otimização: determinístico, heurístico, estocástico e inferencial. Os métodos determinísticos são adequados para problemas bem conhecidos pois, atuam em pontos de casualidade. Quando o problema aceita a solução otimizada com base no conhecimento prévio, heurísticas são aplicadas. O método estocástico é adequado para problemas cujo estado futuro não pode ser completamente determinado pelo estado atual. Os métodos de inferência podem ser aplicados a problemas que ocorrem sob certas condições no passado e tendem a ocorrer nas mesmas condições no futuro (ABRAMCZUK, 2009; PAIVA, 2016).

Abramczuk (2009) desenvolve a métrica com a relação entre complexidade em construir o modelo e a incerteza dos resultados obtidos pelo modelo, ilustrada na Figura 3.2. Nesta métrica é possível escolher, dada complexidade e incerteza, qual método de otimização melhor se adéqua ao modelo estudado.

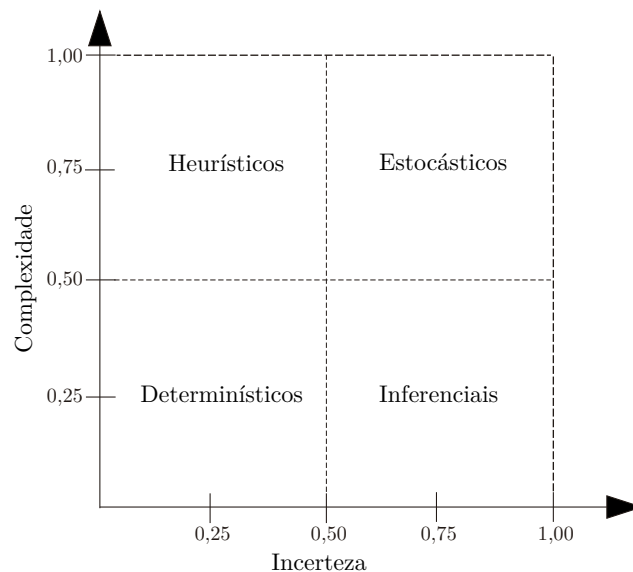


Figura 3.2 - Métrica para escolha do método de otimização.

3.2 Algoritmos determinísticos

Métodos determinísticos são algoritmos analíticos, que dependem de derivadas da função objetivo para mudar de uma iteração para outra. A função objetivo e as restrições são dadas como funções matemáticas e relações funcionais. Na maioria

dos casos, eles precisam usar pelo menos a primeira derivada da função objetivo em relação às variáveis do modelo. Estes métodos apresentam teoremas que levam a convergência para a solução ótima que não é necessariamente a solução ótima global. Como nestes métodos a solução encontrada depende do ponto de partida estabelecido, pode-se convergir para um ponto ótimo local (HAFTKA et al., 1990; HOLTZ, 2005; SCHWAAB; PINTO, 2007).

3.2.1 Algoritmo de Nelder-Mead

Wright (2012) afirma que o algoritmo Nelder-Mead (NM)¹ surge da intenção em solucionar problemas de otimização não linear do mundo real. São problemas considerados de difícil resolução devido à sua multimodalidade e grau de complexidade de se obter a primeira derivada de uma função f .

Este algoritmo é um dos métodos amplamente utilizados para otimização não linear sem restrições (LAGARIAS et al., 1998). O método é desenvolvido a partir do cálculo do centroide, dado por:

$$\bar{P} = \frac{1}{D} \sum_{i=1}^D P_i (i \neq h) \quad (3.1)$$

na qual \bar{P} é o centroide e D é a quantidade de variáveis. Define-se y_i o valor da função objetivo no ponto P_i , e assim y_h e y_l representam a maior e a menor aptidão, tendo h como ponto anterior ao i . O algoritmo de NM, procura substituir o P_h passando por operações de encolhimento, contração, reflexão e expansão (LUCCHI, 2016). Este algoritmo se apresenta capaz de ampliar a área de busca, a fim de fugir dos mínimos locais e contraindo converge para ótimo global (WRIGHT, 2012; NELDER; MEAD, 1965).

3.3 Métodos heurísticos

O uso da aleatoriedade ao se escolher parâmetros a serem avaliados tem efeito seletivo na quantidade de buscas no espaço de parâmetros da função objetivo. Isto é ampliado quando não se conhece ou a quantidade de informações é baixa quanto à estruturação das variáveis da função objetivo ao longo de todo espaço amostral. Os métodos heurísticos consistem em aproximações repetitivas até que um dos critérios de parada seja atendido. Outra característica destes métodos é realizar número

¹Este método também é conhecido como Nelder-Mead simplex, método simplex geométrico flexível ou método dos poliedros flexíveis.

elevado de avaliações da função objetivo em toda a área de busca, aumentando assim a possibilidade de encontrar o valor otimizado mais próximo do ótimo global (FRANCA, 2015; REIS, 2014; SCHWAAB; PINTO, 2007; LEE; EL-SHARKAWI, 2008).

3.3.1 Algoritmo de força bruta

O algoritmo de força bruta é definido por estratégia que busca a solução para o problema com geração e teste de valores aleatórios no espaço de busca das variáveis. Ele utiliza a enumeração de todas as soluções possíveis como guia (CORMEN et al., 2001). A Figura 3.3, adaptada de Santos (2016), ilustra o fluxo do algoritmo de força bruta.

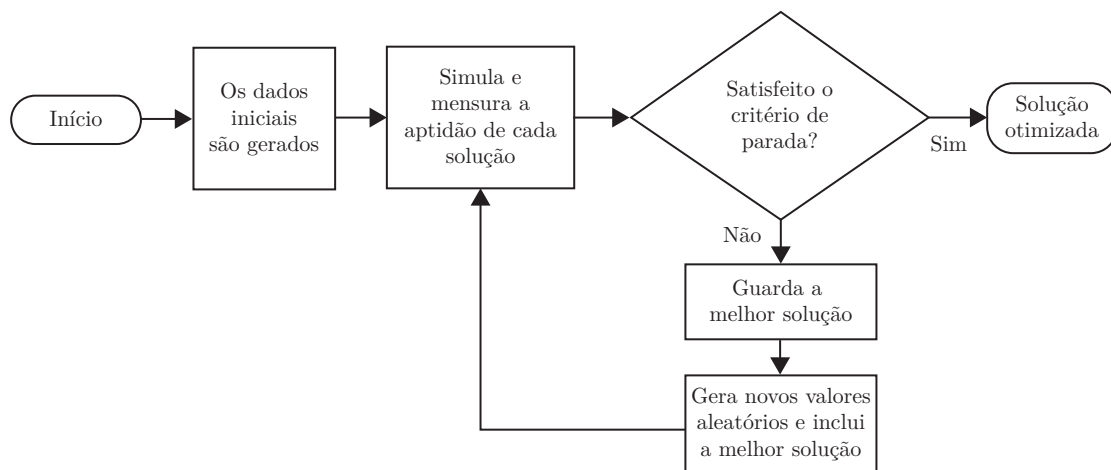


Figura 3.3 - Fluxograma do Algoritmo de Força Bruta.

O algoritmo de força bruta é método direto para resolução de problemas, geralmente utiliza o conhecimento do especialista para definição do espaço de busca das variáveis de decisão. O nome força bruta refere-se à carga de trabalho do computador e em vários problemas, a estratégia de força bruta é a mais simples de aplicar (LEVITIN, 2012).

Uma variante do algoritmo de força bruta ocorre quando se realiza inclusão no processo de uma etapa que atua como uma memória que armazena o resultado que apresenta melhor eficácia dentro daqueles avaliados na iteração. Esta alteração acontece já a partir da segunda iteração onde a quantidade de grupos de valores a serem gerados será $n - 1$, partindo do princípio que o grupo de valores que foi mais eficaz na iteração anterior se encontra armazenado e será incluído e seguirá o fluxo do processo (DASGUPTA et al., 2009).

3.3.2 Algoritmo genético

Os algoritmos genéticos (AG) estão entre os primeiros algoritmos evolutivos e entre os mais conhecidos. No caso da otimização baseada em simulação, os AG estão entre os métodos mais utilizados. O algoritmo genético é utilizado para otimização global com base em estruturas naturais e geneticamente selecionadas. Estas estruturas exploram informações históricas para encontrar pontos onde o melhor desempenho pode ser esperado (SILVA, 2005a; CALIXTO, 2008; MEYER-NIEBERG et al., 2020). A Figura 3.4, adaptada de Reis (2014), ilustra o fluxo do algoritmo genético clássico.

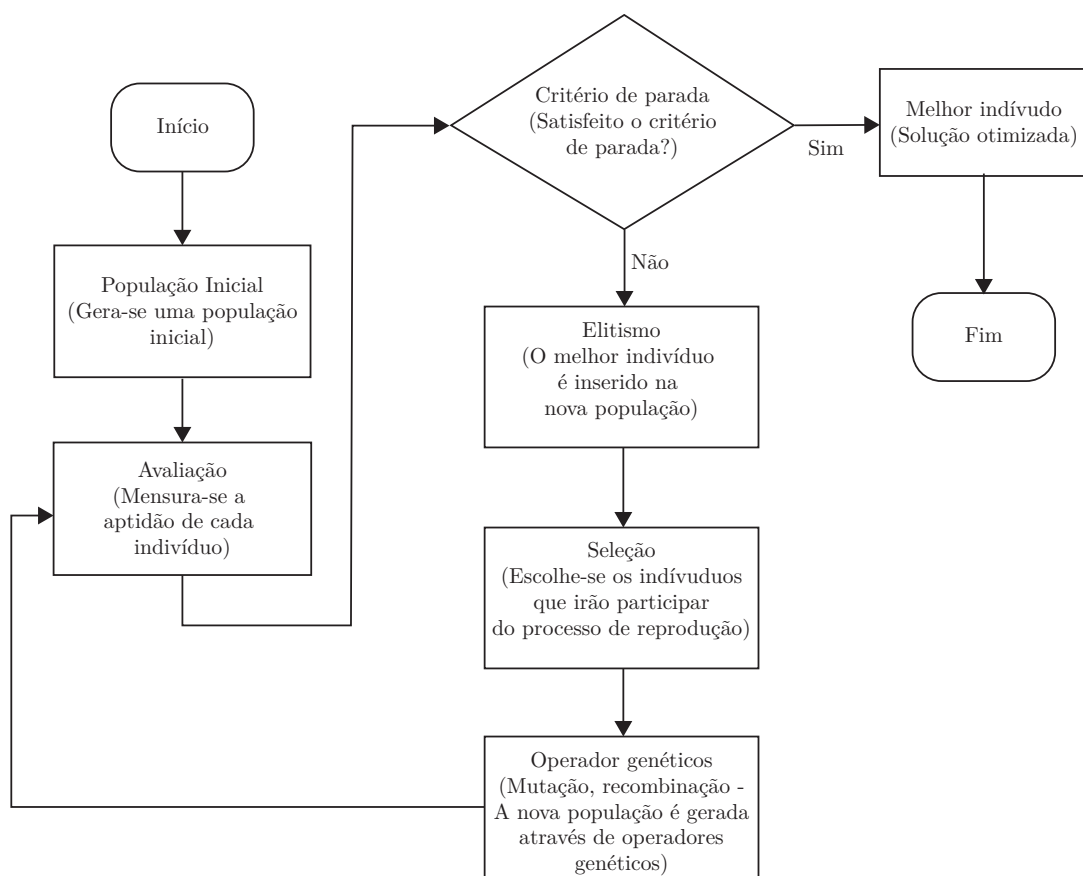


Figura 3.4 - Fluxograma do algoritmo genético clássico.

Na construção do AG a população inicial normalmente é gerada aleatoriamente e deve ter vários indivíduos, o suficiente para gerar diversidade, mas não para tornar o algoritmo lento. Para executar o algoritmo genético, deve ser definida a função de avaliação/objetivo que mensura a aptidão de cada indivíduo. A função de avaliação é construída utilizando todo conhecimento possível do problema a ser resolvido (LINDEN, 2006; CALIXTO, 2008).

O algoritmo genético clássico contém duas estruturas que os direcionam aos valores otimizados: i) os manipuladores genéticos (elitismo e seleção) e ii) os operadores genéticos (cruzamento e mutação). O manipulador genético elitismo realiza a cópia do melhor indivíduo da população e o guarda para inseri-lo na nova população do AG. Esta ação garante que no pior caso, de nenhum novo indivíduo ter aptidão melhor que o da geração anterior, o valor da função de avaliação permaneça o mesmo da geração anterior. O manipulador genético seleção atua na população do AG de forma a selecionar os progenitores. A seleção induz os pais com melhores aptidão a gerarem mais filhos e indivíduos com menores aptidão a deixarem suas características genéticas (genes) nos cromossomos da nova geração (CALIXTO, 2008).

Os operadores genéticos possibilitam que o algoritmo genético seja capaz de explorar pontos novos dentro do espaço de busca e reforça a pesquisa em regiões específicas ainda não visitadas (SILVA, 2005a). No operador de cruzamento o processo envolve dois ou mais indivíduos trocando informações genéticas (REIS, 2014; GOLDBERG, 1989). O operador de mutação é o diversificador que busca em locais no entorno das soluções existentes. Este processo é basicamente selecionar uma posição do cromossomo (possível solução/um indivíduo) e mudar o valor do gene correspondente aleatoriamente para outro alelo possível (TANOMARU, 1995).

O processo de otimização utilizando o algoritmo genético sofre variações de acordo com as taxas dos operadores genéticos. Em situações onde a taxa de cruzamento é alta, mais acelerado é o processo de inserção de novas estruturas na população, contudo se esta taxa for demasiadamente elevada, estruturas com alto valor de aptidão podem ser retiradas precocemente. Caso a taxa de cruzamento seja baixa, o algoritmo tende a ficar lento ou estagnar. No caso do operador de mutação, se a taxa for baixa o algoritmo tende a ficar estagnado e se a taxa de mutação for alta, têm-se a busca aleatória (SILVA, 2005a).

3.4 Considerações

Este capítulo apresentou o processo de otimização com os diferentes métodos. No próximo capítulo é apresentada a metodologia proposta com detalhamento das etapas a serem seguidas para execução da simulação e do processo de otimização em tráfego veicular.

CAPÍTULO 4

METODOLOGIA

Neste capítulo são apresentados os procedimentos e métodos utilizados no desenvolvimento do modelo computacional, na simulação com dados reais e na otimização dos parâmetros em tráfego veicular urbano. Detalha-se as configurações do sistema, sua modelagem e simulação.

4.1 Contextualização

Diversas cidades têm problemas no tráfego dos veículos, que geram filas de congestionamentos. Estes problemas podem ser resolvidos de forma parcial, com a criação de simulador de tráfego veicular, que é usado para analisar o tráfego, otimizar e prever o tempo de espera. A metodologia proposta auxilia no projeto de controle de tráfego fornecendo suporte para à tomada de decisão.

As filas de veículos na maioria das vezes são concentradas nos cruzamentos de vias sinalizadas com semáforos. Com a expansão das cidades, se o projeto do fluxo veicular não considerar todas as variáveis, torna-se sério o problema de congestionamento para a administração pública resolver. Na maior parte, o problema pode ser parcialmente resolvido com a criação de simulador que auxilia na análise do tráfego de vias e prever alterações no sistema real, de forma a minimizar o congestionamento. Nos congestionamentos, a formação das filas segue a ordem o primeiro a chegar é o primeiro a sair (*first in, first out* - FIFO), como ilustrado na Figura 4.1.

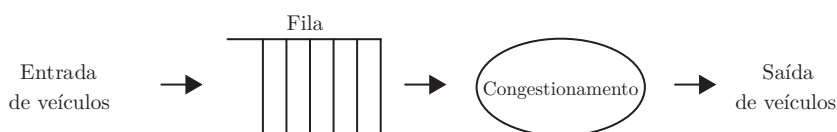


Figura 4.1 - Modelo de formação de filas FIFO.

A metodologia proposta inicia-se realizando coletas de dados na via a ser estudada. Estes dados passam por tratamentos estatísticos antes de ser utilizado no simulador. Após construído o simulador, são realizados os testes de aderência nos dados coletados, testes de simulação/réplicas e validação do simulador. De posse do simu-

lador validado, aplica-se o processo de otimização. O cálculo das emissões de gases é realizada antes e após a aplicação do processo de otimização. A Figura 4.2 ilustra o fluxo da metodologia proposta.

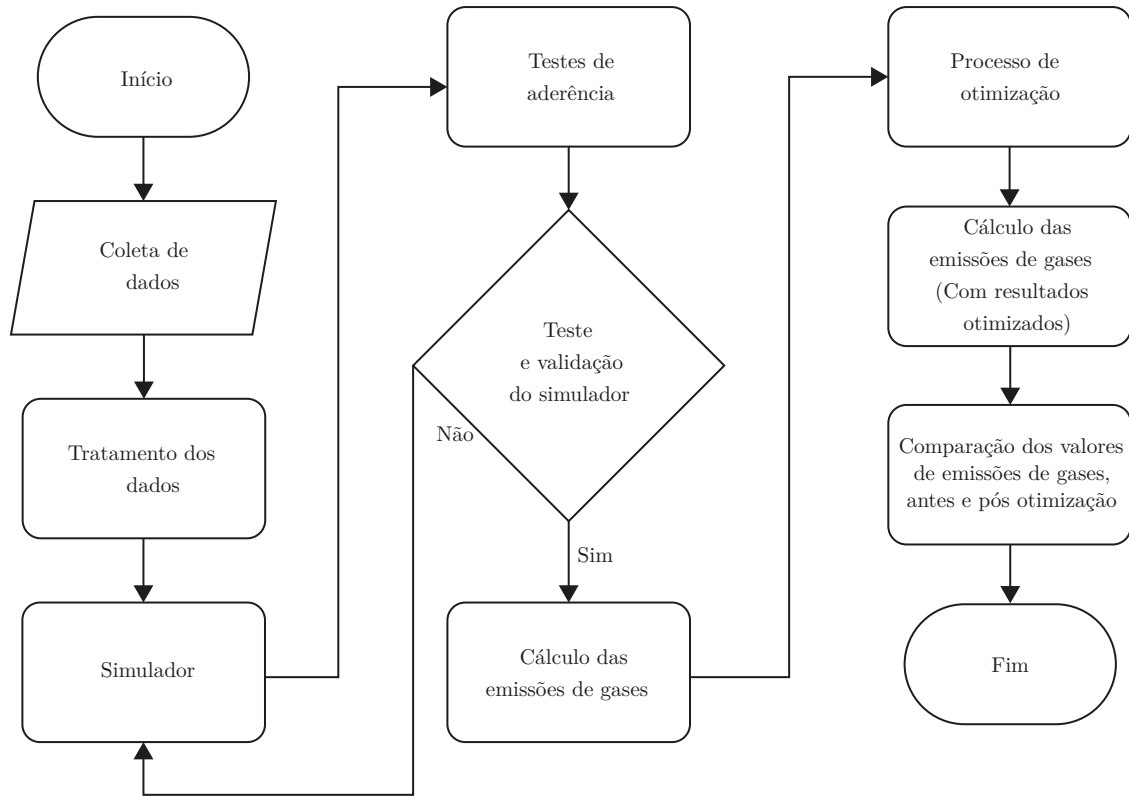


Figura 4.2 - Fluxograma da metodologia proposta.

A simulação é realizada utilizando conceito de sistema aberto. O objetivo é analisar alterações na dinâmica/comportamento deste sistema no qual as fontes de informação podem ser alteradas, como por exemplo, mudança no sentido da via. Para análise de validação é realizada simulação considerando o sistema fechado.

4.2 Coleta de dados

Para construir o simulador são necessárias informações sobre as vias a serem simuladas. A rotina de acesso (entrada/saída, paradas entre outros) do sistema real deve ser analisada para planejamento e construção das características específicas do modelo. A coleta de dados para a simulação é realizada na via em estudo, contabilizando: i) quantidade de veículos que trafegam a cada hora, ii) velocidade permitida na via, iii) ciclos de tempo de espera em cada semáforo, iv) comprimento da via e v) especificações da via, como faixas preferenciais entre outros.

Os dados coletados sobre a quantidade de veículos deve dispor as informações do dia da semana e horas do dia. Com os dados de várias coletas realizadas, produz-se as análises de estatísticas descritivas para obter a média e o desvio padrão. Os valores da análise estatística são utilizados para ajustar o modelo ao sistema real e para realização dos testes de aderência para verificar qual a distribuição probabilística melhor se adéqua ao conjunto de dados.

4.3 Construção do simulador

Para a construção do simulador utiliza-se a teoria de sistema a eventos discretos. Na construção do simulador são definidos todos os parâmetros necessários para ajustar a dinâmica do sistema real. Os parâmetros de valor fixo, têm seus valores obtidos por especialistas em vias de tráfego veicular e na coleta de dados. Alguns parâmetros fixos são: i) quantidade de faixas na via, ii) velocidade máxima permitida, iii) geometria da via, iv) tempo de espera dos veículos nos ciclos de tempos semaforicos, iv) tempo de espera para travessia de pedestres, v) faixa exclusiva para transporte coletivo e vi) outros.

Os demais parâmetros são considerados variáveis de entrada e recebem valores a partir dos dados reais, na validação do modelo com o sistema real. No processo de otimização, os valores dos parâmetros: i) entrada de veículos é definido como vetor para cada dia e hora e ii) ciclos de tempos semaforicos é definida a matriz que representa a relação entre tempos em cada estágio e cada semáforo.

O fluxo de dados no simulador proposto é ilustrado na Figura 4.3, na qual a representação hipotética da via contém duas direções com pista dupla. A via possui acessos de entrada e saída de tráfego veicular nas extremidades, nos cruzamentos com semáforos α_1 , α_2 , α_3 , α_4 , α_5 e α_6 e nos cruzamentos regulados pela preferência de passagem. A contabilização dos veículos é realizada nos semáforos, sendo desta forma possível calcular o valor correto das entradas e saídas dos veículos nas vias secundarias.

4.4 Testes e validação do modelo

De posse do simulador é possível realizar os testes e a validação do modelo. Após simular utilizando os dados reais (coletados nas vias), adquire-se dados de saída do simulador. Com os dados de saída do simulador é possível comparar as saídas do sistema real com as saídas do simulador. Se a comparação apresentar que o modelo se comporta como o sistema real, o simulador está apto a ser utilizado no processo

de otimização.

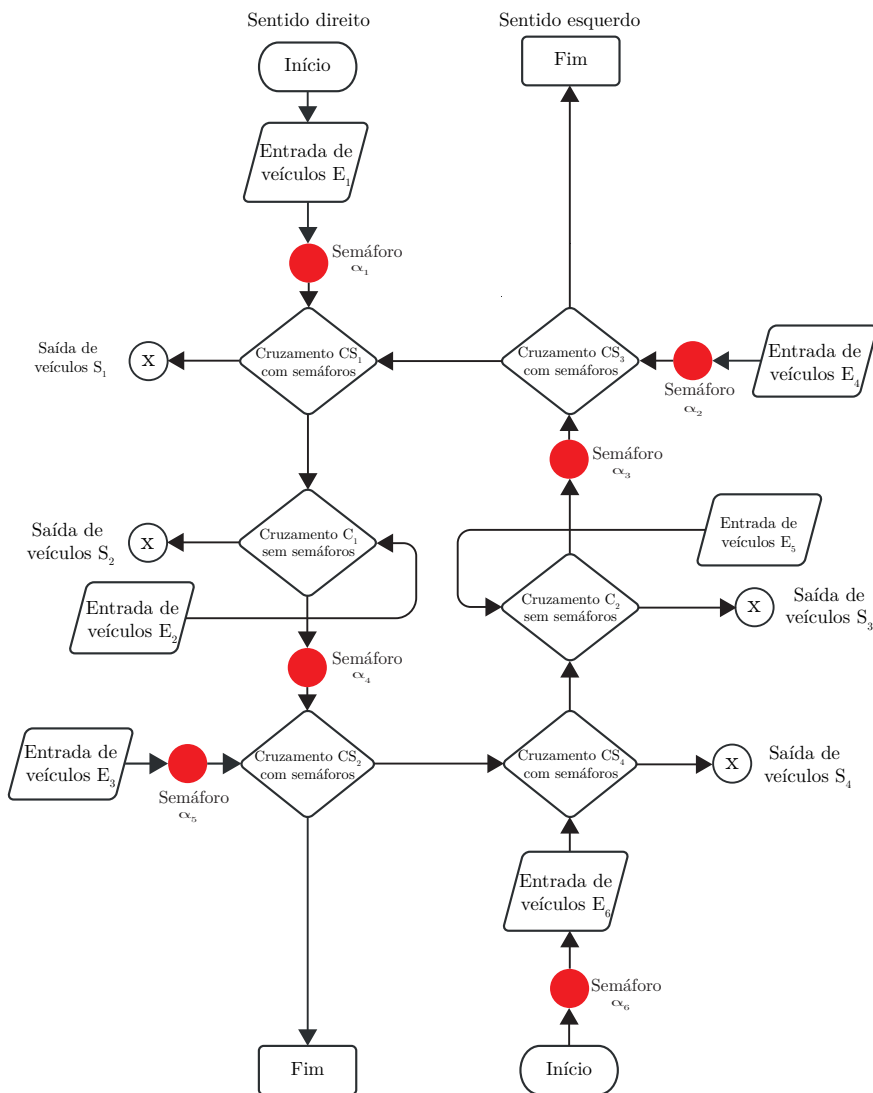


Figura 4.3 - Fluxograma hipotético do sistema real.

A integridade dos dados de entrada do modelo de simulação tem papel importante no processo de verificação. Havendo dados de entrada inválidos os resultados podem ser invalidados. A fim de garantir a integridade da resposta do modelo em comparação com a resposta do sistema real, são realizadas réplicas de simulação para testar o simulador. A validação do modelo é realizada no modelo considerando o sistema aberto e no modelo considerando o sistema fechado. Isto possibilita identificar pontos de discrepâncias na dinâmica do sistema quando comparado os resultados de ambas as considerações.

4.5 Aplicação do processo de otimização

Após os testes e a validação do modelo, constrói-se o processo de otimização, como ilustrado na Figura 3.1. Existem várias configurações que funcionam como estratégias para reduzir o congestionamento, o problema a ser resolvido é encontrar a melhor configuração. A otimização é realizada com o objetivo de minimizar o tempo médio gasto no trecho em estudo. O método de otimização deve selecionar variáveis em determinado domínio e obedecer as restrições do problema de congestionamento.

No processo de otimização, a matriz $p \times q$ representa o conjunto de variáveis aleatórias, no qual p são os estágios dos ciclos semaforicos e q são os valores dos tempos possíveis de cada semáforo em determinada solução e em determinada rodada de simulação. Desta forma, busca-se a configuração que resulte em menor tempo médio de tráfego na via. Os possíveis valores de configurações são gerados na matriz $p \times q$ e esta matriz é inserida no simulador, uma a cada rodada de simulação.

São utilizados no processo de otimização três técnicas: i) Algoritmo de Nelder-Mead, ii) Algoritmo de força bruta e iii) Algoritmo genético. O propósito de usar três técnicas de otimização consiste em comparar as saídas de ambos e encontrar o que apresenta a melhor solução. Durante o processo de otimização, são armazenadas as saídas contendo o tempo médio de permanência na via e a matriz de configurações com o resultado desta espera.

4.6 Análise da emissão de gases

A quantidade de gases emitidos pelos veículos que trafegam na via é quantificada por tipo de gás. Esta análise é realizada antes e após o processo de otimização. A emissão de gases varia de acordo com a categoria do veículo, como disposto na Tabela 4.1, adaptada de Cancelli e Dias (2014).

Tabela 4.1 - Fatores gerais de emissão de gases por categoria veicular.

Categorias /Poluentes	<i>CO</i> (<i>g.km⁻¹</i>)	<i>NO_x</i> (<i>g.km⁻¹</i>)	<i>RCHO</i> (<i>g.km⁻¹</i>)	<i>NMHC</i> (<i>g.km⁻¹</i>)	<i>CH₄</i> (<i>g.km⁻¹</i>)	<i>MP</i> (<i>g.km⁻¹</i>)	<i>CO₂</i> (<i>g.km⁻¹</i>)
Automóveis e veículos comerciais leves	1,2	0,4	0,01	0,4	0,15	0,015	210,0
Motocicletas	3,0	0,15	-	0,5	0,1	0,010	210,0
Caminhões leves, médios e pesados	1,0	0,4	-	5,0	-	0,15	445,0
Ônibus urbanos e rodoviários	1,1	0,5	-	9,0	-	0,2	445,0

Para estimar a quantidade de emissões utiliza-se a expressão retirada de Cancelli e Dias (2014), dada por:

$$E_{linha,i} = F_{r,j} \times (F_{e,i}/1000) \times L \quad (4.1)$$

na qual $F_{e,i}$ é o fator de emissão do poluente i , $F_{r,j}$ é o número total de veículos da categoria j que circulam na via em estudo durante o período de tempo t , L é o comprimento total da via em quilômetros e a constante 1000 é o fator de conversão de gramas para quilogramas. É possível, quando necessário, calcular a taxa de emissão por poluente i ($E_{L,i}$ em $kg.h^{-1}.km^{-1}$), matematicamente dado por:

$$E_{L,i} = \frac{E_{linha,i}}{L \times t}$$

na qual t é o tempo total utilizado no cálculo de $E_{linha,i}$.

Para realizar a análise de emissão de gases, os dados a serem coletados são: i) quantidade de veículos que trafegam na via, ii) tempo de simulação, iii) comprimento total do trecho percorrido e iv) comprimento total das vias que compõe a área analisada. Após o cálculo da emissão total de gases em kg/h , é possível avaliar se a otimização resulta em redução dos níveis de emissões, comparando os valores antes e após o processo de otimização.

A análise de emissão de gases é realizada considerando o sistema aberto e o sistema fechado. Mesmo que o conceito de sistema fechado seja o fato de que este não realiza troca de energia com o ambiente externo, deve-se considerar que existe a possibilidade de haver nova dinâmica na distribuição dos gases, havendo mudanças nas condições do tráfego veicular, por isto deve ser realizada a análise em ambas considerações.

4.7 Considerações

Neste capítulo são descritas a metodologia utilizada, a etapa de coleta de dados e a construção do simulador. Este capítulo apresenta os mecanismos utilizados para validação do simulador e construção do processo de otimização. No próximo capítulo são apresentados os resultados obtidos da aplicação da metodologia proposta.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS

Este capítulo apresenta os resultados obtidos utilizando a metodologia proposta, no qual está dividido em: i) apresentação do estudo de caso, ii) coleta de dados, iii) construção do simulador, iv) validação do sistema, v) resultados da simulação, vi) aplicação do processo de otimização e vii) comparação entre os valores antes e após aplicar a estratégia proposta.

5.1 Ambiente para estudo de caso

Na Cidade de Goiânia/Goiás, existe pelo menos quinze pontos de congestionamentos que foram listados pela Secretaria Municipal de Trânsito, Transportes e Mobilidade (SMT) no ano de 2020. Normalmente estes locais são de comércio intenso, entrada e saída de escolas/universidades entre outros. Conforme o levantamento da SMT, os locais com maior incidência de congestionamentos são: i) Av. T-63, ii) Av. 85, iii) Av. Jamel Cecílio, iv) Av. Castelo Branco, v) Av. Rio Verde, iv) Praça Cívica, ii) Av. Universitária entre outras.

Dentre os trechos de maior congestionamento, o escolhido para realizar o estudo de caso é composto pela Av. Universitária, partindo do cruzamento com a Rua 239 até o cruzamento com a Rua 233. Após a Rua 233 sentindo Setor Central o trecho é nomeado Rua 10 seguindo até a Praça Dr. Pedro Ludovico Teixeira (Praça Cívica). Para efeito prático, todo o trecho estudado será tratado de Av. Universitária e é apresentado na Figura 5.1.

A história da Av. Universitária e sua localização demonstram a sua relevância para a Capital do Estado de Goiás. No final da década de 1950 surgem a Universidade Católica de Goiás e a Universidade Federal de Goiás. A proximidade com a Capital Federal também chamou a atenção para aspectos comerciais (CINTRA, 2012). Segundo Ágatha (2017), devido as instalações das instituições de ensino superior, aumento no fluxo de pessoas, aumento no tráfego veicular na Av. Anhanguera entre outros, foi necessário construir uma conexão entre o Setor Leste Universitário e o Setor Central. Dando origem ao projeto e posterior construção da Av. Universitária.

A administração municipal da Cidade de Goiânia através da SMT, realizou várias benfeitorias na cidade. Foram criadas desde faixas preferenciais para transportes coletivos, ciclovias, inserção de instrumento de fiscalização eletrônica de trânsito entre outras. A instalação dos instrumento de fiscalização eletrônica produziu entre outras

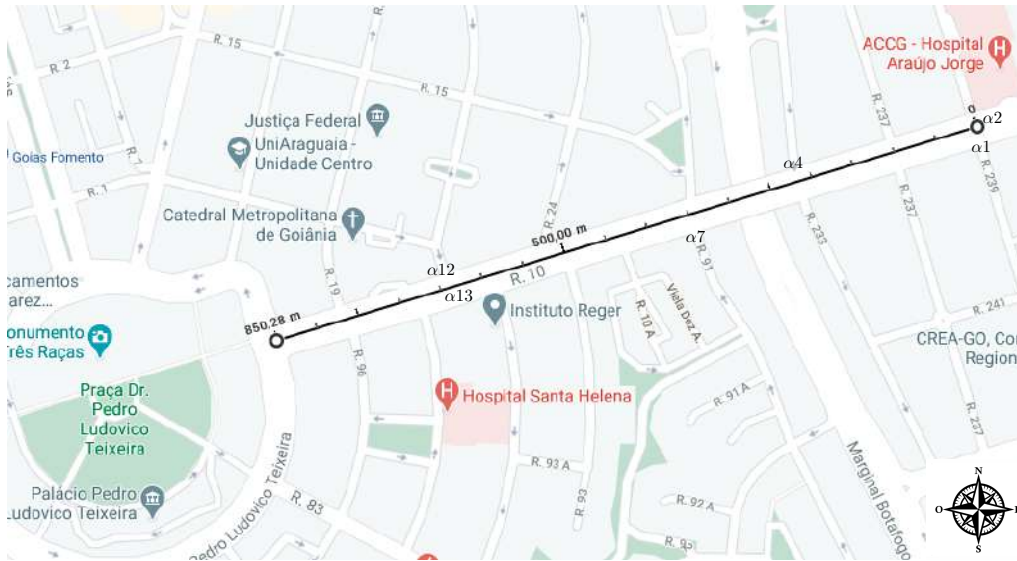


Figura 5.1 - Mapa do trecho da Av. Universitária entre Rua 239 e Praça Cívica.

benfeitorias, o mapeamento dos veículos em alguns pontos da Cidade de Goiânia. Na Av. Universitária, por exemplo, foram instalados instrumento de fiscalização eletrônica em vários pontos/semáforos. Desta forma, a escolha da Av. Universitária para estudo de caso está respaldada no volume de dados armazenados/obtidos junto à SMT.

Na intenção de dar continuidade às benfeitorias, a SMT tem como prioridade reduzir o tempo de espera nas filas formadas nos semáforos. Para atender a esta necessidade, este estudo de caso foi realizado em conjunto com a SMT. O trecho em estudo possui particularidades existentes em suas vias de entradas e saídas (vias perpendiculares e vicinais). Algumas das particularidades são: i) abriga o Hospital Araújo Jorge que é referência nacional em tratamentos contra o câncer, ii) acesso a dois centros universitários, iii) acesso à Praça Cívica, que representa o centro da Cidade de Goiânia onde abriga o Palácio das Esmeraldas que é a Sede Oficial do Governo do Estado de Goiás, iv) acesso a Catedral Católica de Goiânia e v) acesso de entrada e saída para a Marginal Botafogo, a maior via marginal de Goiânia.

5.2 Coleta de dados para o estudo de caso

Para a realização do estudo de caso é necessário obter os dados de tráfego veicular da Av. Universitária. Inicialmente os dados necessários são a quantidade de veículos que passam por semáforo e os ciclos dos tempos semafóricos. A estratégia adotada para coletar os dados utilizou as etapas: i) obtenção da quantidade de veículo e

tempos semafóricos, ii) entrevistas com engenheiros de trânsito e usuários da via em estudo, iii) estudo/entendimento do fluxo de veículo na via em estudo e iv) processamento/tratamento e análise dos dados coletados.

Os dados de quantidade de veículos que passam por semáforo e ciclos dos tempos semafóricos foi fornecido pela SMT, abrangendo período de um ano de coleta (julho/2015 a junho/2016), separados por dia da semana e por hora. As entrevistas foram realizadas com os engenheiros da SMT que atuam no planejamento e gestão do trânsito e com transeuntes que utilizam a Av. Universitária. O intuito das entrevistas foi o de identificar especificidades das vias perpendiculares e vicinais. O percurso total a ser estudado contém quatorze semáforos que regulam e registram o fluxo em quatro direções, nos quais seis semáforos registram as entradas de veículos na Av. Universitária, como disposto na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Semáforos que contabilizam os veículos que entram na Av. Universitária.

Semáforo	Localização	Sentido
α_1	Rua 239 com Av. Universitária - Próximo à Pontifícia Universidade Católica	Sul-Norte
α_2	Av. Universitária com Rua 239 - Hospital Araújo Jorge	Leste-Oeste
α_4	Rua 233 com Av. Universitária - Ponte Marginal Botafogo	Leste-Oeste
α_7	Rua 91 com Av. Universitária - Ponte Marginal Botafogo	Sul-Norte
α_{12}	Rua 20 com Av. Universitária - Catedral Católica de Goiânia	Norte-Sul
α_{13}	Av. Universitária próximo a Rua 95	Oeste-Leste

A Tabela 5.2 dispõe as configurações de tempo dos ciclos semafóricos dos quatorze semáforos, indicando os estágios: i) permissão do direito de passagem na cor verde, ii) término do direito de passagem na cor amarela, iii) proibição de passagem na cor vermelha e iv) os α_1 até α_{14} que representam os quatorze semáforos. De posse da Figura 5.1 e da Tabela 5.2 é possível identificar cada semáforo e os cinco cruzamentos na Av. Universitária, identificados por: i) α_1 , α_2 e α_3 cruzamento da Av. Universitária com a Rua 239, ii) α_4 , α_5 e α_6 no cruzamento da Av. Universitária com a Rua 233, iii) α_7 , α_8 e α_9 no cruzamento da Av. Universitária com a Rua 91, iv) α_{10} e α_{11} cruzamento da Av. Universitária com a Rua 94 e v) α_{12} , α_{13} e α_{14} cruzamento da Av. Universitária com a Rua 20. Dos cinco cruzamentos presentes na Av. Universitária, quatro possuem controle de tráfego composto por três semáforos nas intersecções. Apenas o cruzamento da Av. Universitária com a Rua 94 é controlado por dois semáforos (seguir reto ou virar a esquerda).

A partir dos dados reunidos é possível utilizando de manipulação algébrica, encontrar a média anual de veículos que passam pelos seis semáforos (Tabela 5.1) da Av. Universitária. A Tabela 5.3 dispõe a média anual de veículos que passou pelo semá-

Tabela 5.2 - Tempos dos ciclos semaforicos da Av. Universitária.

Semáforos	Tempos nos estágios [s]		
	Verde	Amarelo	Vermelho
α_1	32	5	71
α_2	71	5	32
α_3	53	5	50
α_4	29	5	91
α_5	55	5	65
α_6	55	5	65
α_7	37	5	78
α_8	68	5	47
α_9	68	5	47
α_{10}	76	5	40
α_{11}	35	5	81
α_{12}	24	5	86
α_{13}	55	5	55
α_{14}	55	5	55

Tabela 5.3 - Média anual de veículos no semáforo α_1 .

Hora\Dia	Domingo	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	Sábado
0	44	21	18	24	28	29	42
1	29	9	7	11	13	14	26
2	19	6	4	6	6	8	18
3	17	5	4	4	6	8	14
4	16	5	4	4	5	7	14
5	17	21	16	18	17	20	18
6	35	216	198	201	201	197	60
7	52	466	435	437	451	435	138
8	64	327	338	337	333	321	159
9	78	266	274	260	265	258	157
10	83	259	265	265	262	257	182
11	109	287	289	288	280	285	176
12	129	374	372	342	359	356	185
13	94	305	302	298	296	294	141
14	69	282	285	277	277	268	116
15	88	245	249	251	244	241	105
16	101	256	252	263	250	255	102
17	117	327	315	325	310	315	111
18	154	331	315	318	315	306	138
19	128	197	196	208	201	200	118
20	95	152	150	145	171	157	98
21	93	146	145	133	145	141	83
22	57	124	126	117	123	124	74
23	36	30	40	43	49	64	59

foro α_1 no período de julho/2015 a junho/2016. A média anual dos demais semáforos estão dispostas no Apêndice A, para o mesmo período.

5.3 Construçao do simulador e validacao do sistema

O simulador foi construído utilizando o **Software AnyLogic** que é ferramenta de modelagem e simulaçao multimétodo desenvolvida pela *The AnyLogic Company*. O Software AnyLogic possui linguagem de programacao e modelagem gráfica, no entanto, é possível refinar seus modelos de simulaçao utilizando código Java, permi-

tindo a exportação de aplicações Java para distribuição entre usuários.

Na construção do modelo, a Figura 5.1 foi a referência utilizada, com as representações das vias principal e secundárias, cruzamentos e semáforos. A Figura 5.2 apresenta o modelo proposto, na qual os **blocos**, identificados na legenda, representam as funcionalidades necessárias para simular o sistema real. No modelo proposto foi definido que os veículos leves possuem comprimento de 4,5 metros e os veículos de transporte coletivo possuem comprimento de 12 metros com restrição de uso da faixa exclusiva. Foi utilizado o bloco de decisões nas intersecções das vias, que define o caminho que cada veículo tomará após a entrada no trecho em estudo.

No processo de construção do simulador foram observados parâmetros e conceitos estabelecidos no Manual Brasileiro de Sinalização de Trânsito – volume v, aprovado na Resolução N° 483 do Conselho Nacional de Trânsito (CONTRAN) e produzido pelo Departamento Nacional de Trânsito (DENATRAN). Estes conceitos são: i) a análise dos dados dos semáforos deve ser realizada de forma individual em função da hora, dia da semana, mês e ano, ii) o tempo de segurança para a permanência do semáforo no estágio permitida a passagem (verde) não pode ser inferior a dez segundos, iii) o comprimento da fila deve ser medida ao longo de vários ciclos, iv) a prática de dessincronização deve ser evitada em dois locais semaforizados que pertencem a mesma rede, v) na função **entreverdes** (sincronia da cor vermelha entre dois sinais) deve ser adicionado tempo com o propósito de evitar acidentes entre os usuários (DENATRAN, 2014).

No processo de verificação e validação do modelo, foi utilizado dados coletados no sistema real para comparação entre as saídas do modelo/simulador. Nas simulações iniciais foi utilizada distribuição uniforme para verificar os erros de programação e análise nas rotinas do simulador. Na validação é necessário identificar as distribuições probabilísticas que melhor se adequam aos dados de entrada de veículos na via. Nos blocos de decisões há a necessidade de indicar qual distribuição de probabilidade será utilizada e esta indicação deve ser assertiva pois, ao inserir a distribuição de probabilidade errada, os resultados de simulação podem divergir dos resultados esperados.

Para realizar a análise dos dados coletados e medir a distribuição probabilística (DP) que melhor se adéque aos dados, é realizado teste de aderência utilizando o critério de informação de Akaike (AIC). A Tabela 5.4 dispõe os valores obtidos para o teste de aderência do semáforo α_1 para as cinco melhores DP o Apêndice B dispõem os dados dos testes de aderência para os demais semáforos.

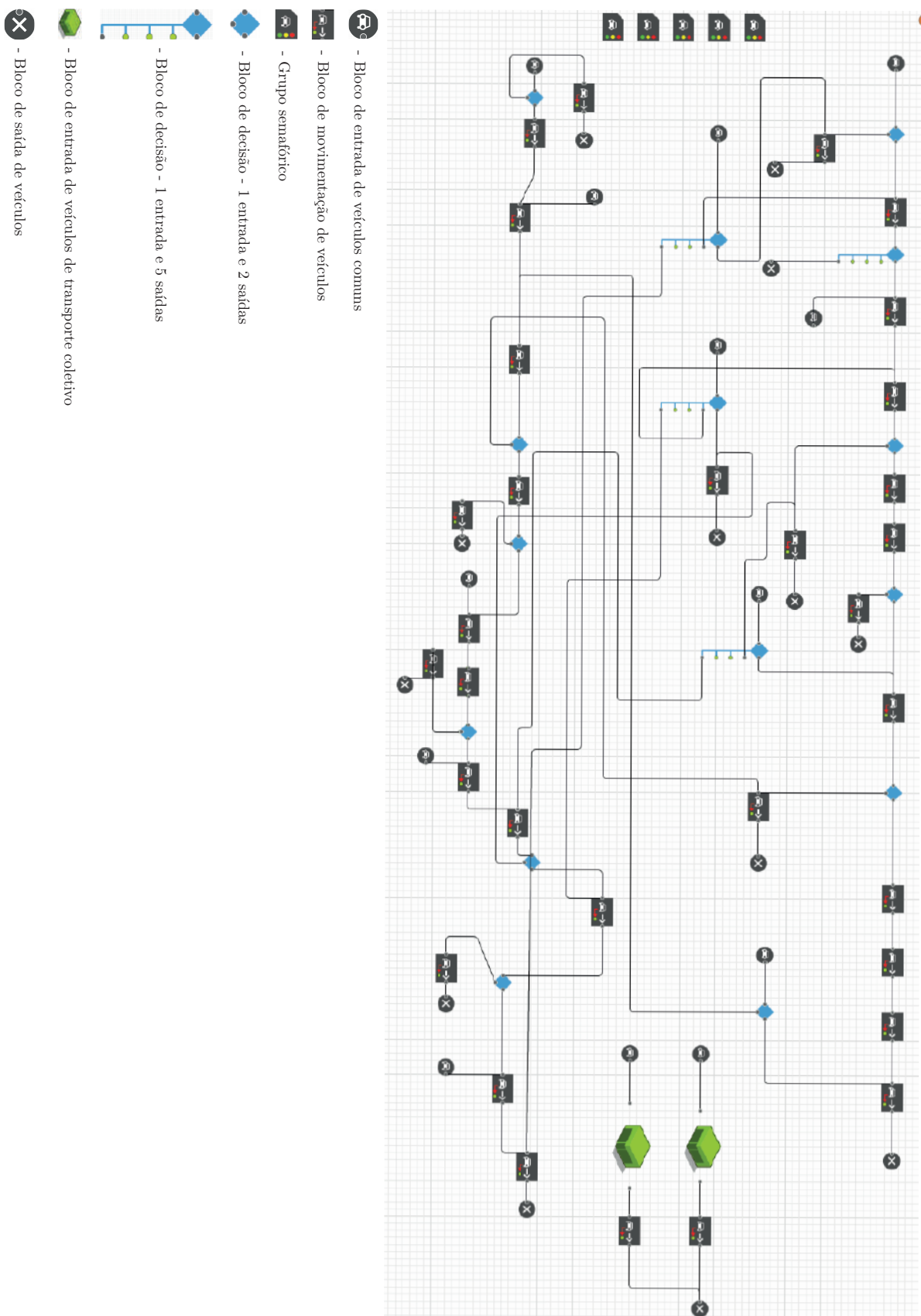


Figura 5.2 - Diagrama do modelo proposto para a Av. Universitária.

Tabela 5.4 - Testes de aderência no semáforo α_1 nas terças-feiras.

DP	AIC
Pareto	297,500
Uniforme	298,400
Nakagami	299,800
Gamma	304,500
Weibull	304,800

Os valores da média anual de veículos que transitaram nos semáforos α_1 , α_7 e α_{13} são apresentados nas Figura 5.3(a), Figura 5.3(c) e Figura 5.3(e), respectivamente. Para α_1 os valores são referentes as quartas-feiras. Para α_7 os dados são referentes as terças-feiras e para α_{13} os valores são referentes aos sábados, todos no período de julho/2015 a junho/2016, inclusive se feriado. As Figura 5.3(b), Figura 5.3(d) e Figura 5.3(f) apresentam a composição dos dados da média anual de veículos (histograma) sobrepostos na curva da função de densidade de probabilidade, que são resultados do teste de aderência, indicando a distribuição de Pareto Generalizada.

A distribuição probabilística que obtiver o melhor valor no AIC tem sua curva envolvendo a maior quantidade de dados do histograma. Os resultados das simulações para validação (simulado) \times valores coletados são apresentados na Figura 5.4. Os valores foram coletados por hora e por dia da semana, na qual a simulação também foi assim realizada. Para apresentação dos dados coletados \times dados simulados, foram escolhidos quatro conjuntos: i) o que teve o menor desvio, semáforo α_1 nas quartas-feiras, ilustrado na Figura 5.4(a) ii) o que teve o maior desvio, sendo o semáforo α_2 aos domingos, ilustrando pela Figura 5.4(b) e iii) dois que tiveram valores de desvios intermediários, que foram os semáforos α_7 nas terças-feiras e α_{13} nos sábados, respectivamente, ilustrados pela Figura 5.4(c) e Figura 5.4(d). São dispostos no Apêndice C as médias anuais de veículos, dados coletados e desvio padrão para todos os semáforos.

5.4 Estudo de caso considerando o sistema fechado

No processo de validação do modelo em sistema fechado, foi utilizado dados coletados no sistema real e considerada a limitação da quantidade máxima de veículos a trafegar por dia e hora nas vias estudadas. O valor limitante da quantidade de veículos foi obtido através das médias por via, dia e horário.

Os resultados de simulação obtidos considerando o sistema fechado (sem aumento na quantidade de veículo que transita no sistema) são apresentados nas Figura 5.5(a), Figura 5.5(b) e Figura 5.5(c), dos semáforos α_1 nas quartas-feiras, α_7 nas terças-

feiras e α_{13} nos sábados, respectivamente.

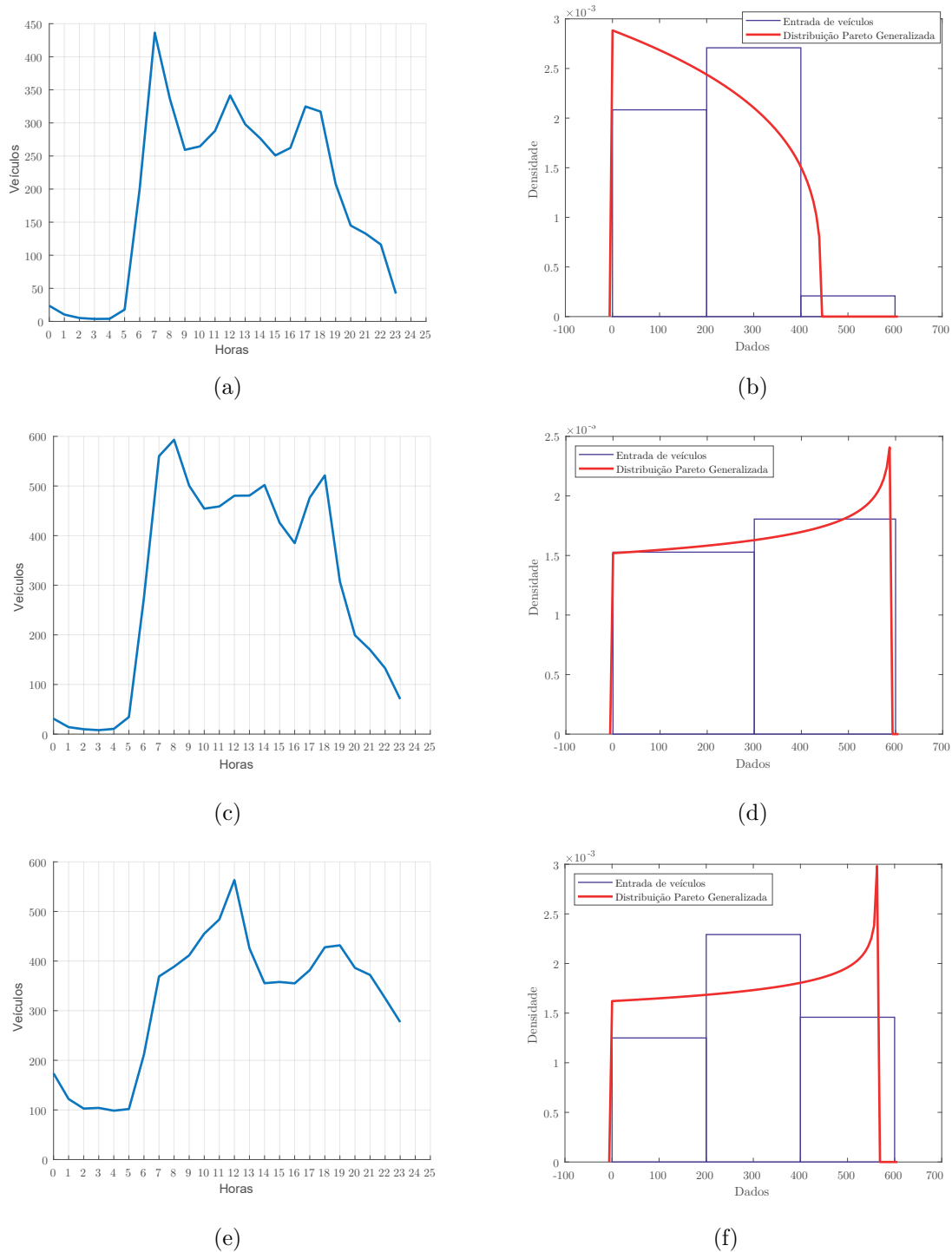


Figura 5.3 - Teste de aderência: a) semáforo α_1 nas quartas-feiras média anual de veículos, b) função de densidade de probabilidade, c) semáforo α_7 nas terças-feiras média anual de veículos, d) função de densidade de probabilidade e e) semáforo α_{13} nos sábados média anual de veículos, f) função de densidade de probabilidade.

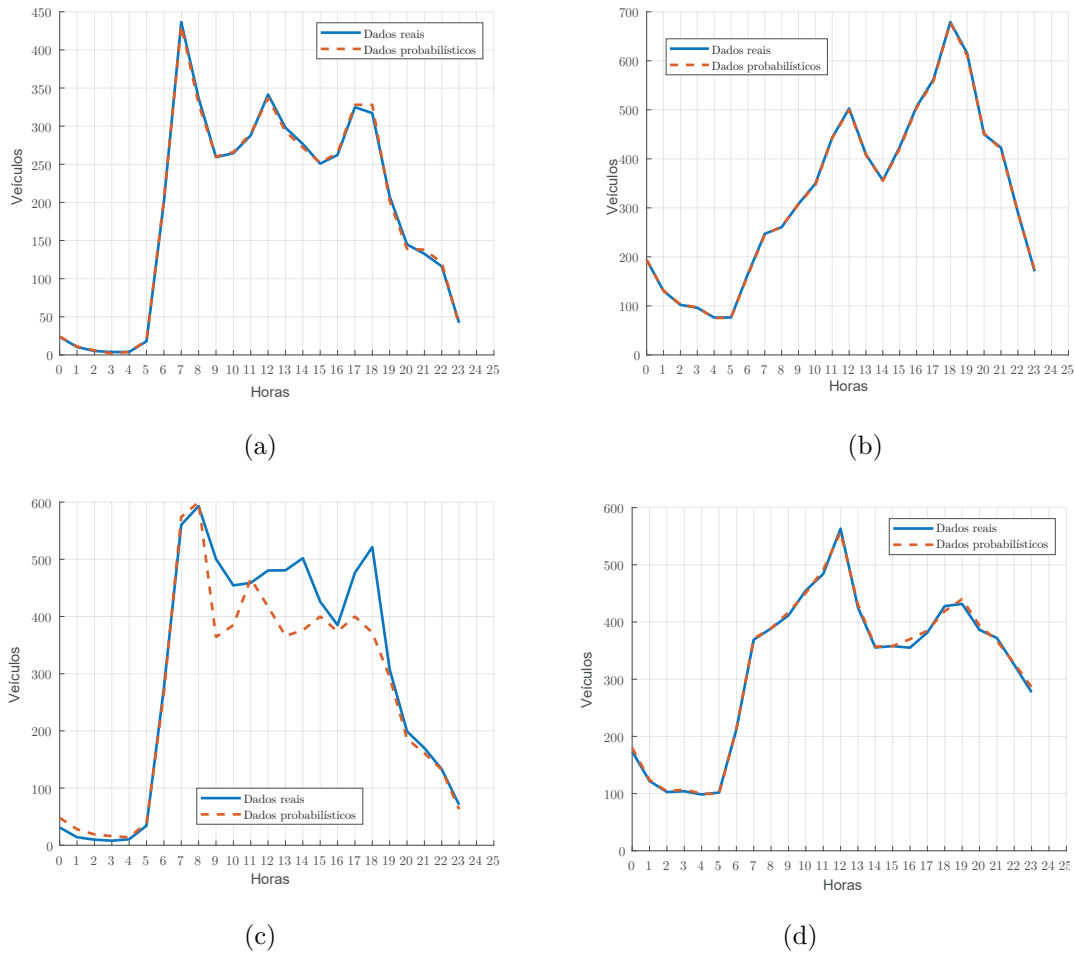


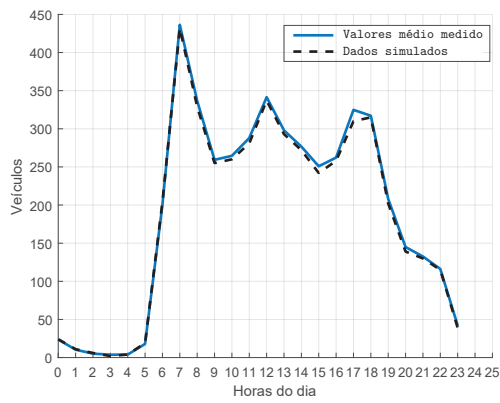
Figura 5.4 - Média de tráfego veicular com dados reais e simulados: a) semáforo α_1 nas quartas-feiras, b) semáforo α_2 nos domingos, c) semáforo α_7 nas terças-feiras e d) semáforo α_{13} nos sábados.

5.5 Otimização dos tempos dos estágios dos semáforos

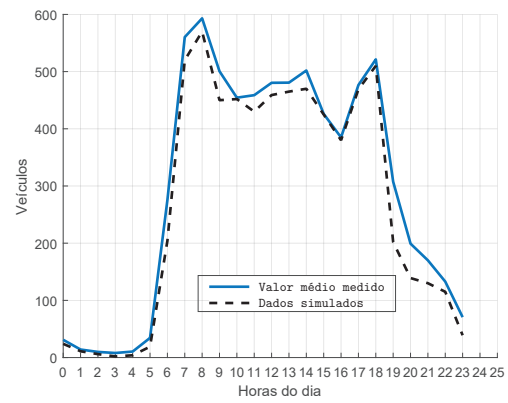
De posse do simulador/modelo validado, é possível realizar a escolha sistemática do melhor cenário que melhore o fluxo de automóveis na Av. Universitária. O intuito é reduzir o tempo médio de tráfego na via aplicando processo de otimização. São utilizados três métodos de otimização, nas quais seus resultados são comparados. Escolheu-se o método de Nelder-Mead por ser método determinístico que não utiliza a derivada da função de avaliação, o algoritmo de força bruta por ser método heurístico pouco utilizado na literatura e o algoritmo genético por ser amplamente utilizado para resolução de problemas de otimização. No processo de otimização foi utilizada a função de avaliação dada por:

$$F(t_{med}) = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N \bar{t}_i + \sigma \quad (5.1)$$

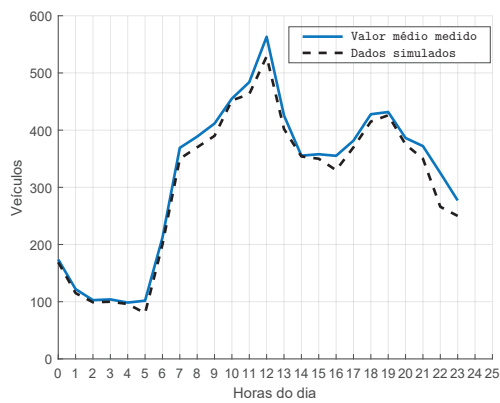
na qual $F(t_{med})$ é a média total do tempo gasto pelos veículos que trafegam no trecho em estudo, N é a quantidade de veículos que trafegou no período estudado com $i = 1, 2, \dots, N$, \bar{t}_i é o tempo gasto por veículo i para transitar pela via e σ é o desvio padrão dos tempos gastos. A minimização da expressão (5.1) representa a minimização do tempo médio do conjunto de veículos que trafegam na via em estudo, isto é, quanto menor o tempo médio total $F(t_{med})$, menor o tempo de permanência do conjunto de veículos na via.



(a)



(b)



(c)

Figura 5.5 - Resultado de simulações considerando o sistema fechado: a) semáforo α_1 nas quartas-feiras média anual de veículos, b) semáforo α_7 nas terças-feiras média anual de veículos e c) semáforo α_{13} nos sábados média anual de veículos.

Na simulação para otimização foi considerado período de um ano, mensurando o tráfego de hora em hora, como no sistema real. A dinâmica do sistema foi mapeada pelos parâmetros das distribuições de probabilidade (DP). Neste trabalho somente foi utilizada a DP generalizada de Pareto, pois se adequa a todos os semáforos (veja Apêndice B). A DP generalizada de Pareto contém três parâmetros que são: i) de forma β , ii) de escala θ e iii) de localização ρ . Cada semáforo utiliza valores diferentes dos parâmetros DP generalizada de Pareto, relacionado com sua dinâmica. Os valores dos parâmetros DP generalizada de Pareto são encontrados utilizando o teste de aderência AIC e estão dispostos no Apêndice D.

No processo de otimização, algumas variáveis implícitas dos métodos devem ser predefinidas. Para o método de Nelder-Mead é necessário informar os valores iniciais dos tempos dos ciclos semaforicos. Neste caso, foram utilizados valores aleatórios dentro do domínio de valores utilizados no sistema real. No método de força bruta é necessário definir a forma como os valores aleatórios serão gerados. Assim, foi utilizada a distribuição de probabilidade de Weibull para definir as possíveis soluções. Os parâmetros do algoritmo genético são: i) número de geração máxima $G_{max} = 25$, ii) população $P = 20$ indivíduos, iii) seleção por roleta, iv) operador de cruzamento simples com taxa $T_c = 0,7$ e v) operador de mutação uniforme com taxa $T_m = 0,05$. Os critérios de parada do processo de otimização foram os mesmos para todos os métodos, sendo $0 \leq F(t_{med}) < 10^{-2}$ em (5.1) ou número de iteração/geração.

Para realizar as análises dos resultados foram considerados dias da semana e horários que têm baixo, médio e alto fluxo de veículos no sistema real. Foram escolhidos os dias e horários: i) domingos, ii) segundas-feiras e iii) sábados, todos no período de 2h às 4h com baixo fluxo, 7h às 9h com alto fluxo e 20h às 22h com fluxo médio de veículos. No processo de otimização, os valores manipulados são os tempos dos semáforos. Estes valores expressam a dinâmica do sistema, uma vez que estão relacionados aos estágios dos semáforos que controlam todo sistema. Foram analisadas ≈ 500 configurações de estágios dos semáforos em cada hora por dia. Todo processo de simulação e otimização foi realizado em sistema operacional Microsoft Windows, máquina com processador Intel Coretm, 8 núcleos de processamento, memória RAM de 16 GB modelo DDR4 e com armazenamento de 480 GB em SSD. Para realizar o processo de simulação e otimização foram consumidas ≈ 16 horas para o método de Nelder-Mead, ≈ 72 horas para o método de força bruta e ≈ 132 horas para o algoritmo genético.

O processo de otimização é realizado primeiramente considerando o sistema aberto

e posteriormente considerando o sistema fechado. A Tabela 5.5 dispõe as médias dos tempos de tráfego na via t e a quantidade de veículos Q_v por dia da semana e por hora, tanto do sistema real quanto dos obtidos pelos três métodos de otimização. Com a simulação representando 365 dias, as médias dos tempos de tráfego na e a quantidade de veículos, foram somadas por dia e por hora, a partir disto foi encontrada a média. No cenário resultante da otimização utilizando o método de Nelder-Mead, houve redução de $\approx 0,13\%$ em t e aumento de $\approx 5\%$ em Q_v , quando comparado com o sistema real. Para o cenário otimizado pelo algoritmo de força bruta, houve redução em t de $\approx 5\%$ e em Q_v de $\approx 2\%$. A otimização com algoritmo genético resultou na redução de t em $\approx 1\%$ e incremento em Q_v de $\approx 7,5\%$, quando comparado aos valores do sistema real.

Tabela 5.5 - Valores médios dos tempos de tráfego na via e quantidade de veículos por dia e período predefinido considerando o sistema aberto.

	Período	Segundas-feiras		Sábados		Domingos	
		t [s]	Q_v	t [s]	Q_v	t [s]	Q_v
Dados reais	02:00 às 04:00	154,67	184	168,49	694	170,23	843
	07:00 às 09:00	662,37	4573	208,63	4378	184,06	2055
	20:00 às 22:00	191,16	3788	181,88	3249	179,80	3080
Nelder-Mead	02:00 às 04:00	139,05	211	153,21	770	143,96	878
	07:00 às 09:00	546,90	5509	238,96	4380	190,96	1846
	20:00 às 22:00	209,93	3478	202,15	3762	200,71	3023
Força bruta	02:00 às 04:00	132,72	205	144,44	751	139,37	873
	07:00 às 09:00	521,99	5350	225,27	4270	184,87	1834
	20:00 às 22:00	200,37	3378	190,57	3668	194,31	3004
Algoritmo genético	02:00 às 04:00	138,61	215	157,35	798	140,18	900
	07:00 às 09:00	546,82	5572	245,42	4429	190,84	1894
	20:00 às 22:00	209,90	3558	207,61	3838	205,98	3135

Com intuito de realizar análise macroscópica, produz-se o cálculo das médias totais anuais considerando todos os dias e horas, incluindo feriados. A Tabela 5.6 dispõe os valores obtidos do sistema real e dos três métodos de otimização, na qual o valor do desvio é realizado com base nos valores do sistema real. Na Tabela 5.6 os sinais + e - representam aumento e redução, respectivamente, em %. Quando realizada a comparação dos dados de forma macroscópica (global) e comparada a análise realizada em dias e horários específicos, os métodos de otimização não apresentam comportamentos diferentes. Na análise global, o método de Nelder-Mead continuou tendo redução menor que o método de força bruta, com valor de t em 2% comparado a redução de $4,3\%$ do método de força bruta. O algoritmo genético continuou obtendo redução em t de $\approx 1\%$ e aumento em Q_v de $\approx 7\%$.

Como a otimização foi realizada variando sistematicamente os tempos dos ciclos semafóricos, os resultados são os melhores tempos de ciclo dos semáforos que pro-

Tabela 5.6 - Valores anuais médios dos tempos de tráfego na via e quantidade de veículos considerando o sistema aberto.

Dados reais		Nelder-Mead		Força bruta		Algorit. Gen.	
t [s]	Q_v	t [s]	Q_v	t [s]	Q_v	t [s]	Q_v
188,95	15297544	185,17	15924743	180,83	15481115	187,29	16434152
Desvio %		-2,00	4,1	-4,30	1,20	-0,88	7,43

duzam o menor tempo médio t para cada veículo iniciar e completar o percurso na via em estudo. A Tabela 5.2 dispõe os tempos dos ciclos semaforicos do sistema real e a Tabela 5.7 dispõe os tempos dos ciclos semaforicos otimizados, na qual o estágio término do direito de passagem (cor amarela), foi suprimido por ter seu valor fixo em 5 segundos, definido por regulamentação específica.

Tabela 5.7 - Tempos otimizados dos ciclos semaforicos da Av. Universitária considerando o sistema aberto.

Semáforos	Tempos dos estágios [s]					
	Nelder-Mead		Força bruta		Algoritmo genético	
	Verde	Vermelho	Verde	Vermelho	Verde	Vermelho
α_1	28	80	22	60	33	45
α_2	75	33	53	29	40	38
α_3	73	35	50	32	38	42
α_4	37	52	37	45	50	65
α_5	46	43	40	42	61	56
α_6	42	47	39	43	57	58
α_7	31	72	21	52	46	90
α_8	61	42	45	28	82	54
α_9	60	43	47	26	81	55
α_{10}	65	38	52	27	78	55
α_{11}	25	78	22	57	48	85
α_{12}	32	75	19	60	38	85
α_{13}	60	47	53	26	67	56
α_{14}	62	45	52	27	63	60

Ao comparar os dados dispostos nas Tabela 5.2 e Tabela 5.7, observa-se que os valores obtidos pelo método de força bruta para os tempos do ciclo semaforico são menores, tanto para o estágio de passagem permitida (cor verde) quanto para o estágio de passagem proibida (cor vermelha). Este resultado indica maior dinâmica no sistema, no qual os veículos deverão manter-se mais em movimento, reduzindo o tempo de espera na fila dos semáforos, como apresentado nos tempos de ciclo do semáforo α_4 no qual a redução no estágio de passagem proibida foi maior que a redução no estágio de passagem permitida. Outra observação foi a tentativa de criação da onda verde, indicada no ajuste dos tempos dos semáforos α_7 , α_8 e α_9 . Este conjunto de semáforos pertencem ao mesmo cruzamento e o tempo de ciclo utilizado no sistema real são iguais para α_8 e α_9 (ambos estágios Tabela 5.2), no entanto, o processo de otimização realizou ajustes no tempo na tentativa de criação

da onda verde. Isto pode ser observado para os demais semáforos e em cruzamentos diferentes (em sequência).

Ao analisar o sistema de forma microscópica considerando-o fechado, observa-se que a quantidade de veículos Q_v não sofre variação mantendo-se dentro do esperado. Na Tabela 5.8 é disposto a análise do tempo médio de permanência na via, apresentando redução de $\approx 7\%$ nos períodos de horas e dias analisados.

Tabela 5.8 - Valores médios dos tempos de tráfego na via e quantidade de veículos por dia e período predefinido considerando o sistema fechado.

	Período	Segundas-feiras		Sábados		Domingos	
		t [s]	Q_v	t [s]	Q_v	t [s]	Q_v
Dados reais	02:00 às 04:00	154,67	184	168,49	694	170,23	843
	07:00 às 09:00	662,37	4573	208,63	4378	184,06	2055
	20:00 às 22:00	191,16	3788	181,88	3249	179,80	3080
Força bruta	02:00 às 04:00	145,95	183	144,90	693	127,56	841
	07:00 às 09:00	590,89	4569	209,25	4375	171,60	2052
	20:00 às 22:00	178,9	3786	181,50	3247	182,30	3075

Na otimização considerando o sistema fechado, utiliza-se o algoritmo de força bruta por obter os melhores resultados. Na Tabela 5.9 ao se realizar a análise macroscópica, no sistema fechado é apresentado redução de 6% em média, no tempo médio de tráfego na via por veículo. Na quantidade média de veículos Q_v , a variação é de 0,53%. Estes resultados estão ligados às restrições que são impostas quando considerado o sistema fechado.

Tabela 5.9 - Valores anuais médios dos tempos de tráfego na via e quantidade de veículos considerando sistema fechado.

Dados reais		Força bruta	
t [s]	Q_v	t [s]	Q_v
183,78	14990787	172,74	14910878
Desvio %		-6,00	-0,53

Analisando os dados dispostos na Tabela 5.2 e comparando com os dados da Tabela 5.10, observa-se que os valores de tempos semaforicos obtidos através do método de força bruta reduziram em ambos os estágios (verde e vermelho). Este resultado representa maior dinamismo no sistema, pois os veículos aguardaram menos tempo nas filas dos cruzamentos regulados por semáforos.

Tabela 5.10 - Tempos otimizados dos ciclos semaforicos da Av. Universitária considerando o sistema fechado.

Semáforos	Tempos dos estágios [s]	
	Força bruta	
	Verde	Vermelho
α_1	18	54
α_2	54	18
α_3	52	20
α_4	32	40
α_5	33	39
α_6	32	40
α_7	26	51
α_8	42	25
α_9	43	23
α_{10}	48	23
α_{11}	23	48
α_{12}	18	59
α_{13}	52	25
α_{14}	51	26

5.6 Estudo das emissões de gases na Av. Universitária

A partir dos valores médios dos tempos de permanência na via e a quantidade de veículos que trafegam dentro de determinado período, é possível quantificar as emissões de poluentes utilizando os dados reais, os dados obtidos através do processo de otimização e a expressão (4.1). Assim, é possível produzir a análise antes e após o processo de otimização. Na comparação antes e após o processo de otimização, foi escolhido somente os resultados obtidos com o método força bruta, por ser considerado neste trabalho o método que obteve o melhor desempenho.

Considerando o sistema fechado, observa-se que pela própria dinâmica do sistema, a redução na quantidade de emissões está relacionada com a redução do tempo que os veículos permanecem no sistema. No processo de otimização o tempo de permanência dos veículos no sistema reduziu em $\approx 6\%$, reduzindo a taxa de emissões em $\approx 5,8\%$ em média. Contudo, observa-se que as emissões passam a ser distribuídas uniformemente, a partir do processo de otimização que é realizado no sistema. Isto ocorre pela consequente redução do tempo de permanência nos semáforos, resultando na distribuição das emissões por toda a via e reduzindo a concentração de emissões nas filas.

A Tabela 5.11 dispõe os resultados das emissões analisadas considerando o sistema aberto, nos mesmos dias e períodos de baixo, médio e alto fluxo no qual foram realizadas as análises da otimização, Tabela 5.5. Como os resultados otimizados considerando o sistema aberto apresentaram aumento na quantidade média de veículos na via Q_v , o total de emissões no sistema otimizado também foi incrementado em

Tabela 5.11 - Comparativo das emissões no sistema real \times otimizado considerando o sistema aberto.

Dados	Dia	Períodos	Poluentes [kg/hora · km]							
			CO	NO _x	RCHO	NMHC	CH ₄	MP	CO ₂	
Dados reais	Segundas-feiras	02:00 às 04:00	0,106	0,030	0,001	0,115	0,010	0,003	19,029	
		07:00 às 09:00	2,642	0,748	0,015	2,913	0,238	0,077	476,376	
		20:00 às 22:00	2,188	0,620	0,012	2,411	0,197	0,064	394,530	
	Sábados	02:00 às 04:00	0,400	0,113	0,002	0,441	0,036	0,012	72,237	
		07:00 às 09:00	2,528	0,716	0,014	2,786	0,228	0,074	455,887	
		20:00 às 22:00	1,876	0,531	0,010	2,067	0,169	0,055	338,245	
	Domingos	02:00 às 04:00	0,974	0,276	0,005	1,072	0,088	0,028	175,644	
		07:00 às 09:00	1,187	0,336	0,007	1,309	0,107	0,035	214,081	
		20:00 às 22:00	1,780	0,504	0,010	1,963	0,160	0,052	321,032	
	Força Bruta	Segundas-feiras	02:00 às 04:00	0,118	0,034	0,001	0,128	0,011	0,003	21,293
			07:00 às 09:00	3,092	0,875	0,017	3,412	0,279	0,090	557,687
			20:00 às 22:00	1,950	0,552	0,011	2,148	0,176	0,057	351,656
Sábados		02:00 às 04:00	0,432	0,122	0,002	0,471	0,039	0,012	77,556	
		07:00 às 09:00	2,468	0,699	0,014	2,723	0,222	0,072	445,117	
		20:00 às 22:00	2,119	0,600	0,012	2,334	0,191	0,062	382,022	
Domingos		02:00 às 04:00	0,503	0,143	0,003	0,554	0,045	0,015	90,721	
		07:00 às 09:00	1,059	0,300	0,006	1,168	0,095	0,031	191,061	
		20:00 às 22:00	1,736	0,492	0,010	1,913	0,156	0,051	313,051	

$\approx 2\%$ para os dias e horários especificados. Foi realizada análise macroscópica para a emissão de gases utilizando as médias anuais de veículos. A Tabela 5.12 dispõe os valores obtidos das médias de emissões anuais para a análise macroscópica do sistema aberto. Comparando os dados reais, houve aumento de $\approx 1,1\%$ nas emissões do sistema otimizado, quando comparado com o sistema real. Este aumento é explicado pela redução das filas e aumento em Q_v , tornando o sistema mais dinâmico/eficiente.

Tabela 5.12 - Comparativo anual das emissões no sistema real \times otimizado considerando o sistema aberto.

Cenários	Poluentes [kg/hora · km]						
	CO	NO _x	RCHO	NMHC	CH ₄	MP	CO ₂
Dados reais	2,019	0,571	0,011	2,227	0,182	0,059	364,037
Força Bruta	2,046	0,578	0,011	2,253	0,184	0,060	368,405
Desvio %	1,04	1,22	0,00	1,16	1,09	1,69	1,19

Utilizando a Tabela 4.1, pode-se realizar quantitativamente as análises dos gases emitidos individualmente no tráfego de veículos na Av. Universitária. Observa-se que os gases com menor taxa de emissão são os aldeídos (RCHO), grupo composto por gases como etanal, metanal entre outros e com a maior taxa de emissão tem-se o dióxido de carbono CO₂. O sistema em estudo é sistema não linear, podendo ser caracterizado como sistema complexo com variáveis emergentes (como algum acidente). Desta forma, baixas variações em seus parâmetros podem produzir altas variações em sua saída. Por exemplo, os métodos de otimização utilizados tiveram valores da média de tempo no intervalo $0 < t \approx 7\%$. No entanto, considerando

somente o método de força bruta, o aumento anual foi de $\approx 1,1\%$ e considerando o método algoritmo genético, o aumento anual foi de $\approx 20\%$. Este resultado corrobora a indicação do método de força bruta como o de maior desempenho para este trabalho.

5.7 Discussão

Este trabalho foi desenvolvido tendo como um dos objetivos o de auxiliar a Secretaria Municipal de Trânsito, Transportes e Mobilidade (SMT – Goiânia/Goiás) com o propósito de minimizar o tempo médio de permanência t consumido pelos veículos que transitam na Av. Universitária – Goiânia/GO. Os resultados obtidos indicam que é possível reduzir o valor de t utilizando processo de otimização e com baixo custo computacional, sem utilizar servidores entre outros.

Todas as aplicações realizadas considerando o sistema fechado foram utilizadas para validar o modelo e para comparar os resultados com o sistema aberto, visto que as fontes que originam os veículos estão fora do sistema em estudo. A aplicação do processo de otimização considerando o sistema fechado reduziu o tempo médio gasto por cada veículo na via, o que era esperado. Conseqüentemente ocorreu a redução das emissões de poluente, uma vez que o veículo permanece menos tempo no sistema. Na otimização do sistema fechado a redução na taxa de emissão de poluentes se dá na mesma proporção da redução do tempo de permanência na via. As emissões nos semáforos são reduzidas pelo fato dos veículos permanecerem menos tempo nas filas e as emissões totais são diluídas em todo o trajeto. Assim, no processo de otimização considerando o sistema fechado, o resultado é considerado satisfatório pois, reduziu os níveis e os pontos de acúmulo de emissões. No entanto, não ocorre acréscimo na quantidade de veículos, o que não representa o sistema real. Desta forma, foi realizada aplicações considerando o sistema aberto.

Durante o desenvolvimento deste trabalho algumas dificuldades foram superadas como: i) coleta de dados realizada com o auxílio de órgãos públicos, ii) mudanças de comportamento do sistema por conta da pandemia do Covid-19 e iii) obtenção dos dados de emissões/poluentes oriundos especificamente no trecho em estudo. Durante o desenvolvimento do trabalho foram necessários ajustes, como por exemplo, as várias trocas de software para simulação do tráfego veicular. Existem vários softwares com esta natureza, no entanto, alguns não obtiveram resultados de validação satisfatórios.

No início da pesquisa, acreditava-se que, considerando o sistema aberto, ao diminuir

o tempo dos veículos na via diminuiria as emissões de poluente. No entanto, ao contrário do que se esperava com a otimização, os resultados menores de t não implicaram na redução das emissões de poluentes. Isto ocorreu porque, ao considerar a dinâmica do sistema real, os resultados de minimização de t implicou no aumento da quantidade de veículos que trafegam na via, e por consequência, produziu a elevação da taxa de emissão de poluentes.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÃO

O objetivo principal deste trabalho foi o de construir modelagem computacional que auxiliasse o processo de otimização, reduzindo o tempo de permanência nas vias e as emissões de gases. A metodologia proposta apresenta-se como alternativa para simular, otimizar e realizar previsões sobre quantidade de veículos nas vias urbanas. Os critérios utilizados no simulador foram ajustados conforme o Manual brasileiro de sinalização de trânsito e os tempos de ciclos dos semáforos foram alterados utilizando o conceito de entreverdes e fixando o estágio de término do direito de passagem.

As simulações realizadas considerando o sistema fechado auxiliou na validação do modelo e em análises comparativas com a configuração em sistema aberto. Dentre os métodos de otimização utilizados, o método de força bruta foi escolhido para otimizar o modelo em sistema fechado por obter o melhor desempenho. Foi obtido redução no tempo de permanência na via de $\approx 6\%$. Isto indica que os veículos ficam menos tempo no trajeto e assim, conseqüentemente ocorre a redução das emissões na mesma proporção. Seguindo nesta análise, observou-se que os níveis de emissões nos semáforos foram reduzidos, pois os tempos de espera foram menores, ocasionando distribuição das emissões de gases pelas vias de tráfego veicular.

A utilização dos dados reais auxiliou na validação do modelo/simulador. Dos três métodos de otimização apresentados, o método de força bruta teve o melhor desempenho, reduzindo o tempo médio de permanência na via em $\approx 6\%$ para o sistema fechado e em $\approx 4,3\%$ para o sistema aberto. Dentro da análise de emissões de gases, foram calculadas as emissões de sete poluentes. Analisando a perspectiva com sistema aberto, observou-se que independentemente de qual processo de otimização foi utilizado, a quantidade de veículos na via foi aumentado. Este aumento de veículos ocasionou aumento na taxa de emissão. O poluente com maior taxa de emissão foi o dióxido de carbono, com aumento $\approx 1,1\%$. Desta forma, conclui-se que os objetivos foram alcançados e que a hipótese foi confirmada.

6.1 Contribuições do trabalho

As contribuições deste trabalho pode assim ser descritas:

- Construção de simulador computacional para o tráfego veicular urbano;
- Simulador para previsões;

- Geração de novos parâmetros de configurações de ciclos de tempos semafóricos;
- Produção de dados sobre emissões de poluentes que podem servir como base para políticas de trânsito e ambientais.

6.2 Sugestões para trabalhos futuros.

- Utilizar outros métodos de otimização.
- Realizar análises multi-objetivos para encontrar o ponto de equilíbrio entre a redução de tempo de permanência na via e o aumento das emissões.
- Conduzir estudos sobre impacto do aumento da dinâmica do fluxo da região e nas taxas de emissões de gases ao se ampliar o uso do transporte público em detrimento do privado.
- Utilizar métodos de otimização para análise em área de estudo ampliada da malha viária de Goiânia/GO e simular alterações de rotas promovendo mudanças nos sentidos das vias.

APÊNDICE A

Tabela A.1 - Média anual de veículos no semáforo α_2 .

Hora\Dia	Domingo	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	Sábado
0	194	95	74	92	95	109	180
1	131	48	33	42	45	54	114
2	103	28	19	26	28	34	82
3	97	21	19	24	22	29	70
4	77	29	27	30	29	38	72
5	77	138	132	135	127	141	101
6	166	868	860	878	839	830	369
7	248	1303	1350	1360	1358	1341	669
8	261	1226	1272	1220	1224	1216	713
9	309	1180	1212	1195	1184	1190	731
10	350	1154	1157	1171	1142	1129	767
11	444	1144	1148	1164	1133	1141	759
12	503	1174	1184	1181	1166	1170	768
13	409	1156	1178	1180	1160	1132	592
14	357	1151	1144	1151	1130	1119	509
15	425	1117	1109	1142	1104	1121	531
16	507	1048	1062	1080	1052	1092	551
17	563	1132	1078	1158	1106	1100	568
18	680	1014	998	1052	1032	990	631
19	616	722	739	789	769	781	624
20	451	555	566	608	615	683	514
21	423	568	571	605	580	642	445
22	292	435	453	440	463	544	379
23	171	142	161	178	194	284	286

Tabela A.2 - Média anual de veículos no semáforo α_4

Hora\Dia	Domingo	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	Sábado
0	210	104	78	100	109	119	196
1	141	50	36	46	51	60	126
2	109	29	20	26	31	37	89
3	102	22	19	25	24	31	75
4	82	28	25	27	30	38	76
5	82	120	114	117	111	125	105
6	160	882	868	891	841	843	383
7	248	1491	1486	1526	1476	1475	719
8	277	1311	1335	1336	1279	1289	775
9	333	1210	1223	1259	1196	1225	785
10	371	1199	1200	1229	1168	1180	836
11	469	1237	1241	1257	1200	1231	831
12	540	1343	1347	1330	1295	1321	847
13	427	1237	1255	1240	1222	1223	622
14	371	1227	1232	1228	1194	1209	535
15	417	1172	1161	1180	1155	1190	537
16	528	1142	1162	1159	1134	1202	586
17	595	1277	1276	1325	1242	1249	609
18	730	1129	1173	1197	1149	1116	673
19	659	770	824	865	842	853	669
20	487	603	617	671	684	732	553
21	451	616	606	663	630	691	483
22	317	489	504	498	514	599	419
23	181	142	169	192	211	303	308

Tabela A.3 - Média anual de veículos no semáforo α_7 .

Hora\Dia	Domingo	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	Sábado
0	122	46	32	45	55	77	116
1	96	27	15	22	31	50	98
2	91	17	10	14	22	43	86
3	90	15	8	13	18	35	96
4	80	13	11	13	17	29	90
5	61	38	35	38	36	43	66
6	83	274	276	290	288	275	144
7	115	560	561	576	578	570	299
8	176	561	594	587	596	595	421
9	226	471	501	508	505	505	437
10	207	430	455	463	454	463	455
11	270	453	459	474	469	472	413
12	310	469	481	488	498	481	334
13	200	478	481	494	511	477	259
14	168	525	502	545	536	530	232
15	178	437	427	463	457	471	222
16	212	374	385	416	417	426	219
17	225	469	477	482	494	476	240
18	313	518	522	529	526	496	265
19	257	289	308	318	320	319	241
20	177	188	200	210	215	245	212
21	158	158	170	179	184	215	171
22	114	130	133	140	164	209	178
23	78	59	71	80	103	147	149

Tabela A.4 - Média anual de veículos no semáforo α_{12} .

Hora\Dia	Domingo	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	Sábado
0	111	52	43	53	57	76	107
1	75	29	20	27	29	41	69
2	64	19	14	17	20	25	55
3	62	13	9	13	15	20	49
4	53	15	11	14	16	22	48
5	46	37	32	35	36	36	52
6	75	280	284	281	275	274	114
7	132	579	581	574	568	564	249
8	221	542	573	584	559	558	319
9	292	558	590	594	592	587	394
10	287	573	611	617	605	615	470
11	452	646	682	678	674	693	564
12	432	667	698	695	693	714	591
13	336	680	692	714	678	709	423
14	236	703	722	722	693	718	329
15	241	685	727	724	707	717	294
16	245	722	733	720	705	733	281
17	267	788	792	799	768	781	305
18	366	758	760	781	755	758	310
19	309	511	529	549	539	531	347
20	356	333	346	360	375	389	277
21	271	278	303	319	325	317	259
22	164	212	234	238	254	282	219
23	99	87	100	101	122	161	170

Tabela A.5 - Média anual de veículos no semáforo α_{13} .

Hora\Dia	Domingo	2^a	3^a	4^a	5^a	6^a	Sábado
0	209	90	71	87	99	112	174
1	148	49	35	46	55	64	122
2	127	34	22	30	40	46	103
3	125	27	17	24	35	43	105
4	116	34	28	29	45	51	99
5	99	90	80	81	82	90	102
6	124	536	537	531	515	506	212
7	159	885	928	903	880	857	370
8	192	725	765	767	710	718	389
9	228	707	733	739	717	698	412
10	277	709	720	740	708	725	456
11	375	726	737	742	717	744	484
12	393	804	830	830	811	830	564
13	267	789	806	791	786	786	426
14	261	730	744	751	737	730	356
15	300	765	788	787	753	740	358
16	333	827	837	845	789	805	356
17	358	970	1010	1011	955	928	382
18	396	1098	1128	1141	1093	1042	428
19	375	588	608	635	610	620	432
20	332	373	394	403	403	434	387
21	343	324	361	372	360	375	373
22	253	271	302	310	322	373	326
23	166	131	153	166	187	256	278

APÊNDICE B

Tabela B.1 - Testes de aderência no semáforo α_1 nos domingos.

DP	AIC
Uniforme	240,667
Pareto	245,550
Nakagami	245,920
Weibull	246,096
Rician	246,216

Tabela B.2 - Testes de aderência no semáforo α_1 nas segundas-feiras.

DP	AIC
Pareto	297,496
Uniforme	298,403
Nakagami	299,757
Gamma	303,494
Weibull	304,770

Tabela B.3 - Testes de aderência no semáforo α_1 nas quartas-feiras.

DP	AIC
Pareto	295,217
Uniforme	295,353
Nakagami	298,831
Gamma	303,694
Weibull	303,891

Tabela B.4 - Testes de aderência no semáforo α_1 nas quintas-feiras.

DP	AIC
Pareto	296,265
Uniforme	296,904
Nakagami	299,382
Weibull	304,118
Gamma	304,185

Tabela B.5 - Testes de aderência no semáforo α_1 nas sextas-feiras.

DP	AIC
Uniforme	294,859
Pareto	294,929
Nakagami	299,115
Weibull	303,202
Valores extremos generalizados	305,557

Tabela B.6 - Testes de aderência no semáforo α_1 nos sábados.

DP	AIC
Pareto	250,522
Uniforme	250,989
Nakagami	262,871
Weibull	263,713
Valores extremos generalizados	265,063

Tabela B.7 - Testes de aderência no semáforo α_2 nos domingos.

DP	AIC
Uniforme	311,300
Pareto	315,300
Rician	317,400
Nakagami	317,400
Weibull	317,500

Tabela B.8 - Testes de aderência no semáforo α_2 nas segundas-feiras.

DP	AIC
Pareto	334,833
Uniforme	348,587
Valores extremos generalizados	361,108
Nakagami	363,346
Valores extremos	364,912

Tabela B.9 - Testes de aderência no semáforo α_2 nas terças-feiras.

DP	AIC
Pareto	339,797
Uniforme	349,295
Valores extremos generalizados	362,166
Nakagami	363,298
Valores extremos	365,543

Tabela B.10 - Testes de aderência no semáforo α_2 nas quartas-feiras.

DP	AIC
Pareto	340,376
Uniforme	349,471
Valores extremos generalizados	361,695
Nakagami	364,347
Valores extremos	365,137

Tabela B.11 - Testes de aderência no semáforo α_2 nas quintas-feiras.

DP	AIC
Pareto	343,418
Uniforme	349,480
Valores extremos generalizados	361,939
Nakagami	363,524
Valores extremos	364,289

Tabela B.12 - Testes de aderência no semáforo α_2 nas sextas-feiras.

DP	AIC
Pareto	340,778
Uniforme	348,621
Valores extremos generalizados	359,845
Valores extremos	362,499
Nakagami	364,009

Tabela B.13 - Testes de aderência no semáforo α_2 nos sábados.

DP	AIC
Pareto	303,844
Uniforme	318,312
Valores extremos generalizados	324861
Valores extremos	332,760
Normal	335,150

Tabela B.14 - Testes de aderência no semáforo α_4 nos domingos.

DP	AIC
Uniforme	274,660
Pareto	276,825
Nakagami	284,778
Weibull	285,152
Rician	285,793

Tabela B.15 - Testes de aderência no semáforo α_4 nas segundas-feiras.

DP	AIC
Pareto	309,262
Uniforme	316,753
Nakagami	327,613
Valores extremos generalizados	332,736
Gamma	332,148

Tabela B.16 - Testes de aderência no semáforo α_4 nas terças-feiras.

DP	AIC
Pareto	308,005
Uniforme	317,631
Nakagami	327,582
Valores extremos generalizados	333,288
Gamma	332,433

Tabela B.17 - Testes de aderência no semáforo α_4 nas quartas-feiras.

DP	AIC
Pareto	302,383
Uniforme	316,287
Valores extremos generalizados	330,061
Nakagami	328,848
Gamma	333,594

Tabela B.18 - Testes de aderência no semáforo α_4 nas quintas-feiras.

DP	AIC
Pareto	305,118
Uniforme	316,142
Nakagami	328,642
Valores extremos generalizados	331,339
Weibull	333,298

Tabela B.19 - Testes de aderência no semáforo α_4 nas sextas-feiras.

DP	AIC
Pareto	301,900
Uniforme	313,900
Valores extremos generalizados	325,700
Nakagami	329,300
Valor extremo	332,300

Tabela B.20 - Testes de aderência no semáforo α_4 nos sábados.

DP	AIC
Uniforme	292,305
Pareto	294,217
Nakagami	302,068
Weibull	303,111
Valores extremos generalizados	305,090

Tabela B.21 - Testes de aderência no semáforo α_7 nos domingos.

DP	AIC
Uniforme	269,502
Pareto	272,511
Birnbaum-Saunders	279,098
Gamma	276,168
Gaussiana inversa	276,222

Tabela B.22 - Testes de aderência no semáforo α_7 nas segundas-feiras.

DP	AIC
Pareto	288,545
Uniforme	306,673
Valores extremos generalizados	320,367
Nakagami	320,347
Weibull	323,868

Tabela B.23 - Testes de aderência no semáforo α_7 nas terças-feiras.

DP	AIC
Pareto	303,952
Uniforme	309,849
Nakagami	320,539
Valores extremos generalizados	325,574
Gamma	325,025

Tabela B.24 - Testes de aderência no semáforo α_7 nas quartas-feiras.

DP	AIC
Pareto	291,300
Uniforme	309,000
Valores extremos generalizados	324,300
Nakagami	322,600
Weibull	326,600

Tabela B.25 - Testes de aderência no semáforo α_7 nas quintas-feiras.

DP	AIC
Pareto	302,325
Uniforme	309,321
Valores extremos generalizados	324,467
Nakagami	323,261
Weibull	326,483

Tabela B.26 - Testes de aderência no semáforo α_7 nas sextas-feiras.

DP	AIC
Pareto	302,635
Uniforme	308,294
Valores extremos generalizados	322,162
Nakagami	322,613
Valores extremos	323,592

Tabela B.27 - Testes de aderência no semáforo α_7 nos sábados.

DP	AIC
Uniforme	290,210
Pareto	292,841
Gamma	296,214
Birnbaum-Saunders	296,280
Gaussiana inversa	296,503

Tabela B.28 - Testes de aderência no semáforo α_{12} nos domingos.

DP	AIC
Uniforme	292,322
Pareto	294,779
Nakagami	299,980
Weibull	300,211
Rician	300,553

Tabela B.29 - Testes de aderência no semáforo α_{12} nas segundas-feiras.

DP	AIC
Pareto	316,359
Uniforme	323,307
Nakagami	335,846
Valores extremos generalizados	338,641
Weibull	340,161

Tabela B.30 - Testes de aderência no semáforo α_{12} nas terças-feiras.

DP	AIC
Pareto	315,382
Uniforme	323,836
Valores extremos generalizados	338,122
Nakagami	336,801
Gamma	341,691

Tabela B.31 - Testes de aderência no semáforo α_{12} nas quartas-feiras.

DP	AIC
Pareto	314,324
Uniforme	324,022
Valores extremos generalizados	338,288
Nakagami	337,704
Valor extremo	342,177

Tabela B.32 - Testes de aderência no semáforo α_{12} nas quintas-feiras.

DP	AIC
Pareto	315,200
Uniforme	322,000
Valores extremos generalizados	333,900
Nakagami	337,000
Valor extremo	340,100

Tabela B.33 - Testes de aderência no semáforo α_{12} nas sextas-feiras.

DP	AIC
Pareto	307,196
Uniforme	322,402
Valores extremos generalizados	333,138
Nakagami	338,274
Valor extremo	340,519

Tabela B.34 - Testes de aderência no semáforo α_{12} nos sábados.

DP	AIC
Uniforme	306,296
Pareto	309,993
Nakagami	310,959
Weibull	311,405
Rayleigh	310,487

Tabela B.35 - Testes de aderência no semáforo α_{13} nos domingos.

DP	AIC
Pareto	270,235
Uniforme	277,393
Valores extremos generalizados	292,194
Weibull	290,743
Nakagami	291,132

Tabela B.36 - Testes de aderência no semáforo α_{13} nas segundas-feiras.

DP	AIC
Uniforme	338,894
Pareto	338,943
Nakagami	346,943
Valores extremos generalizados	351,896
Weibull	350,053

Tabela B.37 - Testes de aderência no semáforo α_{13} nas terças-feiras.

DP	AIC
Pareto	339,000
Uniforme	340,600
Nakagami	348,200
Valores extremos generalizados	353,600
Weibull	352,100

Tabela B.38 - Testes de aderência no semáforo α_{13} nas quartas-feiras.

DP	AIC
Pareto	339,443
Uniforme	340,864
Nakagami	348,609
Valores extremos generalizados	353,341
Weibull	352,082

Tabela B.39 - Testes de aderência no semáforo α_{13} nas quintas-feiras.

DP	AIC
Pareto	337,746
Uniforme	338,300
Nakagami	346,830
Weibull	349,538
Valores extremos generalizados	350,511

Tabela B.40 - Testes de aderência no semáforo α_{13} nas sextas-feiras.

DP	AIC
Uniforme	335,546
Pareto	335,962
Nakagami	346,515
Valor extremo	347,234
Valores extremos generalizados	347,760

Tabela B.41 - Testes de aderência no semáforo α_{13} nos sábados.

DP	AIC
Uniforme	298,793
Pareto	302,310
Valor extremo	305,761
Rician	306,853
Valores extremos generalizados	307,470

APÊNDICE C

Tabela C.1 - Comparativo da quantidade média anual de veículos em dados reais e simulados nos domingos no semáforo α_1 .

Hora	Dados reais	Dados simulados	Desvio padrão
0:00	44	44	0,00
1:00	29	29	0,00
2:00	19	19	0,00
3:00	17	16	0,71
4:00	16	16	0,00
5:00	17	17	0,00
6:00	35	35	0,00
7:00	52	53	0,71
8:00	64	63	0,71
9:00	78	77	0,71
10:00	83	85	1,41
11:00	109	108	0,71
12:00	129	128	0,71
13:00	94	93	0,71
14:00	69	69	0,00
15:00	88	89	0,71
16:00	101	101	0,00
17:00	117	116	0,71
18:00	154	153	0,71
19:00	128	125	2,12
20:00	95	95	0,00
21:00	93	93	0,00
22:00	57	55	1,41
23:00	36	36	0,00

Tabela C.2 - Comparativo da quantidade média anual de veículos em dados reais e simulados nas segundas-feiras no semáforo α_1 .

Hora	Dados reais	Dados simulados	Desvio padrão
0:00	21	20	0,71
1:00	9	9	0,00
2:00	6	6	0,00
3:00	5	5	0,00
4:00	5	4	0,71
5:00	21	20	0,71
6:00	216	209	4,95
7:00	466	466	0,00
8:00	327	320	4,95
9:00	266	261	3,54
10:00	259	254	3,54
11:00	287	280	4,95
12:00	374	367	4,95
13:00	305	308	2,12
14:00	282	284	1,41
15:00	245	246	0,71
16:00	256	250	4,24
17:00	327	326	0,71
18:00	331	329	1,41
19:00	197	200	2,12
20:00	152	145	4,95
21:00	146	145	0,71
22:00	124	123	0,71
23:00	30	29	0,71

Tabela C.3 - Comparativo da quantidade média anual de veículos em dados reais e simulados nas terças-feiras no semáforo α_1 .

Hora	Dados reais	Dados simulados	Desvio padrão
0:00	18	17	0,71
1:00	7	6	0,71
2:00	4	5	0,71
3:00	4	3	0,71
4:00	4	4	0,00
5:00	16	17	0,71
6:00	198	197	0,71
7:00	435	435	0,00
8:00	338	335	2,12
9:00	274	285	7,78
10:00	265	261	2,83
11:00	289	280	6,36
12:00	372	371	0,71
13:00	302	304	1,41
14:00	285	285	0,00
15:00	249	246	2,12
16:00	252	265	9,19
17:00	315	317	1,41
18:00	315	312	2,12
19:00	196	104	65,05
20:00	150	151	0,71
21:00	145	141	2,83
22:00	126	125	0,71
23:00	40	40	0,00

Tabela C.4 - Comparativo da quantidade média anual de veículos em dados reais e simulados nas quartas-feiras no semáforo α_1 .

Hora	Dados reais	Dados simulados	Desvio padrão
0:00	24	24	0,00
1:00	11	11	0,00
2:00	6	6	0,00
3:00	4	2	1,41
4:00	4	4	0,00
5:00	18	19	0,71
6:00	201	207	2,12
7:00	437	432	3,54
8:00	337	329	5,66
9:00	260	260	0,00
10:00	265	266	0,71
11:00	288	290	1,41
12:00	342	337	3,54
13:00	298	293	3,54
14:00	277	272	3,54
15:00	251	252	0,71
16:00	263	265	1,41
17:00	325	328	2,12
18:00	318	328	7,07
19:00	208	202	4,24
20:00	145	139	4,24
21:00	133	138	3,54
22:00	117	121	2,83
23:00	43	39	2,83

Tabela C.5 - Comparativo da quantidade média anual de veículos em dados reais e simulados nas quintas-feiras no semáforo α_1 .

Hora	Dados reais	Dados simulados	Desvio padrão
0:00	28	29	0,71
1:00	13	15	1,41
2:00	6	6	0,00
3:00	6	6	0,00
4:00	5	4	0,71
5:00	17	4	9,19
6:00	201	16	130,81
7:00	451	202	176,07
8:00	333	454	85,56
9:00	265	336	50,20
10:00	262	248	9,90
11:00	280	281	0,71
12:00	359	354	3,54
13:00	296	292	2,83
14:00	277	269	5,66
15:00	244	246	1,41
16:00	250	248	1,41
17:00	310	308	1,41
18:00	315	313	1,41
19:00	201	200	0,71
20:00	171	176	3,54
21:00	145	148	2,12
22:00	123	125	1,41
23:00	49	47	1,41

Tabela C.6 - Comparativo da quantidade média anual de veículos em dados reais e simulados nas sextas-feiras no semáforo α_1 .

Hora	Dados reais	Dados simulados	Desvio padrão
0:00	29	26	2,12
1:00	14	13	0,71
2:00	8	7	0,71
3:00	8	7	0,71
4:00	7	7	0,00
5:00	20	20	0,00
6:00	197	197	0,00
7:00	435	440	3,54
8:00	321	329	5,66
9:00	258	257	0,71
10:00	257	250	4,95
11:00	285	283	1,41
12:00	356	354	1,41
13:00	294	291	2,12
14:00	268	272	2,83
15:00	241	243	1,41
16:00	255	252	2,12
17:00	315	316	0,71
18:00	306	305	0,71
19:00	200	197	2,12
20:00	157	164	4,95
21:00	141	141	0,00
22:00	124	121	2,12
23:00	64	61	2,12

Tabela C.7 - Comparativo da quantidade média anual de veículos em dados reais e simulados nos sábados no semáforo α_1 .

Hora	Dados reais	Dados simulados	Desvio padrão
0:00	42	43	0,71
1:00	26	26	0,00
2:00	18	18	0,00
3:00	14	16	1,41
4:00	14	14	0,00
5:00	18	16	1,41
6:00	60	59	0,71
7:00	138	137	0,71
8:00	159	154	3,54
9:00	157	153	2,83
10:00	182	182	0,00
11:00	176	179	2,12
12:00	185	179	4,24
13:00	141	139	1,41
14:00	116	116	0,00
15:00	105	101	2,83
16:00	102	99	2,12
17:00	111	114	2,12
18:00	138	140	1,41
19:00	118	116	1,41
20:00	98	97	0,71
21:00	83	79	2,83
22:00	74	75	0,71
23:00	59	60	0,71

Tabela C.8 - Comparativo da quantidade média anual de veículos em dados reais e simulados nos domingos no semáforo α_2 .

Hora	Dados reais	Dados simulados	Desvio padrão
0:00	194	194	0,00
1:00	131	131	0,00
2:00	103	103	0,00
3:00	97	97	0,00
4:00	75	77	1,41
5:00	76	77	0,71
6:00	163	166	2,12
7:00	245	248	2,12
8:00	262	261	0,71
9:00	308	309	0,71
10:00	347	350	2,12
11:00	443	444	0,71
12:00	500	503	2,12
13:00	408	409	0,71
14:00	355	357	1,41
15:00	421	425	2,83
16:00	504	507	2,12
17:00	559	563	2,83
18:00	678	680	1,41
19:00	610	616	4,24
20:00	452	451	0,71
21:00	420	423	2,12
22:00	291	292	0,71
23:00	172	171	0,71

Tabela C.9 - Comparativo da quantidade média anual de veículos em dados reais e simulados nas segundas-feiras no semáforo α_2 .

Hora	Dados reais	Dados simulados	Desvio padrão
0:00	95	92	2,12
1:00	48	47	0,71
2:00	28	26	1,41
3:00	21	23	1,41
4:00	29	29	0,00
5:00	138	139	0,71
6:00	868	823	31,82
7:00	1303	1222	57,28
8:00	1226	1232	4,24
9:00	1180	1224	31,11
10:00	1154	1212	41,01
11:00	1144	1212	48,08
12:00	1174	1220	32,53
13:00	1156	1242	60,81
14:00	1151	1212	43,13
15:00	1117	1192	53,03
16:00	1048	1224	124,45
17:00	1132	1214	57,98
18:00	1014	1234	155,56
19:00	722	619	72,83
20:00	555	542	9,19
21:00	568	568	0,00
22:00	435	421	9,90
23:00	142	143	0,71

Tabela C.10 - Comparativo da quantidade média anual de veículos em dados reais e simulados nas terças-feiras no semáforo α_2 .

Hora	Dados reais	Dados simulados	Desvio padrão
0:00	74	74	0,00
1:00	33	30	2,12
2:00	19	20	0,71
3:00	19	20	0,71
4:00	28	27	0,71
5:00	130	132	1,41
6:00	844	613	163,34
7:00	1320	1206	80,61
8:00	1243	1206	26,16
9:00	1186	1212	18,38
10:00	1151	1218	47,38
11:00	1155	1216	43,13
12:00	1190	1208	12,73
13:00	1179	1212	23,33
14:00	1143	1210	47,38
15:00	1109	1216	75,66
16:00	1067	1204	96,87
17:00	1083	1218	95,46
18:00	1005	1232	160,51
19:00	751	624	89,80
20:00	581	583	1,41
21:00	588	585	2,12
22:00	470	461	6,36
23:00	175	172	2,12

Tabela C.11 - Comparativo da quantidade média anual de veículos em dados reais e simulados nas quartas-feiras no semáforo α_2 .

Hora	Dados reais	Dados simulados	Desvio padrão
0:00	92	94	1,41
1:00	42	42	0,00
2:00	26	31	3,54
3:00	24	25	0,71
4:00	30	28	1,41
5:00	135	135	0,00
6:00	878	607	191,63
7:00	1360	1188	121,62
8:00	1220	1208	8,49
9:00	1195	1220	17,68
10:00	1171	1214	30,41
11:00	1164	1216	36,77
12:00	1181	1218	26,16
13:00	1180	1204	16,97
14:00	1151	1202	36,06
15:00	1142	1198	39,60
16:00	1080	1200	84,85
17:00	1158	1224	46,67
18:00	1052	1202	106,07
19:00	789	620	119,50
20:00	608	578	21,21
21:00	605	599	4,24
22:00	440	441	0,71
23:00	178	180	1,41

Tabela C.12 - Comparativo da quantidade média anual de veículos em dados reais e simulados nas quintas-feiras no semáforo α_2 .

Hora	Dados reais	Dados simulados	Desvio padrão
0:00	95	97	1,00
1:00	45	47	1,00
2:00	28	30	1,00
3:00	22	22	0,00
4:00	29	27	1,00
5:00	127	27	50,00
6:00	839	126	356,50
7:00	1358	615	371,50
8:00	1224	1214	5,00
9:00	1184	1206	11,00
10:00	1142	1218	38,00
11:00	1133	1208	37,50
12:00	1166	1226	30,00
13:00	1160	1214	27,00
14:00	1130	1208	39,00
15:00	1104	1218	57,00
16:00	1052	1200	74,00
17:00	1106	1214	54,00
18:00	1032	608	212,00
19:00	769	614	77,50
20:00	615	610	2,50
21:00	580	579	0,50
22:00	463	455	4,00
23:00	194	188	3,00

Tabela C.13 - Comparativo da quantidade média anual de veículos em dados reais e simulados nas sextas-feiras no semáforo α_2 .

Hora	Dados reais	Dados simulados	Desvio padrão
0:00	109	111	1,00
1:00	54	54	0,00
2:00	34	32	1,00
3:00	29	30	0,50
4:00	38	51	6,50
5:00	141	142	0,50
6:00	830	611	109,50
7:00	1341	1212	64,50
8:00	1216	1206	5,00
9:00	1190	1212	11,00
10:00	1129	1236	53,50
11:00	1141	1208	33,50
12:00	1170	1214	22,00
13:00	1132	1212	40,00
14:00	1119	1216	48,50
15:00	1121	1228	53,50
16:00	1092	1226	67,00
17:00	1100	1228	64,00
18:00	990	1224	117,00
19:00	781	610	85,50
20:00	683	619	32,00
21:00	642	622	10,00
22:00	544	533	5,50
23:00	284	291	3,50

Tabela C.14 - Comparativo da quantidade média anual de veículos em dados reais e simulados nos sábados no semáforo α_2 .

Hora	Dados reais	Dados simulados	Desvio padrão
0:00	180	177	1,50
1:00	114	109	2,50
2:00	82	83	0,50
3:00	70	73	1,50
4:00	72	71	0,50
5:00	101	104	1,50
6:00	369	368	0,50
7:00	669	615	27,00
8:00	713	618	47,50
9:00	731	617	57,00
10:00	767	618	74,50
11:00	759	624	67,50
12:00	768	606	81,00
13:00	592	585	3,50
14:00	509	507	1,00
15:00	531	530	0,50
16:00	551	539	6,00
17:00	568	566	1,00
18:00	631	613	9,00
19:00	624	615	4,50
20:00	514	507	3,50
21:00	445	446	0,50
22:00	379	376	1,50
23:00	286	293	3,50

Tabela C.15 - Comparativo da quantidade média anual de veículos em dados reais e simulados nos domingos no semáforo α_4 .

Hora	Dados reais	Dados simulados	Desvio padrão
0:00	86	87	0,71
1:00	57	57	0,00
2:00	44	44	0,00
3:00	37	36	0,71
4:00	32	32	0,00
5:00	30	29	0,71
6:00	51	51	0,00
7:00	92	92	0,00
8:00	136	133	2,12
9:00	178	179	0,71
10:00	210	208	1,41
11:00	280	276	2,83
12:00	283	284	0,71
13:00	204	205	0,71
14:00	168	168	0,00
15:00	186	186	0,00
16:00	224	222	1,41
17:00	230	229	0,71
18:00	311	311	0,00
19:00	295	295	0,00
20:00	203	201	1,41
21:00	194	194	0,00
22:00	114	115	0,71
23:00	66	65	0,71

Tabela C.16 - Comparativo da quantidade média anual de veículos em dados reais e simulados nas segundas-feiras no semáforo α_4 .

Hora	Dados reais	Dados simulados	Desvio padrão
0:00	35	34	0,71
1:00	19	18	0,71
2:00	13	13	0,00
3:00	9	8	0,71
4:00	9	8	0,71
5:00	30	28	1,41
6:00	292	294	1,41
7:00	685	467	154,15
8:00	583	462	85,56
9:00	466	470	2,83
10:00	469	477	5,66
11:00	537	461	53,74
12:00	609	466	101,12
13:00	611	465	103,24
14:00	568	463	74,25
15:00	510	466	31,11
16:00	534	474	42,43
17:00	622	461	113,84
18:00	635	465	120,21
19:00	348	352	2,83
20:00	245	242	2,12
21:00	230	229	0,71
22:00	155	150	3,54
23:00	57	55	1,41

Tabela C.17 - Comparativo da quantidade média anual de veículos em dados reais e simulados nas terças-feiras no semáforo α_4 .

Hora	Dados reais	Dados simulados	Desvio padrão
0:00	30	28	1,41
1:00	15	14	0,71
2:00	9	8	0,71
3:00	6	6	0,00
4:00	9	10	0,71
5:00	27	29	1,41
6:00	293	299	4,24
7:00	694	469	159,10
8:00	603	461	100,41
9:00	487	480	4,95
10:00	479	474	3,54
11:00	552	466	60,81
12:00	624	463	113,84
13:00	609	462	103,94
14:00	559	465	66,47
15:00	494	471	16,26
16:00	521	470	36,06
17:00	627	465	114,55
18:00	645	460	130,81
19:00	364	356	5,66
20:00	242	240	1,41
21:00	266	267	0,71
22:00	161	158	2,12
23:00	70	69	0,71

Tabela C.18 - Comparativo da quantidade média anual de veículos em dados reais e simulados nas quartas-feiras no semáforo α_4 .

Hora	Dados reais	Dados simulados	Desvio padrão
0:00	38	30	5,66
1:00	20	14	4,24
2:00	12	10	1,41
3:00	8	5	2,12
4:00	10	6	2,83
5:00	28	27	0,71
6:00	284	285	0,71
7:00	675	461	151,32
8:00	603	462	99,70
9:00	484	476	5,66
10:00	491	480	7,78
11:00	545	471	52,33
12:00	612	461	106,77
13:00	608	466	100,41
14:00	575	467	76,37
15:00	512	479	23,33
16:00	522	475	33,23
17:00	645	468	125,16
18:00	678	462	152,74
19:00	399	367	22,63
20:00	269	245	16,97
21:00	254	268	9,90
22:00	173	153	14,14
23:00	78	68	7,07

Tabela C.19 - Comparativo da quantidade média anual de veículos em dados reais e simulados nas quintas-feiras no semáforo α_4 .

Hora	Dados reais	Dados simulados	Desvio padrão
0:00	44	30	9,90
1:00	22	16	4,24
2:00	14	8	4,24
3:00	10	6	2,83
4:00	11	9	1,41
5:00	28	9	13,44
6:00	279	25	179,61
7:00	677	293	271,53
8:00	592	466	89,10
9:00	482	461	14,85
10:00	489	468	14,85
11:00	549	458	64,35
12:00	604	468	96,17
13:00	606	462	101,82
14:00	555	468	61,52
15:00	493	477	11,31
16:00	522	463	41,72
17:00	629	461	118,79
18:00	661	467	137,18
19:00	384	375	6,36
20:00	271	246	17,68
21:00	261	362	71,42
22:00	184	152	22,63
23:00	85	75	7,07

Tabela C.20 - Comparativo da quantidade média anual de veículos em dados reais e simulados nas sextas-feiras no semáforo α_4 .

Hora	Dados reais	Dados simulados	Desvio padrão
0:00	51	46	3,54
1:00	28	28	0,00
2:00	17	16	0,71
3:00	14	14	0,00
4:00	14	15	0,71
5:00	32	30	1,41
6:00	272	271	0,71
7:00	650	464	131,52
8:00	591	465	89,10
9:00	487	480	4,95
10:00	498	475	16,26
11:00	557	467	63,64
12:00	609	472	96,87
13:00	588	465	86,97
14:00	554	464	63,64
15:00	504	471	23,33
16:00	524	464	42,43
17:00	632	467	116,67
18:00	638	469	119,50
19:00	390	390	0,00
20:00	311	311	0,00
21:00	262	263	0,71
22:00	212	204	5,66
23:00	122	130	5,66

Tabela C.21 - Comparativo da quantidade média anual de veículos em dados reais e simulados nas sábados no semáforo α_4 .

Hora	Dados reais	Dados simulados	Desvio padrão
0:00	83	82	0,71
1:00	53	49	2,83
2:00	36	40	2,83
3:00	34	32	1,41
4:00	30	27	2,12
5:00	33	32	0,71
6:00	93	94	0,71
7:00	248	251	2,12
8:00	313	312	0,71
9:00	333	331	1,41
10:00	391	391	0,00
11:00	436	436	0,00
12:00	421	413	5,66
13:00	324	323	0,71
14:00	275	275	0,00
15:00	260	249	7,78
16:00	249	251	1,41
17:00	266	267	0,71
18:00	294	295	0,71
19:00	274	266	5,66
20:00	241	235	4,24
21:00	195	202	4,95
22:00	173	179	4,24
23:00	127	125	1,41

Tabela C.22 - Comparativo da quantidade média anual de veículos em dados reais e simulados nos domingos no semáforo α_7 .

Hora	Dados reais	Dados simulados	Desvio padrão
0:00	122	122	0,00
1:00	96	95	0,71
2:00	91	92	0,71
3:00	90	90	0,00
4:00	80	81	0,71
5:00	61	62	0,71
6:00	83	83	0,00
7:00	115	115	0,00
8:00	176	176	0,00
9:00	226	227	0,71
10:00	207	207	0,00
11:00	270	271	0,71
12:00	310	315	3,54
13:00	200	201	0,71
14:00	168	169	0,71
15:00	178	180	1,41
16:00	212	214	1,41
17:00	225	225	0,00
18:00	313	314	0,71
19:00	257	258	0,71
20:00	177	175	1,41
21:00	158	157	0,71
22:00	114	114	0,00
23:00	78	89	7,78

Tabela C.23 - Comparativo da quantidade média anual de veículos em dados reais e simulados nas segundas-feiras no semáforo α_7 .

Hora	Dados reais	Dados simulados	Desvio padrão
0:00	46	46	0,00
1:00	27	26	0,71
2:00	17	17	0,00
3:00	15	15	0,00
4:00	13	13	0,00
5:00	38	38	0,00
6:00	274	272	1,41
7:00	560	614	38,18
8:00	561	329	164,05
9:00	471	383	62,23
10:00	430	445	10,61
11:00	453	459	4,24
12:00	469	417	36,77
13:00	478	400	55,15
14:00	525	360	116,67
15:00	437	406	21,92
16:00	374	371	2,12
17:00	469	417	36,77
18:00	518	411	75,66
19:00	289	294	3,54
20:00	188	182	4,24
21:00	158	154	2,83
22:00	130	130	0,00
23:00	59	58	0,71

Tabela C.24 - Comparativo da quantidade média anual de veículos em dados reais e simulados nas terças-feiras no semáforo α_7 .

Hora	Dados reais	Dados simulados	Desvio padrão
0:00	32	48	11,31
1:00	15	28	9,19
2:00	10	19	6,36
3:00	8	16	5,66
4:00	11	14	2,12
5:00	35	39	2,83
6:00	276	266	7,07
7:00	561	574	9,19
8:00	594	600	4,24
9:00	501	364	96,87
10:00	455	385	49,50
11:00	459	466	4,95
12:00	481	417	45,25
13:00	481	366	81,32
14:00	502	376	89,10
15:00	427	400	19,09
16:00	385	374	7,78
17:00	477	400	54,45
18:00	522	372	106,07
19:00	308	294	9,90
20:00	200	186	9,90
21:00	170	161	6,36
22:00	133	132	0,71
23:00	71	63	5,66

Tabela C.25 - Comparativo da quantidade média anual de veículos em dados reais e simulados nas quartas-feiras no semáforo α_7 .

Hora	Dados reais	Dados simulados	Desvio padrão
0:00	45	47	1,41
1:00	22	26	2,83
2:00	14	16	1,41
3:00	13	14	0,71
4:00	13	14	0,71
5:00	38	33	3,54
6:00	290	276	9,90
7:00	576	580	2,83
8:00	587	574	9,19
9:00	508	381	89,80
10:00	463	393	49,50
11:00	474	448	18,38
12:00	488	450	26,87
13:00	494	354	98,99
14:00	545	396	105,36
15:00	463	373	63,64
16:00	416	377	27,58
17:00	482	416	46,67
18:00	529	391	97,58
19:00	318	298	14,14
20:00	210	186	16,97
21:00	179	152	19,09
22:00	140	133	4,95
23:00	80	62	12,73

Tabela C.26 - Comparativo da quantidade média anual de veículos em dados reais e simulados nas quintas-feiras no semáforo α_7 .

Hora	Dados reais	Dados simulados	Desvio padrão
0:00	55	58	2,12
1:00	31	31	0,00
2:00	22	20	1,41
3:00	18	18	0,00
4:00	17	17	0,00
5:00	36	17	13,44
6:00	288	36	178,19
7:00	578	289	204,35
8:00	596	578	12,73
9:00	505	634	91,22
10:00	454	418	25,46
11:00	469	462	4,95
12:00	498	423	53,03
13:00	511	418	65,76
14:00	536	381	109,60
15:00	457	410	33,23
16:00	417	416	0,71
17:00	494	415	55,86
18:00	526	409	82,73
19:00	320	318	1,41
20:00	215	217	1,41
21:00	184	186	1,41
22:00	164	165	0,71
23:00	103	106	2,12

Tabela C.27 - Comparativo da quantidade média anual de veículos em dados reais e simulados nas sextas-feiras no semáforo α_7 .

Hora	Dados reais	Dados simulados	Desvio padrão
0:00	77	76	0,71
1:00	50	50	0,00
2:00	43	47	2,83
3:00	35	35	0,00
4:00	29	29	0,00
5:00	43	41	1,41
6:00	275	281	4,24
7:00	570	319	177,48
8:00	595	616	14,85
9:00	505	345	113,14
10:00	463	389	52,33
11:00	472	443	20,51
12:00	481	421	42,43
13:00	477	430	33,23
14:00	530	406	87,68
15:00	471	427	31,11
16:00	426	423	2,12
17:00	476	453	16,26
18:00	496	430	46,67
19:00	319	312	4,95
20:00	245	245	0,00
21:00	215	209	4,24
22:00	209	209	0,00
23:00	147	155	5,66

Tabela C.28 - Comparativo da quantidade média anual de veículos em dados reais e simulados nos sábados no semáforo α_7 .

Hora	Dados reais	Dados simulados	Desvio padrão
0:00	116	115	0,71
1:00	98	95	2,12
2:00	86	88	1,41
3:00	96	89	4,95
4:00	90	97	4,95
5:00	66	68	1,41
6:00	144	145	0,71
7:00	299	302	2,12
8:00	421	425	2,83
9:00	437	442	3,54
10:00	455	461	4,24
11:00	413	427	9,90
12:00	334	334	0,00
13:00	259	262	2,12
14:00	232	229	2,12
15:00	222	222	0,00
16:00	219	220	0,71
17:00	240	242	1,41
18:00	265	264	0,71
19:00	241	239	1,41
20:00	212	214	1,41
21:00	171	176	3,54
22:00	178	175	2,12
23:00	149	149	0,00

Tabela C.29 - Comparativo da quantidade média anual de veículos em dados reais e simulados nos domingos no semáforo α_{12} .

Hora	Dados reais	Dados simulados	Desvio padrão
0:00	111	112	0,71
1:00	75	76	0,71
2:00	64	62	1,41
3:00	62	61	0,71
4:00	53	53	0,00
5:00	46	46	0,00
6:00	75	74	0,71
7:00	132	132	0,00
8:00	221	222	0,71
9:00	292	293	0,71
10:00	287	287	0,00
11:00	452	385	47,38
12:00	432	375	40,31
13:00	336	337	0,71
14:00	236	239	2,12
15:00	241	241	0,00
16:00	245	246	0,71
17:00	267	270	2,12
18:00	366	368	1,41
19:00	309	312	2,12
20:00	356	357	0,71
21:00	271	271	0,00
22:00	164	166	1,41
23:00	99	172	51,62

Tabela C.30 - Comparativo da quantidade média anual de veículos em dados reais e simulados nas segundas-feiras no semáforo α_{12} .

Hora	Dados reais	Dados simulados	Desvio padrão
0:00	52	53	0,71
1:00	29	28	0,71
2:00	19	18	0,71
3:00	13	12	0,71
4:00	15	15	0,00
5:00	37	37	0,00
6:00	280	285	3,54
7:00	579	391	132,94
8:00	542	392	106,07
9:00	558	394	115,97
10:00	573	393	127,28
11:00	646	396	176,78
12:00	667	389	196,58
13:00	680	790	77,78
14:00	703	788	60,10
15:00	685	778	65,76
16:00	722	776	38,18
17:00	788	782	4,24
18:00	758	782	16,97
19:00	511	397	80,61
20:00	333	321	8,49
21:00	278	279	0,71
22:00	212	127	60,10
23:00	87	87	0,00

Tabela C.31 - Comparativo da quantidade média anual de veículos em dados reais e simulados nas terças-feiras no semáforo α_{12} .

Hora	Dados reais	Dados simulados	Desvio padrão
0:00	43	41	1,41
1:00	20	33	9,19
2:00	14	14	0,00
3:00	9	8	0,71
4:00	11	10	0,71
5:00	32	35	2,12
6:00	284	282	1,41
7:00	581	389	135,76
8:00	573	390	129,40
9:00	590	394	138,59
10:00	611	389	156,98
11:00	682	397	201,53
12:00	698	389	218,50
13:00	692	391	212,84
14:00	722	391	234,05
15:00	727	390	238,29
16:00	733	390	242,54
17:00	792	392	282,84
18:00	760	395	258,09
19:00	529	393	96,17
20:00	346	334	8,49
21:00	303	296	4,95
22:00	234	236	1,41
23:00	100	104	2,83

Tabela C.32 - Comparativo da quantidade média anual de veículos em dados reais e simulados nas quartas-feiras no semáforo α_{12} .

Hora	Dados reais	Dados simulados	Desvio padrão
0:00	53	50	2,12
1:00	27	25	1,41
2:00	17	17	0,00
3:00	13	11	1,41
4:00	14	14	0,00
5:00	35	33	1,41
6:00	281	276	3,54
7:00	574	391	129,40
8:00	584	392	135,76
9:00	594	391	143,54
10:00	617	394	157,68
11:00	678	393	201,53
12:00	695	389	216,37
13:00	714	387	231,22
14:00	722	391	234,05
15:00	724	390	236,17
16:00	720	389	234,05
17:00	799	390	289,21
18:00	781	393	274,36
19:00	549	389	113,14
20:00	360	359	0,71
21:00	319	316	2,12
22:00	238	233	3,54
23:00	101	99	1,41

Tabela C.33 - Comparativo da quantidade média anual de veículos em dados reais e simulados nas quintas-feiras no semáforo α_{12} .

Hora	Dados reais	Dados simulados	Desvio padrão
0:00	57	60	2,12
1:00	29	31	1,41
2:00	20	21	0,71
3:00	15	15	0,00
4:00	16	15	0,71
5:00	36	15	14,85
6:00	275	36	169,00
7:00	568	272	209,30
8:00	559	393	117,38
9:00	592	389	143,54
10:00	605	389	152,74
11:00	674	780	74,95
12:00	693	388	215,67
13:00	678	390	203,65
14:00	693	394	211,42
15:00	707	389	224,86
16:00	705	392	221,32
17:00	768	389	267,99
18:00	755	388	259,51
19:00	539	399	98,99
20:00	375	372	2,12
21:00	325	392	47,38
22:00	254	254	0,00
23:00	122	123	0,71

Tabela C.34 - Comparativo da quantidade média anual de veículos em dados reais e simulados nas sextas-feiras no semáforo α_{12} .

Hora	Dados reais	Dados simulados	Desvio padrão
0:00	76	80	2,83
1:00	41	42	0,71
2:00	25	25	0,00
3:00	20	19	0,71
4:00	22	19	2,12
5:00	36	38	1,41
6:00	274	275	0,71
7:00	564	390	123,04
8:00	558	390	118,79
9:00	587	394	136,47
10:00	615	393	156,98
11:00	693	395	210,72
12:00	714	394	226,27
13:00	709	395	222,03
14:00	718	391	231,22
15:00	717	393	229,10
16:00	733	387	244,66
17:00	781	387	278,60
18:00	758	391	259,51
19:00	531	395	96,17
20:00	389	391	1,41
21:00	317	316	0,71
22:00	282	282	0,00
23:00	161	159	1,41

Tabela C.35 - Comparativo da quantidade média anual de veículos em dados reais e simulados nas sábados no semáforo α_{12} .

Hora	Dados reais	Dados simulados	Desvio padrão
0:00	107	104	2,12
1:00	69	73	2,83
2:00	55	60	3,54
3:00	49	51	1,41
4:00	48	49	0,71
5:00	52	50	1,41
6:00	114	115	0,71
7:00	249	255	4,24
8:00	319	316	2,12
9:00	394	388	4,24
10:00	470	393	54,45
11:00	564	394	120,21
12:00	591	393	140,01
13:00	423	391	22,63
14:00	329	332	2,12
15:00	294	301	4,95
16:00	281	286	3,54
17:00	305	308	2,12
18:00	310	305	3,54
19:00	347	341	4,24
20:00	277	282	3,54
21:00	259	261	1,41
22:00	219	225	4,24
23:00	170	278	76,37

Tabela C.36 - Comparativo da quantidade média anual de veículos em dados reais e simulados nos domingos no semáforo α_{13} .

Hora	Dados reais	Dados simulados	Desvio padrão
0:00	209	210	0,71
1:00	148	147	0,71
2:00	127	126	0,71
3:00	125	126	0,71
4:00	116	115	0,71
5:00	99	99	0,00
6:00	124	123	0,71
7:00	159	158	0,71
8:00	192	192	0,00
9:00	228	228	0,00
10:00	277	277	0,00
11:00	375	381	4,24
12:00	393	390	2,12
13:00	267	267	0,00
14:00	261	264	2,12
15:00	300	298	1,41
16:00	333	333	0,00
17:00	358	359	0,71
18:00	396	396	0,00
19:00	375	369	4,24
20:00	332	334	1,41
21:00	343	345	1,41
22:00	253	254	0,71
23:00	166	165	0,71

Tabela C.37 - Comparativo da quantidade média anual de veículos em dados reais e simulados nas segundas-feiras no semáforo α_{13} .

Hora	Dados reais	Dados simulados	Desvio padrão
0:00	90	90	0,00
1:00	49	49	0,00
2:00	34	34	0,00
3:00	27	28	0,71
4:00	34	35	0,71
5:00	90	91	0,71
6:00	536	527	6,36
7:00	885	982	68,59
8:00	725	545	127,28
9:00	707	656	36,06
10:00	709	710	0,71
11:00	726	719	4,95
12:00	804	750	38,18
13:00	789	723	46,67
14:00	730	628	72,12
15:00	765	720	31,82
16:00	827	702	88,39
17:00	970	767	143,54
18:00	1098	776	227,69
19:00	588	574	9,90
20:00	373	373	0,00
21:00	324	323	0,71
22:00	271	283	8,49
23:00	131	131	0,00

Tabela C.38 - Comparativo da quantidade média anual de veículos em dados reais e simulados nos terças-feiras no semáforo α_{13} .

Hora	Dados reais	Dados simulados	Desvio padrão
0:00	71	71	0,00
1:00	35	37	1,41
2:00	22	23	0,71
3:00	17	17	0,00
4:00	28	30	1,41
5:00	80	78	1,41
6:00	537	527	7,07
7:00	928	1044	82,02
8:00	765	510	180,31
9:00	733	632	71,42
10:00	720	654	46,67
11:00	737	726	7,78
12:00	830	747	58,69
13:00	806	708	69,30
14:00	744	629	81,32
15:00	788	700	62,23
16:00	837	746	64,35
17:00	1010	758	178,19
18:00	1128	730	281,43
19:00	608	604	2,83
20:00	394	400	4,24
21:00	361	357	2,83
22:00	302	312	7,07
23:00	153	150	2,12

Tabela C.39 - Comparativo da quantidade média anual de veículos em dados reais e simulados nas quartas-feiras no semáforo α_{13} .

Hora	Dados reais	Dados simulados	Desvio padrão
0:00	87	86	0,71
1:00	46	47	0,71
2:00	30	33	2,12
3:00	24	24	0,00
4:00	29	30	0,71
5:00	81	80	0,71
6:00	531	533	1,41
7:00	903	1068	116,67
8:00	767	872	74,25
9:00	739	683	39,60
10:00	740	692	33,94
11:00	742	712	21,21
12:00	830	786	31,11
13:00	791	688	72,83
14:00	751	700	36,06
15:00	787	695	65,05
16:00	845	755	63,64
17:00	1011	777	165,46
18:00	1141	726	293,45
19:00	635	633	1,41
20:00	403	408	3,54
21:00	372	362	7,07
22:00	310	312	1,41
23:00	166	161	3,54

Tabela C.40 - Comparativo da quantidade média anual de veículos em dados reais e simulados nas quintas-feiras no semáforo α_{13} .

Hora	Dados reais	Dados simulados	Desvio padrão
0:00	99	97	1,41
1:00	55	56	0,71
2:00	40	40	0,00
3:00	35	35	0,00
4:00	45	45	0,00
5:00	82	45	26,16
6:00	515	580	45,96
7:00	880	527	249,61
8:00	710	948	168,29
9:00	717	525	135,76
10:00	708	681	19,09
11:00	717	705	8,49
12:00	811	781	21,21
13:00	786	742	31,11
14:00	737	669	48,08
15:00	753	707	32,53
16:00	789	744	31,82
17:00	955	813	100,41
18:00	1093	743	247,49
19:00	610	598	8,49
20:00	403	409	4,24
21:00	360	360	0,00
22:00	322	318	2,83
23:00	187	194	4,95

Tabela C.41 - Comparativo da quantidade média anual de veículos em dados reais e simulados nas sextas-feiras no semáforo α_{13} .

Hora	Dados reais	Dados simulados	Desvio padrão
0:00	112	114	1,41
1:00	64	61	2,12
2:00	46	44	1,41
3:00	43	45	1,41
4:00	51	43	5,66
5:00	90	88	1,41
6:00	506	506	0,00
7:00	857	557	212,13
8:00	718	527	135,06
9:00	698	589	77,07
10:00	725	643	57,98
11:00	744	719	17,68
12:00	830	769	43,13
13:00	786	736	35,36
14:00	730	695	24,75
15:00	740	731	6,36
16:00	805	765	28,28
17:00	928	839	62,93
18:00	1042	807	166,17
19:00	620	618	1,41
20:00	434	427	4,95
21:00	375	393	12,73
22:00	373	380	4,95
23:00	256	248	5,66

Tabela C.42 - Comparativo da quantidade média anual de veículos em dados reais e simulados nos sábados no semáforo α_{13} .

Hora	Dados reais	Dados simulados	Desvio padrão
0:00	174	180	4,24
1:00	122	124	1,41
2:00	103	104	0,71
3:00	105	107	1,41
4:00	99	100	0,71
5:00	102	99	2,12
6:00	212	213	0,71
7:00	370	371	0,71
8:00	389	389	0,00
9:00	412	417	3,54
10:00	456	451	3,54
11:00	484	491	4,95
12:00	564	557	4,95
13:00	426	431	3,54
14:00	356	357	0,71
15:00	358	358	0,00
16:00	356	370	9,90
17:00	382	385	2,12
18:00	428	419	6,36
19:00	432	440	5,66
20:00	387	394	4,95
21:00	373	367	4,24
22:00	326	328	1,41
23:00	278	286	5,66

APÊNDICE D

Tabela D.1 - Parâmetros da distribuição de probabilidade generalizada de Pareto no semáforo α_1 .

β	θ	ρ
-0,9600	-0,0029	358,7531

Tabela D.2 - Parâmetros da distribuição de probabilidade generalizada de Pareto no semáforo α_2 .

β	θ	ρ
-0,7442	-0,0009	1469,4

Tabela D.3 - Parâmetros da distribuição de probabilidade generalizada de Pareto no semáforo α_4 .

β	θ	ρ
-0,8481	-0,0018	649,8082

Tabela D.4 - Parâmetros da distribuição de probabilidade generalizada de Pareto no semáforo α_7 .

β	θ	ρ
-0,8685	-0,0019	582,2971

Tabela D.5 - Parâmetros da distribuição de probabilidade generalizada de Pareto no semáforo α_{12} .

β	θ	ρ
-0,8039	-0,0015	799,0139

Tabela D.6 - Parâmetros da distribuição de probabilidade generalizada de Pareto no semáforo α_{13} .

β	θ	ρ
-0,9412	-0,0011	959,7955

APÊNDICE E

Algoritmo de simulação no *AnyLogic*.

```
1      import java.io.Serializable;
2      import java.sql.Connection;
3      import java.sql.SQLException;
4      import java.util.ArrayDeque;
5      import java.util.ArrayList;
6      import java.util.Arrays;
7      import java.util.Calendar;
8      import java.util.Collection;
9      import java.util.Collections;
10     import java.util.Comparator;
11     import java.util.Currency;
12     import java.util.Date;
13     import java.util.Enumeration;
14     import java.util.HashMap;
15     import java.util.HashSet;
16     import java.util.Hashtable;
17     import java.util.Iterator;
18     import java.util.LinkedHashMap;
19     import java.util.LinkedHashSet;
20     import java.util.LinkedList;
21     import java.util.List;
22     import java.util.ListIterator;
23     import java.util.Locale;
24     import java.util.Map;
25     import java.util.PriorityQueue;
26     import java.util.Random;
27     import java.util.Set;
28     import java.util.SortedMap;
29     import java.util.SortedSet;
30     import java.util.Stack;
31     import java.util.Timer;
32     import java.util.TreeMap;
33     import java.util.TreeSet;
34     import java.util.Vector;
35     import java.awt.Color;
36     import java.awt.Font;
37     import com.anylogic.engine.connectivity.ResultSet;
38     import com.anylogic.engine.connectivity.Statement;
39     import com.anylogic.engine.elements.*;
40     import com.anylogic.engine.markup.Network;
41     import com.anylogic.engine.Position;
42     import com.anylogic.engine.markup.PedFlowStatistics;
43     import com.anylogic.engine.markup.DensityMap;
44
45
46     import static java.lang.Math.*;
47     import static com.anylogic.engine.UtilitiesArray.*;
48     import static com.anylogic.engine.UtilitiesCollection.*;
49     import static com.anylogic.engine.presentation.UtilitiesColor.*;
50     import static com.anylogic.engine.HyperArray.*;
51
52     import com.anylogic.engine.*;
53     import com.anylogic.engine.analysis.*;
```

```

54     import com.anylogic.engine.connectivity.*;
55     import com.anylogic.engine.database.*;
56     import com.anylogic.engine.gis.*;
57     import com.anylogic.engine.markup.*;
58     import com.anylogic.engine.routing.*;
59     import com.anylogic.engine.presentation.*;
60     import com.anylogic.engine.gui.*;
61
62     import com.anylogic.libraries.road.*;
63     import com.anylogic.libraries.processmodeling.*;
64     import call_matlab.*;
65
66     import com.querydsl.core.Tuple;
67     import com.querydsl.sql.SQLBindings;
68     import static traffic_light_phases_optimization.DBDescriptor.*;
69
70
71
72     public class Simulation extends ExperimentSimulation<Main> {
73         @AnyLogicInternalCodegenAPI
74         public static String[] COMMAND_LINE_ARGUMENTS_xjal = new String[0];
75         {
76             setCommandLineArguments_xjal( COMMAND_LINE_ARGUMENTS_xjal );
77         }
78         @AnyLogicInternalCodegenAPI
79         private static Map<String, IElementDescriptor> elementDescriptors_xjal =
80             createElementDescriptors( Simulation.class );
81
82         @AnyLogicInternalCodegenAPI
83         @Override
84         public Map<String, IElementDescriptor> getElementDescriptors() {
85             return elementDescriptors_xjal;
86         }
87         // View areas
88         @AnyLogicInternalCodegenAPI
89         protected static final Font _text1_Font = new Font("SansSerif", 0, 24 );
90         @AnyLogicInternalCodegenAPI
91         protected static final Font _text100_Font = new Font("SansSerif", 0, 26 );
92         protected static final Color _rectangle110_Fill_Color =
93             new Color( 0xFF505050, true );
94         protected static final Color _rectangle_Fill_Color = new Color( 0xB4FFFFFF, true );
95         @AnyLogicInternalCodegenAPI
96         protected static final int _image3 = 1;
97         @AnyLogicInternalCodegenAPI
98         protected static final int _rectangle16 = 2;
99         @AnyLogicInternalCodegenAPI
100        protected static final int _text1 = 3;
101        @AnyLogicInternalCodegenAPI
102        protected static final int _rectangle110 = 4;
103        @AnyLogicInternalCodegenAPI
104        protected static final int _text100 = 5;
105        @AnyLogicInternalCodegenAPI
106        protected static final int _rectangle = 6;
107        @AnyLogicInternalCodegenAPI
108        protected static final int _image = 7;
109
110        /** Internal constant, shouldn't be accessed by user */

```



```

111     @AnyLogicInternalCodegenAPI
112     protected static final int _SHAPE_NEXT_ID_xjal = 8;
113
114
115     protected ShapeImage image3;
116     protected ShapeRectangle rectangle16;
117     protected ShapeText text1;
118     protected ShapeRectangle rectangle110;
119     protected ShapeText text100;
120     protected ShapeRectangle rectangle;
121     protected ShapeImage image;
122     @AnyLogicInternalCodegenAPI
123     private void _createPersistentElementsBP0_xjal() {
124         image3 = new ShapeImage(
125             Simulation.this, SHAPE_DRAW_2D, true, 0.0, 50.0, 0.0, 0.0,
126             997.0, 546.0, "/traffic_light_phases_optimization/",
127             new String[]{"screen.png"},
128         );
129
130         rectangle16 = new ShapeRectangle(
131             SHAPE_DRAW_2D, true, 420.0, 0.0, 0.0, 0.0,
132             null, silver,
133             580.0, 50.0, 10.0, 1.0, LINE_STYLE_SOLID );
134
135         text1 = new ShapeText(
136             SHAPE_DRAW_2D, true, 10.0, 10.0, 0.0, 0.0,
137             white, "Distribution□Center",
138             _text1_Font, ALIGNMENT_LEFT );
139
140         rectangle110 = new ShapeRectangle(
141             SHAPE_DRAW_2D, true, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0,
142             null, _rectangle110_Fill_Color,
143             420.0, 50.0, 10.0, 1.0, LINE_STYLE_SOLID );
144
145         text100 = new ShapeText(
146             SHAPE_DRAW_2D, true, 20.0, 7.0, 0.0, 0.0,
147             white, "SimulaÅ§Å£o□de□TrÅ¡fego□Veicular",
148             _text100_Font, ALIGNMENT_LEFT );
149
150         rectangle = new ShapeRectangle(
151             SHAPE_DRAW_2D, true, 0.0, 50.0, 0.0, 0.0,
152             null, _rectangle_Fill_Color,
153             1000.0, 550.0, 10.0, 1.0, LINE_STYLE_SOLID );
154
155         image = new ShapeImage(
156             Simulation.this, SHAPE_DRAW_2D, true, 60.0, 80.0, 0.0, 0.0,
157             190.0, 223.529, "/traffic_light_phases_optimization/",
158             new String[]{"traffic_light.png"},
159         );
160     }
161     @AnyLogicInternalCodegenAPI
162     private void _createPersistentElementsAP0_xjal() {
163     }
164
165     @AnyLogicInternalCodegenAPI
166     private void _createPersistentElementsBS0_xjal() {
167     }

```

```

168
169
170     protected ShapeTopLevelPresentationGroup presentation;
171     protected ShapeModelElementsGroup icon;
172
173     @Override
174     @AnyLogicInternalCodegenAPI
175     public ShapeTopLevelPresentationGroup getPresentationShape() {
176         return presentation;
177     }
178
179     @Override
180     @AnyLogicInternalCodegenAPI
181     public ShapeModelElementsGroup getModelElementsShape() {
182         return icon;
183     }
184
185     @Override
186     public int getWindowWidth() {
187         return 2440;
188     }
189
190     @Override
191     public int getWindowHeight() {
192         return 720;
193     }
194
195     @Override
196     @AnyLogicInternalCodegenAPI
197     public void onDestroy_xjal() {
198         super.onDestroy_xjal();
199     }
200
201
202     @AnyLogicInternalCodegenAPI
203     public static void main(String[] args) {
204
205         COMMAND_LINE_ARGUMENTS_xjal = args;
206         prepareBeforeExperimentStart_xjal( Simulation.class );
207         Simulation ex = new Simulation();
208         ex.setCommandLineArguments_xjal( args );
209
210         IExperimentHost host = new ExperimentHost( ex );
211
212         ex.setup( host );
213
214         host.launch();
215     }
216
217     @AnyLogicInternalCodegenAPI
218     private static final long serialVersionUID = 2891884743666188512L;
219
220     @Override
221     @AnyLogicInternalCodegenAPI
222     public void initDefaultRandomNumberGenerator(Engine _e) {
223         _e.getDefaultRandomGenerator().setSeed( 1 );
224     }

```

```

225
226      @Override
227      @AnyLogicInternalCodegenAPI
228      public Main createRoot( Engine engine ) {
229          // Create the root object
230          return new Main( engine , null , null );
231      }
232
233      @Override
234      @AnyLogicInternalCodegenAPI
235      public void setupRootParameters( final Main self , boolean callOnChangeActions ) {
236          final Main root = self; // for compatibility
237          int Const_55_xjal;
238          Const_55_xjal = self._Const_55_DefaultValue_xjal();
239          if ( callOnChangeActions ) {
240              self.set_Const_55( Const_55_xjal );
241          } else {
242              self.Const_55 = Const_55_xjal;
243          }
244          int Const_24_xjal;
245          Const_24_xjal = self._Const_24_DefaultValue_xjal();
246          if ( callOnChangeActions ) {
247              self.set_Const_24( Const_24_xjal );
248          } else {
249              self.Const_24 = Const_24_xjal;
250          }
251          int Const_76_xjal;
252          Const_76_xjal = self._Const_76_DefaultValue_xjal();
253          if ( callOnChangeActions ) {
254              self.set_Const_76( Const_76_xjal );
255          } else {
256              self.Const_76 = Const_76_xjal;
257          }
258          int Const_35_xjal;
259          Const_35_xjal = self._Const_35_DefaultValue_xjal();
260          if ( callOnChangeActions ) {
261              self.set_Const_35( Const_35_xjal );
262          } else {
263              self.Const_35 = Const_35_xjal;
264          }
265          int Const_63_xjal;
266          Const_63_xjal = self._Const_63_DefaultValue_xjal();
267          if ( callOnChangeActions ) {
268              self.set_Const_63( Const_63_xjal );
269          } else {
270              self.Const_63 = Const_63_xjal;
271          }
272          int Const_32_xjal;
273          Const_32_xjal = self._Const_32_DefaultValue_xjal();
274          if ( callOnChangeActions ) {
275              self.set_Const_32( Const_32_xjal );
276          } else {
277              self.Const_32 = Const_32_xjal;
278          }
279          int Const_26_xjal;
280          Const_26_xjal = self._Const_26_DefaultValue_xjal();
281          if ( callOnChangeActions ) {

```

```

282         self.set_Const_26( Const_26_xjal );
283     } else {
284         self.Const_26 = Const_26_xjal;
285     }
286     int Const_10_xjal;
287     Const_10_xjal = self._Const_10_DefaultValue_xjal();
288     if (callOnChangeActions) {
289         self.set_Const_10( Const_10_xjal );
290     } else {
291         self.Const_10 = Const_10_xjal;
292     }
293     int Const_53_xjal;
294     Const_53_xjal = self._Const_53_DefaultValue_xjal();
295     if (callOnChangeActions) {
296         self.set_Const_53( Const_53_xjal );
297     } else {
298         self.Const_53 = Const_53_xjal;
299     }
300     int Const_12_xjal;
301     Const_12_xjal = self._Const_12_DefaultValue_xjal();
302     if (callOnChangeActions) {
303         self.set_Const_12( Const_12_xjal );
304     } else {
305         self.Const_12 = Const_12_xjal;
306     }
307     int Const_27_xjal;
308     Const_27_xjal = self._Const_27_DefaultValue_xjal();
309     if (callOnChangeActions) {
310         self.set_Const_27( Const_27_xjal );
311     } else {
312         self.Const_27 = Const_27_xjal;
313     }
314     int Const_17_xjal;
315     Const_17_xjal = self._Const_17_DefaultValue_xjal();
316     if (callOnChangeActions) {
317         self.set_Const_17( Const_17_xjal );
318     } else {
319         self.Const_17 = Const_17_xjal;
320     }
321     int Const_29_xjal;
322     Const_29_xjal = self._Const_29_DefaultValue_xjal();
323     if (callOnChangeActions) {
324         self.set_Const_29( Const_29_xjal );
325     } else {
326         self.Const_29 = Const_29_xjal;
327     }
328     int Const_21_xjal;
329     Const_21_xjal = self._Const_21_DefaultValue_xjal();
330     if (callOnChangeActions) {
331         self.set_Const_21( Const_21_xjal );
332     } else {
333         self.Const_21 = Const_21_xjal;
334     }
335 }
336
337
338 /**

```

```

339     * Engine setup
340     */
341     @Override
342     @AnyLogicInternalCodegenAPI
343     public void setupEngine(Engine engine) {
344         engine.setATOL( 1.0E-5 );
345         engine.setRTOL( 1.0E-5 );
346         engine.setTTOL( 1.0E-5 );
347         engine.setHTOL( 0.001 );
348         engine.setSolverODE( Engine.SOLVER_ODE_EULER );
349         engine.setSolverNAE( Engine.SOLVER_NAE_MODIFIED_NEWTON );
350         engine.setSolverDAE( Engine.SOLVER_DAE_RK45_NEWTON );
351         engine.setVMethods( 427057 );
352         engine.setSimultaneousEventsSelectionMode( Engine.EVENT_SELECTION_LIFO );
353
354         engine.setStartTime( 0.0 );
355         engine.setTimeUnit( SECOND );
356         engine.setStartDate( toDate( 2015, JULY, 1, 00, 0, 0 ) );
357         engine.setStopDate( toDate( 2016, JUNE, 30, 23, 59, 59 ) );
358         engine.setRealTimeMode( true );
359         engine.setRealTimeScale( 5.0 );
360     }
361
362     /**
363     * Experiment setup
364     */
365     @Override
366     @AnyLogicInternalCodegenAPI
367
368     public void setup( IExperimentHost _e ) {
369         setName( "TrafficLightPhasesOptimizationSimulation" );
370
371         // Static initialization of persistent elements
372         _createPersistentElementsBP0_xjal();
373
374         // Dynamic initialization of persistent elements
375         _createPersistentElementsAP0_xjal();
376         presentation = new ShapeTopLevelPresentationGroup( Simulation.this, true,
377         0, 0, 0, 0, image3, rectangle16, text1,
378         rectangle110, text100, rectangle, image );
379         // Dynamic initialization of persistent elements
380         _createPersistentElementsBS0_xjal();
381         icon = new ShapeModelElementsGroup( Simulation.this,
382         getElementProperty( "traffic_light_phases_optimization.Simulation.icon",
383         IElementDescriptor.MODEL_ELEMENT_DESCRIPTOR ) );
384         _e.setZoomAndPanningEnabled( true );
385         _e.setDeveloperPanelEnabled( true );
386         _e.setDeveloperPanelVisibleOnStart( false );
387     }
388
389 }

```


APÊNDICE F

Algoritmo do teste de aderência.

```
1      clear all; clc; format long; close all; warning on;
2      h = 0:1:23;
3
4      hold on;
5
6      load Rua_239_1.mat;
7      load Rua_239_2.mat;
8      load Rua_239_3.mat;
9      load Rua_239_4.mat;
10     load Rua_239_5.mat;
11     load Rua_239_6.mat;
12     load Rua_239_7.mat;
13     load Rua_239_F.mat;
14
15     dado = geraMediaDaSemana(Rua_239_1,Rua_239_2,Rua_239_3,
16     Rua_239_4,Rua_239_5,Rua_239_6,Rua_239_7, Rua_239_F);
17     dado = dado';
18     var = fitmethis(dado, 'dtype', 'cont', 'alpha', 0.999, 'figure', 'on');
19
20     createFit(dado);
21     hold off;
```


REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABRAMCZUK, A. A. **A prática da tomada de decisão**. [S.l.]: Atlas, 2009. ISBN 978-8522452835. 42
- ÁGATHA, J. **Conheça a história da via criada para desafogar a Avenida Anhanguera e que virou palco de manifestações em Goiânia**. 2017. 53
- ANDRE, C. M. G. **Modelos mistos na estimação de parâmetros genéticos para dados com medidas repetidas via simulação**. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Viçosa, 2008. 37, 38
- ANDRES, B.; SANCHIS, R.; POLER, R. Modelado y simulación de la cadena de suministro con anylogic. **Modelling in Science Education and Learning**, v. 7, n. 2, 2016. 37
- ANFAVEA, A. ao Nacional dos Fabricantes de V. A. **Licenciamento de autoveículos novos nacionais e importados**. 2018. 27
- ASSIS, A. N.; PAULA, R. S. A.; SILVA, R. V. S.; SOUZA, E. D.; DANTAS, M. J. P. Simulação computacional como ferramenta de estudo de restaurante popular localizado em goiânia - go. In: **XXXV Encontro nacional de engenharia de produção**. [S.l.: s.n.], 2015. 36
- BERTALANFFY, L. V. **Teoria Geral dos Sistemas: fundamentos, desenvolvimento e aplicações**. 2. ed. [S.l.]: Editora Vozes, 2006. (Understanding Complex Systems). ISBN 978-85-326-3690-4. 33, 34
- BORN, M. B. **Uma Proposta Híbrida baseada em Agentes e Algoritmos Genéticos para a determinação dos tempos de semáforo visando a redução da Poluição: Estudo de caso do Centro de Rio Grande-RS**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande, Centro de Ciências Computacionais, 2015. 31, 37
- BORN, M. B.; ADAMATTI, D. F.; AGUIAR, M. S. Um experimento sobre dispersão de poluentes para a cidade de rio grande-rs utilizando o simulador sumo. **Scientia Plena**, v. 11, n. 8, 2015. 27
- BOZDONGAN, H. Model selection and akaike's information criterion (aic): The general theory and its analytical extensions. **Psychometrika**, v. 52, p. 345–370, 1987. 37, 38

- CALIXTO, W. P. **Aplicação do Mapeamento Conforme no Cálculo do Fator de Carter**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Goiás, 2008. 41, 45, 46
- CANCELLI, D. M.; DIAS, N. L. **Brevê: uma metodologia objetiva de cálculo de emissões para a frota brasileira de veículos**. 2014. 13-20 p. 27, 29, 51, 52
- CARMO, A. R. **Programação Semafórica: Uma Proposta de Otimização Apoiada em um Modelo Geo-Temporal**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, 2016. 28
- CASSANDRAS, C. G.; LAFORTUNE, S. **Introduction to Discrete Event Systems**. [S.l.]: Springer Science, 2008. ISBN 978-0-387-33332-8. 35
- CHIAVENATO, I. **Introdução à Teoria Geral da Administração**. 5. ed. [S.l.]: Atlas, 2021. ISBN 978-8597026092. 34
- CHWIF, L.; MEDINA, A. C. **Modelagem e Simulação de Eventos Discretos**. 4. ed. [S.l.: s.n.], 2015. ISBN 978-85-352-7932-0. 35, 41
- CINTRA, M. A. **Anuário Estático de Goiânia - História de Goiânia**. 2012. 53
- COMAN, M.; BADEA, D. The vehicles traffic flow optimization an urban transportation system by using simulation modeling. **Sciendo**, v. 22, n. 3, 2017. 30
- CORMEN, T. H.; LEISERSON, C. E.; RIVEST, R. L.; STEIN, C. **Introduction to Algorithms**. 2. ed. [S.l.]: The MIT Press, 2001. ISBN 0-262-03293-7. 44
- COSTA, E. M. M. **Redes de petri e aplicações aos sistemas a eventos discretos**. [S.l.]: Clube de Autores, 2011. 33
- CURY, J. E. R. Teoria de controle supervisorio de sistemas a eventos discretos. 2001. 34
- DASGUPTA, S.; PAPADIMITRIOU, C.; VAZIRANI, U. **Algoritmos**. 1. ed. [S.l.]: AMGH, 2009. ISBN 978-8577260324. 44
- DENATRAN, D. N. T. **Manual Brasileiro de Sinalização de Trânsito**. [S.l.], 2014. V. 57
- EIBEN, A. E.; SMITH, J. E. **Introduction to Evolutionary Computing**. 2. ed. [S.l.]: Springer, 2015. ISBN 978-3-662-44873-1. 41

EMBRECHTS, P.; KLÜPPELBERG, C.; MIKOSCH, T. **Modelling Extremal Events**. 1. ed. [S.l.]: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1997. ISBN 978-3-642-33483-2. 38, 39

FISHMAN, G. S. **Discrete-Event Simulation: Modeling, Programming, and Analysis**. [S.l.]: Springer Science and Business Media New York, 2001. ISBN 978-1-4419-2892-4. 35

FORRESTER, J. W. **Principles os systems**. [S.l.]: Wriyth-Allen Press Inc., 1968. 33

FRANCA, R. S. **Otimização e Estimação de Parâmetros para Processamento de Padrões Interferométricos por Computação Evolucionária**. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2015. 44

GAVIRA, M. O. **Simulação Computacional como uma Ferramenta de Aquisição de Conhecimento**. Dissertação (Mestrado) — Universidade de São Paulo, 2003. 42

GOLDBERG, D. E. **Genetic Algorithms in Search, optimization, and Machine Learning**. 1. ed. [S.l.]: Addison-Wesley Professional, 1989. 46

GRIGORYEV, I. **AnyLogic 7 in three days**. [S.l.], 2016. 37

HABERMANN, M.; MEDEIROS, A. P. P.; GOUVEIA, N. Tráfego veicular como método de avaliação da exposição à poluição atmosférica nas grandes metrópoles. **Revista Bras Epidemiol**, v. 14, p. 120–130, 2011. 27, 28

HAFTKA, R. T.; GURDAL, Z.; KAMAT, M. P. **Elements of Structural Optimization**. 2. ed. [S.l.]: Springer Netherlands, 1990. (Solid Mechanics and Its Applications 1). ISBN 978-94-015-7864-6,978-94-015-7862-2. 43

HOLTZ, G. C. C. **Traçado automático de envoltórias de esforços em estruturas planas utilizando um algoritmo evolucionário**. Dissertação (Mestrado) — Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2005. 43

HUANG, F.; LIU, P.; YU, H.; WANG, W. Identifying if vissim simulation model and ssam provide reasonable estimates for field measured traffic conflicts at signalized intersections. **Accident Analysis and Prevention**, Elsevier, v. 50, p. 1014 – 1024, 2013. 36

- KELTON, W. D.; LAW, A. M. **Simulation Modeling and Analysis**. 3. ed. [S.l.]: McGraw Hill Boston, MA, 2000. 34
- KOTZ, S.; NADARAJAH, S. **Extreme Value Distributions**. [S.l.]: Imperial College Press, 2000. ISBN 978-1-86094-224-2. 38, 39
- KRAJZEWICZ, D.; ERDMANN, J.; BEHRISCH, M.; BIEKER, L. Recent development and applications of sumo - simulation of urban mobility. In: INSTITUTE OF TRANSPORTATION SYSTEMS. **International Journal on Advances in Systems and Measurements**. [S.l.], 2012. v. 5. 37
- KUMAR, P. M.; G., D. U.; MANOGARAN, G.; SUNDARASEKAR, R.; CHILAMKURTI, N.; VARATHARAJAN, R. Ant colony optimization algorithm with internet of vehicles for intelligent traffic control system. **Computer Networks**, Elsevier, v. 144, p. 154–162, 2018. 30, 31
- LAGARIAS, J. C.; REEDS, J. A.; WRIGTH, M. H.; WRIGTH, P. E. Convergence properties of the nelder-mead simplex method in low dimensions. **Society for Industrial and Applied Mathematics**, v. 9, p. 112 – 147, 1998. 43
- LARA, L. G. e. A. d.; FRYSZMAN, F. **Administração, Sistemas e Ambientes**. 1. ed. [S.l.]: InterSaber, 2018. ISBN 978-8559729603. 34
- LAW, A. M. **Simulation Modeling and Analysis**. 4. ed. [S.l.]: McGraw-Hill, 2007. 36
- LEE, K. Y.; EL-SHARKAWI, M. A. **Modern Heuristic Optimization Techniques: Theory and Application to Power Systems**. [S.l.]: IEEE Press, 2008. (Power Engineering). ISBN 978-0471-45711-4. 44
- LEMES, M. J. R. **Complexidade, Acoplamento e Criticalidade (C²A) como Indicadores de Risco em Projetos de Sistemas**. Tese (Doutorado) — Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2012. 34, 35
- LEMONTE, A. J.; CORDEIRO, G. M. The β birnbaum saunders distribution: An improved distribution for fatigue life modeling. **Computational Statistics and Data Analysis**, v. 78, p. 1445–1461, 2011. 38
- LEMONTE, A. J.; SIMAS, A. B.; CRIBARI-NETO, F. Bootstrap-based improved estimators for the two-parameter birnbaum-saunders distribution. **Journal of Statistical Computation and Simulation**, v. 78, 2008. 38

LEVITIN, A. **Introduction to The Design and Analysis of Algorithms**. 3. ed. [S.l.]: Pearson, 2012. ISBN 978-0-13-231681-1. 44

LINDEN, R. **Algoritmos Genéticos: Uma importante ferramenta da inteligência computacional**. [S.l.]: Editora Brasport, 2006. 45

LIU, P.; QU, X.; YU, H.; WANG, W.; CAO, B. Development of a vissim simulation model for u-turns at unsignalized intersections. **Journal of Transportation Engineering**, American Society of Civil Engineers, 2012. 36

LIU, Z. First international conference on innovative computing, information and control - volume i (icic'06). In: . Ningbo University, China: IEEE, 2006. (Advances in PID Control). ISBN 0-7695-2616-0. 30

LUCHI, F. **Um algoritmo híbrido entre evolução diferencial e Nelder-Mead usando entropia para problemas de otimização não-linear inteira mista**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Espírito Santo, 2016. 43

MENEGUETTE, R. I.; FILHO, G. P. R.; GUIDONI, D. L.; PESSIN, G.; VILLAS, L. A.; UHEYAMA, J. Increasing intelligence in inter-vehicle communications to reduce traffic congestions: Experiments in urban and highway environments. **Revista Plos One**, 2016. 28

MEYER-NIEBERG, S.; LEOPOLD, N.; UHLIG, T. **Natural Computing for Simulation-Based Optimization and Beyond**. [S.l.]: SpringerBriefs in Operations Research, 2020. ISBN 978-3-030-26214-3. 45

MINSKY, M. **The Society of Mind**. [S.l.]: Simon & Schuster, 1988. ISBN 0-671-60740-5. 35

MMA, M. do M. A. **Primeiro inventário nacional de emissões atmosféricas por veículos automotores rodoviários: relatório final**. 2011. 29

MOBUS, G. E.; KALTON, M. C. **Principles of Systems Science**. 1. ed. [S.l.]: Springer Verlag New York, 2015. (Understanding Complex Systems). ISBN 978-1-4939-1919-2,978-1-4939-1920-8. 33

NELDER, J. A.; MEAD, R. A simplex method for function minization. **The Computer Journal**, v. 7, p. 308 – 313, 1965. 43

MEDEIROS, D. J.; WATSON, E.; CARSON, J. S.; MANIVANNAN, M. S. (Ed.). **Input Modeling Tools for Complex Problems**. [S.l.]: Winter Simulation Conference, 1998. 37

OICA, I. O. M. V. M. **WORLD MOTOR VEHICLE PRODUCTION BYCOUNTRY AND TYPE**. 2019. 27

PAIVA, J. R. B. **Métrica de complexidade em sistemas a eventos discretos**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Goiás, 2016. 42

POP, M. Traffic lights management using optimization tool. **Procedia Social and Behavioral Sciences**, Elsevier, v. 238, p. 323–330, 2017. 30, 37

REIS, M. R. C. **Análise Comparativa de Métodos de Ótimização Aplicados à Sintonia do Controlador PI**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Goiás, 2014. 36, 44, 45, 46

SALIBY, E.; ARAÚJO, M. M. Cálculo do valor em risco através de simulação monte carlo: Uma avaliação de uso de métodos amostrais mais eficientes em portfólios com opções. **XXXIII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, Campos Do Jordao**, 2001. 36

SANTOS, L. E. B. **Otimização do Atendimento Médico-Hospitalar Emergencial utilizando Sistema a Eventos Discretos**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Goiás - Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação, 2016. 44

SCHRIBER, T. J. Simulation using gpss. 1974. 36

SCHWAAB, M.; PINTO, J. C. **Análise de Dados Experimentais: Fundamentos de Estatística e Estimação de Parâmetros**. [S.l.]: E-papers, 2007. (Escola Piloto de Engenharia Química, I). 43, 44

SILVA, A. J. M. **Implementação de um Algoritmo Genético Utilizando o Modelo de Ilhas**. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2005. 45, 46

SILVA, W. A. **Otimização de Parâmetros da Gestão Baseada em Atividades Aplicadas em uma Célula de Manufatura**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Itajubá, 2005. 41

- SMIT, R.; NTZIACHRISTOS, L.; BOULTER, P. Validation of road vehicle and traffic emission models e a review and meta-analysis. **Atmospheric Environment**, Elsevier, p. 2943–2953, 2010. 29
- SOUZA, C. F. **Estatística: Uma abordagem para hidrólogos**. 2011. 37
- SOUZA, L. A. P. S. **Comparação entre Métodos de Otimização Aplicados aos Ajustes de Relés Direcionais de Sobrecorrente**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Goiás - Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação, 2019. 41
- SPIEGEL, M. R. **Probabilidade e estatística**. [S.l.]: McGraw Hill, 1978. 38
- TANOMARU, J. Motivação, fundamentos e aplicações de algoritmos genéticos. In: **II Congresso Brasileiro de Redes Neurais**. [S.l.: s.n.], 1995. 46
- TURKY, A. M.; AHMAD, M. S.; YUSOFF, M. Z. The use of genetic algorithm for traffic light and pedestrian crossing control. **International Journal of Computer Science and Network Security**, v. 9, n. 2, 2009. 27, 30
- WEI, W.; WANG, M. Traffic signal control using fuzzy and neural network. **Semantic Scholar**, 2001. 31
- WRIGHT, M. H. Nelder, mead, and the other simplex method. **Documenta Mathematica**, p. 271 – 276, 2012. 43
- ZHANG, K.; BATTERMAN, S. Air pollution and health risks due to vehicle traffic. **Science of the Total Environment**, Elsevier, p. 307–316, 2013. 27, 28
- ZHANG, X.; CRAFT, E.; ZHANG, K. Characterizing spatial variability of air pollution from vehicle traffic around the houston ship channel area. **Atmospheric Environment**, Elsevier, p. 167–1775, 2017. 29
- ZLATANOVSKA, B.; STOJKOVIKJ, N.; KOCALEVA, M.; STOJANOVA, A.; LAZAROVA, L. K.; GOBUBOVSKI, R. Modeling of some chaotic systems with anylogic software. **TEM Journal**, v. 7, n. 8, p. 465–470, 2018. 37

