



CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MODELAGEM MATEMÁTICA E COMPUTACIONAL

CAPSI: MODELO MATEMÁTICO PARA OTIMIZAÇÃO DO CONTROLE ATIVO DOS PARÂMETROS SEMAFÓRICOS DAS INTERSEÇÕES

SAMARA SOARES LEAL

Orientador: Prof. Dr. Paulo Eduardo M. de Almeida

BELO HORIZONTE
JULHO DE 2020

SAMARA SOARES LEAL

**CAPSI: MODELO MATEMÁTICO PARA OTIMIZAÇÃO
DO CONTROLE ATIVO DOS PARÂMETROS
SEMAFÓRICOS DAS INTERSEÇÕES**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Modelagem Matemática e Computacional do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, como requisito para a obtenção do título de Doutor em Modelagem Matemática e Computacional.

Área de concentração: Modelagem Matemática e Computacional

Linha de pesquisa: Sistemas Inteligentes

Orientador: Prof. Dr. Paulo Eduardo M. de Almeida

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MODELAGEM MATEMÁTICA E COMPUTACIONAL
BELO HORIZONTE
JULHO DE 2020

Leal, Samara Soares
L435c CAPSI: modelo matemático para otimização do controle ativo dos
parâmetros semafóricos das interseções / Samara Soares Leal. – 2020.
97 f.

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em
Modelagem Matemática e Computacional.
Orientador: Paulo Eduardo M. de Almeida.
Tese (doutorado) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas
Gerais.

1. Trânsito – Sinais e sinalização – Teses. 2. Trânsito – Modelos
matemáticos – Teses. 3. Algoritmos – Teses. 4. Trânsito – Controle – Teses.
5. Simulação (Computadores) – Teses. I. Almeida, Paulo Eduardo Maciel de.
II. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. III. Título.

CDD 003.3

“O educador se eterniza em cada ser que educa.”

Em homenagem à memória do meu orientador, Paulo Almeida, meu “pai” acadêmico e minha grande inspiração.

Agradecimentos

Gostaria de agradecer, primeiramente, a Deus por ser essa fonte inesgotável de força na minha vida. Agradeço, também, aos meus pais João Batista e Maria da Soledade, por serem esta constante de amor, carinho e proteção e por todo apoio desde o início deste trabalho. Aos meus irmãos Ana Amélia e Giuliano, pela amizade e incentivo;

Ao meu orientador Paulo Almeida, que não está mais entre nós e não poderá ver a defesa desse trabalho, mas que, certamente, estará olhando por mim orgulhoso, com os frutos colhidos após anos de trabalho juntos. Ao meu "pai"acadêmico, agradeço por todo ensinamento que me proporcionou, com muito zelo, dedicação e confiança. Obrigada por nunca me deixar ficar na zona de conforto, incentivar-me e acreditar no meu potencial.

Creio que sempre podemos tirar um aprendizado de momentos difíceis e sei que, como ele mesmo me fez enxergar, é nos momentos em que somos desafiados que temos a chance de mostrar o nosso potencial, de nos fortalecermos e sermos melhores. E é exatamente isso que irei fazer, em sua memória e em sua homenagem. Irei usar todo ensinamento dado por ele, não só para me tornar uma educadora melhor, uma profissional melhor, mas, também, para me tornar um ser humano melhor, pois seus ensinamentos foram para além da orientação acadêmica, foram ensinamentos para a vida.

Aos colegas do doutorado, especialmente a Carol, Fábio e Ramon e aos demais amigos, pelos momentos de distração e pelo constante incentivo e apoio.

Aos professores, por todo ensinamento;

Aos colegas de trabalho do UniBH e alunos pelo incentivo, constante apoio e parceria;

Aos professores Moises Pereira, Bráulio Couto, Renato e Elievam pelo incentivo e auxílio no início e durante o doutorado;

Ao CEFET-MG e à CAPES, pela estrutura fornecida durante o curso e apoio financeiro;

À empresa BHTRANS, pelo fornecimento dos dados para realização dos experimentos;

E, finalmente, gostaria de dedicar esse trabalho a todas às mulheres guerreiras que, assim como eu, não desistem de lutar para alcançar os seus objetivos.

"Para quem tem fé, a vida nunca tem fim."

Resumo

A frota de veículos circulando nos grandes centros brasileiros tem aumentado significativamente, porém as políticas públicas de mobilidade e investimentos em obras viárias não têm sido suficientes para acompanhar este crescimento. A consequência disso é o aumento do tráfego de veículos nas vias ocasionando congestionamentos que afetam a sociedade, o meio ambiente e a economia do país. Diante deste cenário, há diversos trabalhos, na literatura, sobre a construção de cidades inteligentes (*smart cities*), pelo uso da tecnologia, como alternativa para melhorar a mobilidade nos centros urbanos. Dentre as estratégias utilizadas, destacam-se os semáforos inteligentes ou reativos. Nesse contexto, este trabalho propõe um novo modelo de controle semafórico denominado “CAPSI - Controle Ativo dos Parâmetros Semafóricos de Interseções”. Esse modelo associa o uso de técnicas de Inteligência Computacional (IC) na otimização dos parâmetros semafóricos: tempo de verde, tempo de ciclo, defasagem e sequência de fases. Para tal, o modelo utiliza uma função de atraso para avaliar as soluções dos algoritmos de IC. Assim, não é utilizada a simulação para avaliar as soluções (limitação encontrada em trabalhos na literatura), pois esta estratégia torna o processo de busca dos algoritmos lento e de difícil adaptação para o mundo real. Para testar a aplicabilidade do CAPSI um estudo de caso é desenvolvido, em que os dados de demanda dos veículos nas interseções de duas regiões de Belo Horizonte (dados reais coletados pela Empresa de Transportes e Trânsito de Belo Horizonte - BHTrans) são carregados no simulador de tráfego AIMSUN. Este simulador é calibrado previamente para melhor representar as condições reais das regiões de estudo. O modelo CAPSI recebe essas demandas de veículos do AIMSUN e, a partir da aplicação de um Algoritmo Genético (AG) e/ou um Algoritmo de Evolução Diferencial (DE), define, em tempo real, uma boa configuração dos parâmetros semafóricos que atenda à demanda de veículos de modo a diminuir o tempo de atraso desses veículos nas interseções em estudo. Para calcular esse tempo de atraso é realizado um experimento adicional para definir qual função de atraso, dentre as mais utilizadas na literatura, apresenta uma estimativa mais adequada para a medida em questão. Os experimentos realizados foram analisados estatisticamente. Os resultados mostram que o AG foi capaz de encontrar melhores soluções para o problema quando comparado ao algoritmo DE e ao plano de semáforos utilizado atualmente pela BHTrans. Estes resultados mostram que o uso do modelo CAPSI associado às técnicas de IC no processo de otimização do plano de semáforos é promissor, podendo proporcionar uma gestão de tráfego mais eficiente que minimize as consequências causadas pelos congestionamentos de veículos nos centros urbanos.

Palavras-chave: Programação Semafórica. Algoritmos Evolucionários. Controle Ativo de Tráfego. Simulação de Tráfego.

Abstract

The vehicle fleet circulating in Brazilians' big city centers has increased significantly, but the mobility public policies and investments in road works have not been sufficient to follow this growth. The consequence of it is the increase of vehicular traffic on roads leading to congestion affecting the society, the environment and the country's economy. Given this scenario, there are several works in the literature on the construction of smart cities, by the use of technology, as an alternative to improve mobility in urban centers. Among the strategies used, stands out the intelligent or reactive traffic lights. In this context, this work presents a new traffic lights control model called "ACTSP - Active Control of the Traffic Signal's Parameters". This model associates the use of Computational Intelligence (CI) techniques to optimize the following semaphore parameters: green time, cycle time, phase shift and phase sequence. For this, the model uses a delay function to evaluate the solutions of the algorithms. Thus, simulation is not used to evaluate solutions (limitation found in studies in the literature), as this strategy makes the search process of the algorithms slow and difficult to adapt to the real world. For testing the applicability of ACTSP, a case study is developed. For this purpose, the demand data of the vehicles in intersections of two Belo Horizonte regions (actual data collected by the Belo Horizonte Transport Company - BHTrans) are loaded in the AIMSUN traffic simulator. This simulator is calibrated previously to better represent the real conditions of the study region. The ACTSP model receives these demands from AIMSUN and, based on the application of a GA - Genetic Algorithm and a DE - Differential Evolutionary Algorithm, defines, in real time, the best configuration of the traffic parameters that meets the demand in order to reduce the delay of these vehicles in the studied intersections. For the calculation of this delay time, an additional experiment will be carried out to define which delay function, among the most used in the literature, provides a better estimate for the measure in question. The experiments were statistically analyzed and the results show that the GA was able to find better solutions to the problem when compared to DE and the traffic plan currently used by BHTrans. These results show that the use of the ACTSP model associated with computational intelligence techniques in the traffic optimization process is promising and can provide a more efficient traffic management that minimizes the consequences caused by traffic congestion in urban centers.

Keywords: Traffic Signal Programming. Evolutionary Algorithms. Active Traffic Management. Traffic Simulation.

Lista de Figuras

Figura 1 – Região 1 - Bairro Floresta.	6
Figura 2 – Região 2 - Savassi.	7
Figura 3 – Interseção entre duas vias.	23
Figura 4 – Diagrama de intervalos luminosos.	25
Figura 5 – Subconjunto e interrelação entre técnicas da Inteligência Computacional.	32
Figura 6 – Cruzamento em um ponto de corte para valores binários.	36
Figura 7 – Mutação Simples.	37
Figura 8 – Esquema geral do modelo de otimização CAPSI.	43
Figura 9 – Veículos circulando nas vias durante a simulação.	44
Figura 10 – Estratégia de partições móveis.	48
Figura 11 – Rede de Tráfego criada no AIMSUN - Bairro Floresta.	57
Figura 12 – Plano semafórico BHTrans.	59
Figura 13 – Experimento <i>E1</i>	60
Figura 14 – Experimento <i>E2</i>	62
Figura 15 – Experimento <i>E3</i>	63
Figura 16 – Planos semafóricos obtido pela otimização do modelo CAPSI com <i>C4</i> - Bairro Floresta.	66
Figura 17 – Experimento <i>E4</i>	68
Figura 18 – Diagrama <i>box plot</i> de comparação entre as soluções - Bairro Floresta.	69
Figura 19 – Valores dos Tempos de Verde durante a simulação.	71
Figura 20 – Valores das Defasagens durante a simulação.	72
Figura 21 – Valores dos Tempos de Verde Devido às Oscilações de Tráfego.	73
Figura 22 – Diagrama <i>box plot</i> de comparação entre as soluções dado um aumento na demanda - Floresta.	74
Figura 23 – Rede de Tráfego criada no AIMSUN - Região da Savassi.	74
Figura 24 – Plano semafórico BHTrans.	76
Figura 25 – Experimento <i>E7</i>	77
Figura 26 – Planos semafóricos obtido pela otimização do modelo CAPSI com <i>C4</i>	78
Figura 27 – Experimento <i>E8</i>	79
Figura 28 – Diagrama <i>box plot</i> de comparação entre as soluções - Bairro Savassi.	80
Figura 29 – Valores dos Tempos de Verde durante a simulação.	81
Figura 30 – Valores das Defasagens durante a simulação.	81
Figura 31 – Valores dos Tempos de Verde Devido às Oscilações de Tráfego - Savassi	83
Figura 32 – Diagrama <i>box plot</i> de comparação entre as soluções dado um aumento na demanda - Savassi.	84

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Tabela Comparativa do Estado da Arte	20
Tabela 2 – Cruzamento Uniforme.	37
Tabela 3 – Parâmetros de Calibração	45
Tabela 4 – Variável de Decisão	47
Tabela 5 – Operadores Genéticos	51
Tabela 6 – Lista de experimentos e abreviações utilizadas no texto	52
Tabela 7 – Configurações utilizadas no experimento <i>E3</i> desta tese.	54
Tabela 8 – Característica das Interseções	56
Tabela 9 – Características dos movimentos	57
Tabela 10 – Característica das Fases	58
Tabela 11 – Parâmetros de Calibração - Valores Otimizados	61
Tabela 12 – Experimentos	63
Tabela 13 – Aumento na Demanda por Interseção Controlada por Grupos Semafóricos (GS)	70
Tabela 14 – Característica das Interseções - Região da Savassi.	72
Tabela 15 – Características dos movimentos- Região da Savassi.	75
Tabela 16 – Característica das Fases	75
Tabela 17 – Aumento na Demanda por Interseção - Região da Savassi	82

Lista de Algoritmos

Algoritmo 1 – Método de Seleção por Torneio	36
Algoritmo 2 – Sequência Genérica de um Algoritmo Genético	38
Algoritmo 3 – Pseudocódigo do Método de Evolução Diferencial Canônico.	41

Lista de Abreviaturas e Siglas

AG	Algoritmo Genético
ATM	<i>Active Traffic Management</i>
CAPSI	Controle Ativo dos Parâmetros Semafóricos das Interseções
CE	Computação Evolucionária
DE	<i>Differential Evolution</i>
DENATRAN	Departamento Nacional de Trânsito
IA	Inteligência Artificial
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IC	Inteligência Computacional
ITACA	<i>Intelligent Traffic Adaptive Control Agent</i>
ITS	<i>Intelligent Transportation Systems</i>
MOP	<i>Multi-objective Optimization Problem</i>
NSGA-II	<i>Nondominated Sorting Genetic Algorithm II</i>
PI	Índice de Performance
PMX	<i>Partially Matched Crossover</i>
PNAD	Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios
RNA	Redes Neurais Artificiais
SCATS	<i>The Sydney Coordinated Adaptive Traffic System</i>
SCOOT	<i>Split, Cycle and Offset Optimization Technique</i>

Lista de Símbolos

n_p	Número de veículos que sofrem paradas por ciclo
a_m	Atraso médio dos veículos
t_m	Tempo médio de viagem
x	Tempo de verde efetivo do semáforo
c	Tempo de ciclo do semáforo
S	Fluxo de saturação
q	Fluxo de veículos
p	Fração do tempo de verde do semáforo
g	Grau de saturação
n	Número de veículos
tv_i	Tempo de viagem de cada veículo i
c	Capacidade da via
i	Interseção
o	Defasagem
s	Sequência de fases
f	Fase de semáforo
$f(x)$	Função objetivo
G_i	Gene de algoritmo evolucionário
$N(p_i, \alpha)$	Distribuição normal
kp	Constante de penalidade de um algoritmo evolucionário
kw_0	Teste de Kruskal Wallis

Sumário

1 – Introdução	1
1.1 Contextualização	4
1.2 Abordagem Proposta	5
1.3 Objetivos	6
1.3.1 Objetivo Geral	6
1.3.2 Objetivos Específicos	7
1.4 Justificativa	8
1.5 Metodologia	9
1.5.1 Hipóteses	9
1.6 Organização da Tese	10
2 – Trabalhos Relacionados	11
2.1 Calibração do Modelo de Simulação de Tráfego	11
2.2 Uso de técnicas de IC na Otimização Semafórica	12
2.2.1 Algoritmo Genético - AG	13
2.2.2 Abordagem Multiobjetivo	15
2.2.3 Comparação do AG com outras técnicas de IC	17
2.2.4 Combinação entre o AG e outras técnicas de IC	17
2.2.5 Outras técnicas de IC	18
2.3 Tabela Comparativa do Estado da Arte	19
2.4 Considerações Finais	20
3 – Fundamentação Teórica	22
3.1 Sinalização Semafórica	22
3.1.1 Tipos de Controle	25
3.1.2 Estratégias de Controle	26
3.1.3 Medidas de Desempenho	26
3.1.3.1 Número de Paradas	27
3.1.3.2 Atraso Médio	27
3.1.3.3 Tempo Médio de Viagem	29
3.1.3.4 Velocidade Média	30
3.1.4 Cálculo do Plano Semafórico	30
3.1.4.1 Capacidade	30
3.1.4.2 Fluxo de Saturação	30
3.1.4.3 Grau de Saturação	31
3.2 Inteligência Computacional	31

3.2.1	Otimização	33
3.2.2	Computação Evolucionária	33
3.2.2.1	Algoritmo Genético	34
3.2.2.1.1	Representação das Soluções	35
3.2.2.1.2	Função de Aptidão	35
3.2.2.1.3	Seleção	35
3.2.2.1.4	Operadores Genéticos	35
3.2.2.1.5	Estrutura Canônica	38
3.2.2.2	Algoritmo de Evolução Diferencial	38
3.2.2.2.1	Recombinação	39
3.2.2.2.2	Seleção	40
3.2.2.2.3	Estrutura Canônica	40
3.3	Considerações Finais	40
4	– Modelagem do Problema	42
4.0.1	Algoritmo Genético para Calibração dos Parâmetros do AIMSUN	45
4.0.1.1	Variável de Decisão	45
4.0.1.2	Função Objetivo e Formulação do Problema	45
4.0.1.3	Operadores Genéticos	46
4.0.2	Inteligência Computacional - Modelo CAPSI	47
4.0.2.1	Variável de Decisão	47
4.0.2.1.1	Estratégia de Partições Móveis	48
4.0.2.2	Função de Aptidão	48
4.0.2.3	Função Objetivo e Formulação do Problema	49
4.0.2.4	Operadores Genéticos	51
4.1	Considerações Finais	51
5	– Resultados Experimentais	52
5.1	Planejamento dos Experimentos	52
5.2	Rede de Tráfego - Bairro Floresta	56
5.2.1	Experimento <i>E1</i>	60
5.2.2	Experimento <i>E2</i>	61
5.2.3	Experimento <i>E3</i>	62
5.2.4	Experimento <i>E4</i>	67
5.2.5	Experimento <i>E5</i>	68
5.2.6	Experimento <i>E6</i>	70
5.3	Rede de Tráfego - Região da Savassi	72
5.3.1	Experimento <i>E7</i>	75
5.3.2	Experimento <i>E8</i>	78
5.3.3	Experimento <i>E9</i>	79

5.3.4	Experimento <i>E10</i>	82
6	– Discussões Finais	85
6.1	Discussão sobre os Resultados	85
6.2	Contribuições Esperadas	87

Capítulo 1

Introdução

O Sistema Nacional de Mobilidade Urbana é o conjunto organizado e coordenado dos modos de transporte, de serviços e de infraestruturas que garante os deslocamentos de pessoas e cargas no território do Município, conforme a Lei Nº 12.587, de 3 de Janeiro de 2012 (??). Devido ao aumento da frota de veículos no Brasil nos últimos anos, definir um sistema de tráfego de veículos eficiente tem sido um grande desafio para as políticas públicas de mobilidade dos centros urbanos brasileiros.

De acordo com o levantamento anual do Sindicato dos Fabricantes de Peças (Sindipeças) e da Associação Nacional dos Fabricantes (Anfavea), a frota circulante de veículos no Brasil, em 2017, foi de aproximadamente 43,4 milhões de unidades. O crescimento sobre o ano anterior foi de 1,2%, conforme dados da ??). Este aumento decorre tanto da elevação do poder aquisitivo das pessoas quanto das deficiências do transporte público e do apoio crescente do governo federal, na forma de isenções de impostos e facilidades financeiras na aquisição de veículos individuais. Isso tudo provocou o que os especialistas chamam de crise da mobilidade urbana, que acontece quando o Estado não consegue oferecer condições para que as pessoas se desloquem adequadamente nas cidades. Se estas condições continuarem, a frota de automóveis, ao longo dos próximos 20 anos, vai crescer 140% e atingirá a marca de 95,2 milhões de unidades, afirma a ??).

Um dos principais reflexos desse aumento no número de veículos privados trafegando nas vias é o congestionamento, que traz consequências para a qualidade de vida da população, associadas a prejuízos econômicos, sociais e ambientais. Observa-se que as políticas de mobilidade urbana adotadas como: pedágio urbano de motoristas que circulam pela cidade em horas de maior movimento; investimentos em transporte público de qualidade; rodízio de veículos nos centros urbanos; aumento da velocidade nos corredores de ônibus e no número de vias; dentre outras; não estão sendo suficientes para conter os problemas advindos do aumento do trânsito. Diante disto, estratégias vêm sendo adotadas para definir um plano de mobilidade eficiente para as centros urbanos dentro de um contexto atual de

busca por projetos exequíveis de cidades inteligentes e sustentáveis.

Segundo ??), cidades inteligentes (*smart cities*), são cidades que utilizam tecnologia para melhorar a infraestrutura urbana e tornar os centros urbanos mais eficientes e melhores de se viver. Dentre as diversas áreas que se pode investir para tornar uma cidade mais inteligente, destaca-se a mobilidade. Uma das estratégias utilizadas no plano de mobilidade dessas cidades é o uso de semáforos inteligentes, capazes de perceber as movimentações nas vias e alterar automaticamente e, em tempo real, a sua configuração para atender à demanda, de forma a aumentar a fluidez dos veículos e diminuir os tempos de atraso.

Uma das grandes áreas dos Sistemas Inteligentes de Transporte (ITS - *Intelligent Transport Systems*) são os Sistemas de Controle de Viagens Avançados (ATMS - *Advanced Travel Management Systems*), (?). Dentre as estratégias de controle ATMS, destaca-se o controle ativo de tráfego. Esse tipo de controle têm a capacidade de gerenciar, dinamicamente, congestionamentos recorrentes e não recorrentes com base nas condições de tráfego existentes, afirmam ??. Assim, o controle ativo busca uma forma eficiente de otimizar as condições do trânsito em tempo real durante os períodos de tráfego intenso.

Muitos avanços científicos têm sido realizados em pesquisas sobre a aplicação de ITS. Os primeiros estudos utilizavam métodos determinísticos para configurar os ciclos em interseções isoladas, como no trabalho de ??. Essa abordagem foi adotada como base nos principais manuais semafóricos e referências bibliográficas da literatura: (?); (?); (?); (?); (?) e (?).

No Brasil, diversos estudos têm sido desenvolvidos acerca da estratégia de controle ativo de tráfego. No trabalho de ??), o desempenho do gerenciamento de tráfego com planos de tempo fixo do *software* TRANSYT é comparado com o controle em tempo real do sistema SCOOT, avaliando os indicadores de atraso médio e volume em cada aproximação dos cruzamentos em estudo. ??) apresentam uma discussão sobre os indicadores de desempenho para o Sistema de Controle de Tráfego em Área (CTA) e em tempo real da cidade de Fortaleza (Brasil). Este mesmo sistema foi utilizado no trabalho de ??) para criação de uma interface lógica com a base de dados da plataforma de Sistemas de Informações Geográficas (SIG) do sistema TransCAD.

Além disso, muitas técnicas de Inteligência Computacional (IC), para auxiliar o controle semafórico, também têm sido abordadas. Desde técnicas que utilizam simples estratégias de fácil implantação, até algoritmos avançados com inúmeras regras. Dentre elas, destacam-se os algoritmos evolucionários, utilizados no Modelo de Controle Ativo da Temporização Semafórica de Interseções (ACTST - *Active Control of Traffic Signal Timing*), em ??), para otimizar os tempos de atraso dos veículos nas interseções, são eles: (i) o algoritmo genético (AG), que é uma classe particular de algoritmos evolucionários que usam técnicas

inspiradas na biologia evolucionista como hereditariedade, mutação, seleção natural e cruzamento (??); (ii) o algoritmo de evolução diferencial (DE), que tem um mecanismo de busca sustentado pelo operador de mutação diferencial que utiliza vetores-diferença criados a partir de pares de vetores da própria população (??); e (iii) o algoritmo *Nondominated Sorting Genetic Algorithm 2* (NSGA2), que constrói um mecanismo de aptidão a partir do algoritmo de classificação de fronteira *fast nondominated sorting* e a atribuição do operador de preservação da diversidade *crowding distance* (??).

Os algoritmos evolucionários têm sido utilizados, também, em sistemas de controle do tráfego para otimizar os tempos de viagem (??), para reduzir o tempo de atraso dos veículos (??), para maximizar a capacidade da rede (??) e minimizar o índice de performance da rede (??), dentre outros objetivos. Já os trabalhos de ??), ??), ??), ??) utilizam a abordagem evolucionária multiobjetivo para solucionar problemas de controle de tráfego.

Alguns trabalhos são brevemente discutidos nesta sessão devido à sua relevância e às várias formas de tratar o problema. No trabalho de ??) o AG é utilizado para encontrar tempos de semáforos para os estágios de interseções. ??) realizaram a coordenação de semáforos usando um modelo de simulação microscópica. No trabalho de ??), os autores apresentaram um sistema de controle de tráfego baseado em simulação e otimização com o uso do AG. ??) aplicaram técnicas baseadas em agentes e AG para habilitar a otimização de redes de semáforos. Os autores ??) utilizaram algoritmos genéticos no sistema de controle de tráfego e travessia de pedestres para prover respostas inteligentes de intervalos para tempos de verde, utilizando cargas dinâmicas de tráfego. Já ??) definem um plano semaforico, a partir de um AG, para minimizar as emissões de poluentes dos veículos, o consumo de combustível e o atraso nas interseções.

A partir do estudo do estado da arte realizado nesta tese, percebe-se que, por mais que existam muitos trabalhos na literatura abordando técnicas de IC para o controle semaforicos das interseções, ainda falta um modelo completo que otimize, ao mesmo tempo, todos os parâmetros principais de controle dos semáforos: (i) tempo de verde, (ii) tempo de ciclo, (iii) defasagem e (iv) sequência de fases, de forma automática e em tempo real, ou seja, de acordo com a demanda de veículos circulando nas vias. E que este modelo seja independente de simulação para avaliar as soluções dos algoritmos, genérico e escalável e, portanto, mais rápido e fácil de ser implantado em situações do mundo real.

Diante do exposto, o presente trabalho apresenta uma proposta inovadora de modelo matemático para otimização do controle semaforico, denominado “CAPSI - Controle Ativo dos Parâmetros Semaforicos de Interseções”, que é uma extensão e evolução dos estudo de ??), ??), ??) e ??) objetivando suprir as limitações da literatura, contribuindo, assim, para as pesquisas científicas em ITS e na definição de estratégias para melhorar a mobilidade urbana.

1.1 Contextualização

A mobilidade inteligente trata inúmeros problemas que influenciam direta e negativamente a qualidade de vida dos cidadãos, seja por meio do aquecimento global devido às emissões dos gases do efeito estufa, dos prejuízos causados às atividades econômicas decorrentes do tráfego congestionado ou do aumento no número de acidentes no trânsito, que resultam na redução geral da qualidade de vida das pessoas (??).

Devido ao aumento da população urbana e, conseqüentemente, do número de veículos trafegando nas vias, um dos maiores desafios para a construção de uma cidade inteligente é a implementação de um plano de mobilidade inteligente. Dentre as diversas soluções de mobilidade urbana, destacam-se os semáforos inteligentes que, dentro de um contexto de controle ativo da sinalização semafórica, possuem a capacidade de adequar o seu funcionamento às condições de trânsito de cada trecho percorrido. A medida que o fluxo de veículos aumenta ou reduz na via, as sinaleiras podem se auto ajustar em relação ao tempo em que ficarão vermelha, amarela ou verde e se adaptar às condições da via, em tempo real.

Segundo ??), o controle ativo de tráfego é uma técnica de gerenciamento da sinalização semafórica que já foi implantada em diversos países da Europa e nos Estados Unidos e vários benefícios foram observados, como a redução no congestionamento; a redução na variabilidade das velocidades; a redução no tempo médio de viagem e no tempo médio de atraso dos veículos; a melhora na segurança; entre outros. O uso deste sistema é promissor também no Brasil, mas na maioria dos estudos, verifica-se que não há cultura em investir nestas estratégias e que os planos semafóricos utilizados, em sua maioria, não tratam, em tempo real, as oscilações, comumente observadas, nas demandas de tráfego dos grande centros urbanos.

Diante desta falta de suporte, as soluções de gerenciamento de tráfego ativo são frequentemente avaliadas a partir de simulações. Ao modelar uma rodovia, a partir de um simulador, é possível fazer testes e analisar os impactos de estratégias sem demandar novas construções ou investimentos onerosos. De acordo com ??), a simulação acompanhada do emprego intensivo de técnicas computacionais auxilia a atuação de engenheiros de tráfego, proporcionando maior eficiência, segurança e agilidade na tomada de decisão estratégica de controle. Neste contexto, estratégias de programação semafórica eficientes deixam o fluxo de veículos mais estável, minimizando congestionamentos, atrasos e, conseqüentemente, maximizando a utilização da infraestrutura viária existente, evitando a construção de novas obras viárias que são, na maioria dos casos, pesadas e onerosas.

1.2 Abordagem Proposta

Esta tese propõe um novo modelo de controle semafórico denominado CAPSI, baseado em otimização a partir de técnicas de IC. O CAPSI associa o uso dessas técnicas para determinar, em tempo real, a configuração dos parâmetros semafóricos que minimizem o atraso médio dos veículos nas redes de interseções de duas regiões de estudo da cidade de Belo Horizonte, de acordo com a demanda real de tráfego obtida a cada intervalo de tempo de ciclo de semáforo.

Como as soluções de tráfego são, normalmente, analisadas a partir de modelos de simulação de tráfego, é necessário calibrar o simulador antes de utilizá-lo nos experimentos do modelo CAPSI. A calibração do simulador é importante que ele possa reproduzir, o mais próximo possível, a condição real da rede de tráfego a ser analisada. Assim, as decisões estratégicas de controle de tráfego nas regiões em estudo, baseadas na análise deste modelo de simulação, são baseadas em informações reais e poderão ser aplicadas na prática com maior precisão e eficiência.

Neste trabalho é utilizado o modelo de simulação de tráfego denominado AIMSUN. Este simulador é um pacote de simulação de tráfego rodoviário microscópico, contínuo e altamente configurável, capaz de reproduzir diversos cenários reais de tráfego, e é amplamente usado na elaboração de estudos e desenvolvimento de projetos em Engenharia de Transportes.

Como ainda não é possível realizar, diretamente, nas regiões escolhidas para estudo de caso, a realimentação do modelo CAPSI com dados reais de demanda de tráfego obtidos a partir de sensores instalados nas interseções, a cada intervalo de tempo, os algoritmos utilizam como parâmetros de entrada, os dados obtidos pela simulação do tráfego a partir do *software* AIMSUN.

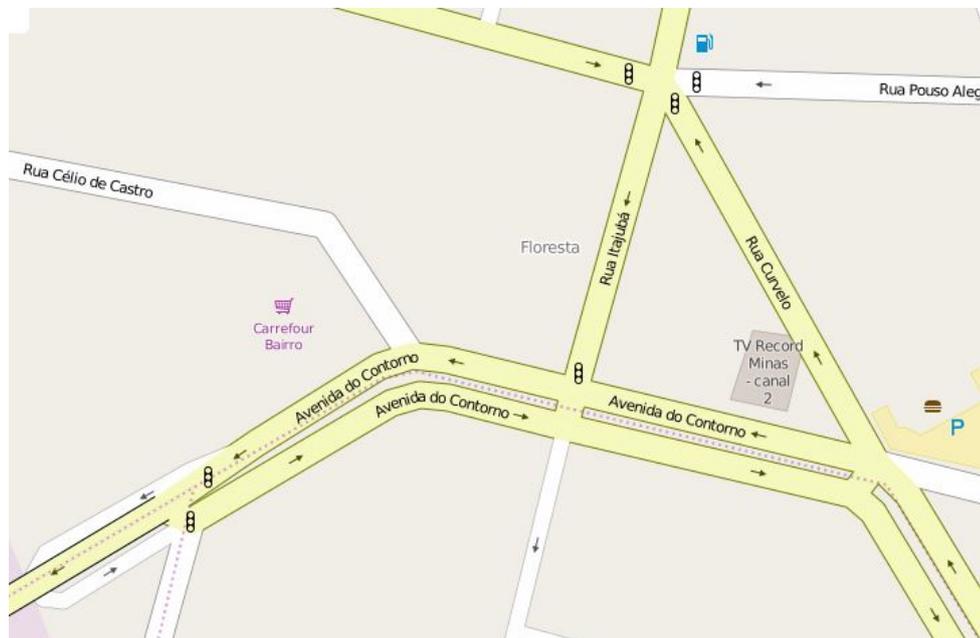
Assim, inicialmente, a partir do uso de um AG, é feita a calibração do AIMSUN. Logo após, o modelo CAPSI, foco principal deste trabalho, é implementado, a partir do seguinte fluxo: (i) o AIMSUN recebe dados de demanda dos veículos das interseções a cada tempo de ciclo; (ii) estes dados são entrada para o modelo, em que o (iii) o tempo de atraso dos veículos é estimado a partir da aplicação de técnicas de IC que (iv) retorna para o simulador a configuração de parâmetros otimizada que minimize esse tempo de atraso. Para o cálculo deste tempo de atraso, é realizado um experimento adicional para definir a função de atraso, dentre as mais utilizada na literatura pelos seguintes autores: (??); (??); (??) e (??), que apresenta uma melhor estimativa para esta medida de desempenho e que será utilizada como base na construção do modelo CAPSI.

Dados reais de tráfego da região do bairro Floresta (em Belo Horizonte/Brazil) foram disponibilizados pela BHTrans, como pode ser visto na [Figura 1](#). Estes dados foram utilizados

como entrada no simulador AIMSUN no experimento principal deste trabalho, para validação da eficiência do modelo CAPSI. Além dessa região, as interseções da região da Savassi (Figura 2), também em Belo Horizonte, foram utilizadas em um experimento adicional neste trabalho, com o objetivo de mostrar a capacidade de generalização e adaptação do modelo proposto no controle semafórico de diferentes regiões. Estas regiões foram escolhidas por serem áreas onde o congestionamento de tráfego é intenso, devido a grande quantidade de comércio e pessoas circulando nos locais.

Por fim, os resultados experimentais obtidos nas regiões de estudo são estatisticamente analisados, a fim de decidir se o modelo é eficiente na otimização dos parâmetros do controle ativo da temporização semafórica das interseções.

Figura 1 – Região 1 - Bairro Floresta.



Fonte: *OpenStreetMap*

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

O objetivo geral desta tese é propor o modelo matemático e computacional de Controle Ativo dos Parâmetros Semafóricos de Interseções (CAPSI) que otimize, a partir do uso de técnicas de IC, como os algoritmos evolucionários, os principais parâmetros de controle dos semáforos: (i) tempo de verde, (ii) tempo de ciclo, (iii) defasagem e (iv) sequência de fases, de forma automática, simultânea e em tempo real, ou seja, de acordo com as condições de momento das vias. E, assim, esse modelo deve determinar a configuração destes parâmetros que minimiza o tempo de atraso dos veículos nas interseções das

Figura 2 – Região 2 - Savassi.



Fonte: *OpenStreetMap*

regiões em estudo. Ademais, o modelo deve ser independente de simulação para avaliar as soluções, genérico e escalável, o que torna mais rápido o processo de busca dos algoritmos e aumenta a capacidade prática do modelo, facilitando sua adaptação para o mundo real. O modelo proposto é então aplicado no gerenciamento do tráfego em duas regiões de Belo Horizonte, como estudo de caso usado para sua validação prática.

1.3.2 Objetivos Específicos

Para este trabalho, têm-se os seguintes objetivos específicos:

- Estender as modelagens de configuração semafórica apresentadas por **??**, **??**), para um modelo de controle ativo, com a aplicação do CAPSI associado ao uso de técnicas de IC, que otimizem os principais parâmetros de controle semafórico, em tempo real.
- Realizar experimentos com as funções de atraso mais utilizadas na literatura, afim de determinar a que melhor estima o indicador “atraso” e, portanto, a função que é utilizada como base para a construção do modelo CAPSI.
- Após a definição da função de atraso, estender essa função, definindo o modelo de atraso CAPSI, que otimize, a partir do uso de técnicas de IC, os seguintes parâmetros semafóricos: (i) tempo de verde, (ii) tempo de ciclo, (iii) defasagem e (iv) sequência de fases.
- Implementar o modelo de forma independente de simulação para avaliar as soluções

- dos algoritmos evolucionários, possibilitando maior capacidade prática para o modelo;
- Realizar experimentos com a execução dos algoritmos AG e DE como soluções testes de IC para resolver o modelo CAPSI nas instâncias utilizadas (nas interseções das regiões em estudo) com o objetivo de minimizar o tempo médio de atraso dos veículos nessas interseções;
 - Analisar os experimentos realizados para o problema de otimização por meio de técnicas de inferência estatística;
 - Validar a modelagem e as técnicas propostas com a execução de experimentos no simulador AIMSUN;
 - Apresentar os resultados obtidos com a tese, as contribuições esperadas e discorrer sobre os possíveis próximos passos de pesquisa e trabalhos futuros.
 - Contribuir com o meio acadêmico e científico a partir de publicações dos resultados gerados por essa tese em anais de congressos e revistas bem qualificadas na área de estudo.

1.4 Justificativa

O desenvolvimento econômico de países em desenvolvimento como o Brasil está associado com o crescimento de sua malha rodoviária e a eficiência no gerenciamento do tráfego. O aumento no número de veículos circulando nos centros urbanos fomenta a necessidade de encontrar estratégias de controle eficientes para gerenciar os movimentos conflitantes nas interseções, diminuindo congestionamentos, alto consumo de combustível, impactos ambientais e melhorando a qualidade de vida da população.

Diante disso, a realização deste trabalho se justifica pela importância de estabelecer estratégias para melhorar a mobilidade urbana, associando-as ao uso de técnicas de IC, como os algoritmos evolucionários por exemplo, para diminuir as consequências causadas pelo intenso tráfego de veículos nos centros urbanos, e, conseqüentemente, maximar o uso da infraestrutura existente, deixar as cidades mais sustentáveis e humanas utilizando a tecnologia, sem precisar aumentar a infraestrutura e realizar grandes obras, comumente onerosas. Além disso, é necessário suprir algumas limitações apresentadas na literatura, com o uso de um modelo de controle ativo de tráfego eficiente, que otimize os principais parâmetros de controle dos semáforos e que seja independente de simulação, genérico e escalável, tornando o processo de convergência dos algoritmos mais rápido e de fácil adaptação para o mundo real.

1.5 Metodologia

A pesquisa realizada neste trabalho objetiva gerar conhecimentos práticos para solução de problemas reais, portanto, pode ser classificada, em relação a sua natureza, como sendo do tipo pesquisa aplicada. O trabalho é classificado, também, como quantitativo, ou seja, é possível traduzir para números as informações do modelo proposto para classificá-las e analisá-las.

Neste trabalho, primeiramente, são realizados experimentos com o modelo CAPSI a partir do uso de técnicas de IC. Logo após, são usadas técnicas de inferência estatística para analisar as soluções. Em seguida, os resultados são apresentados e discutidos.

Para alcançar os objetivos propostos, são apresentadas abaixo, as etapas metodológicas deste trabalho:

1. **Revisão da Literatura:** tem o objetivo de discorrer sobre os principais trabalhos da literatura que utilizam técnicas de IC para resolver problemas de controle de tráfego a fim de formar a base teórica que sustenta o desenvolvimento deste trabalho e mostrar, também, as contribuições científicas e as limitações encontradas na literatura;
2. **Fundamentação Teórica:** conceituar os principais componentes e parâmetros do controle semaforico e apresentar as definições e características das técnicas de IC utilizadas neste trabalho;
3. **Modelagem do Problema:** apresentar o novo modelo de controle ativo da sinalização semaforica denominado CAPSI proposto por esta tese, a função objetivo utilizada, as variáveis de decisão, como é feito o tratamento de restrições e as representações computacionais adotadas;
4. **Resultados Experimentais:** utilizar os dados de tráfego das regiões de Belo Horizonte escolhidas para realização dos experimentos, realizar o tratamento destes dados e modelar as redes de interseções dessas regiões no simulador AIMSUN. Logo após, calibrar os parâmetros comportamentais e dos veículos das redes desenhadas no simulador, com intuito de aproximar os experimentos das condições reais das regiões em estudo. Finalmente, realizar experimentos com a execução do modelo CAPSI e dos algoritmos de otimização e apresentar os resultados obtidos, bem como a análise objetiva e discussão destes resultados a partir da aplicação de técnicas de inferência estatística.

1.5.1 Hipóteses

Os objetivos apresentados classificam a pesquisa como exploratória, pois visa investigar o problema com o objetivo de torná-lo explícito ou construir hipóteses (??). Neste contexto, pretende-se contribuir para a construção das hipóteses:

1. A aplicação de técnicas de Inteligência Computacional no processo de otimização do controle ativo do plano de semafórico de interseções é promissora e pode proporcionar uma gestão de tráfego mais eficiente que minimize as consequências causadas pelos congestionamentos;
2. O modelo CAPSI, associado ao uso de algoritmos evolucionários, pode ser aplicado em estudos de casos reais em que seja possível se estabelecer, a partir da execução de experimentos, a validação prática do modelo e comprovar sua eficiência na otimização dos principais parâmetros do controle semafórico.

Assim, com a execução dos passos apresentados acima e validação das hipóteses é possível desenvolver essa pesquisa e alcançar os objetivos propostos.

1.6 Organização da Tese

Esta tese é dividida em 6 capítulos, objetivando alcançar os objetivos propostos e corroborar as hipóteses de pesquisa. Neste capítulo foi apresentada a introdução do trabalho mostrando um panorama geral das atuais condições do sistema de mobilidade urbana do Brasil, os principais desafios e estratégias. Neste capítulo foram percorridos, também, os tópicos: caracterização do problema, contextualização, objetivos, justificativa, metodologia e esta seção descrevendo como a tese está organizada.

O [Capítulo 2](#) apresenta os trabalhos relacionados ao tema proposto, que servem de base teórica para o desenvolvimento da tese.

O [Capítulo 3](#) discorre, sobre os elementos básicos da sinalização semafórica, os tipos de controle e medidas de desempenho. São apresentados, também, os conceitos de otimização e as técnicas de IC utilizadas.

O modelo CAPSI, proposto neste trabalho, é apresentado detalhadamente no [Capítulo 4](#). São apresentadas, também, a função objetivo, as variáveis de decisão, as restrições e a representação computacional adotada nas técnicas de IC.

O [Capítulo 5](#) descreve os experimentos realizados e discorre sobre os resultados obtidos.

Por fim, o [Capítulo 6](#) mostra as conclusões e contribuições da tese, os principais resultados e possibilidades de pesquisas futuras.

Capítulo 2

Trabalhos Relacionados

Nos últimos anos, vários estudos foram realizados para melhorar as condições de mobilidade urbana, já que os sistemas precursores de controle têm falhado em encontrar soluções dado o aumento da demanda de veículos nos centros urbanos. Muitos desses estudos utilizam técnicas de inteligência computacional para otimizar o controle de tráfego e encontrar estratégias mais seguras, eficazes e, em contrapartida, menos onerosas. Dentre esses trabalhos, alguns são destacados, nesta tese, por sua relevância e modo com que o problema foi abordado.

Assim, este capítulo apresenta o estado da arte sobre sistemas inteligentes para o controle de tráfego, que sustenta o desenvolvimento deste trabalho e as principais contribuições e limitações encontradas na literatura, a fim de demonstrar a relevância desse tema no meio científico, socioeconômico e para o meio ambiente.

Este capítulo está dividido em duas sessões: na primeira sessão são apresentados os trabalhos realizados em calibração de modelos de simulação de tráfego e a segunda sessão é dividida em subseções que apresentam os trabalhos mais relevante que utilizaram diferentes técnicas de IC na otimização do controle de tráfego.

2.1 Calibração do Modelo de Simulação de Tráfego

Os modelos de simulação de tráfego são usados para analisar o desempenho dos sistemas de transporte e incluem uma gama de parâmetros que deve ser calibrados antes que o modelo possa ser usado, afirma ??). No processo de calibração, o desempenho dos veículos e os parâmetros de comportamento dos motoristas precisam ser ajustados para que as saídas do modelo sejam semelhantes aos dados observados.

Portanto, a calibração do modelo de simulação é importante para reproduzir, o mais próximo possível, a condição real da rede de tráfego a ser analisada. Assim, as decisões estratégicas

para o controle de tráfego, a partir da análise desse modelo, serão baseadas em informações reais e poderão ser aplicadas na prática com maior precisão e eficiência.

A otimização do desempenho dos simuladores de tráfego envolve a seleção do melhor conjunto de valores para os parâmetros do modelo (??). Esse conjunto pode ser obtido usando AGs, com o objetivo de minimizar ou maximizar uma função objetivo. Esse problema é considerado complexo devido ao grande número de parâmetros a serem calibrados e ao fato da medição direta desses parâmetros ser difícil, pois muitos deles representam características sutis que são difíceis de isolar ou porque requerem extensa coleta de dados.

No trabalho de ??) é apresentada uma abordagem de calibração automática para um modelo de simulação microscópica baseado em um AG. Os resultados mostram que o AG identificou os melhores conjuntos de parâmetros para os simuladores TRANSIMS e CORSIM quando comparado com os conjuntos de parâmetros padrão dos simuladores.

??) usam um AG para encontrar o conjunto ideal de parâmetros de controle de tráfego em um modelo de simulação de tráfego denominado GENOSIM . Já ??) apresentam uma metodologia geral e sistemática de três estágios para a calibração de simuladores de tráfego microscópicos. Os resultados sugerem que a técnica de calibração automatizada não se baseia em estimativas de parâmetros iniciais muito boas, o que simplifica a tarefa de calibração e também indica a existência de várias soluções, todas aceitáveis para o estudo em questão.

??) aplicam três métodos heurísticos, incluindo um AG, na calibração de um modelo de simulação da rede do norte da Califórnia. Os resultados encontrados por esse trabalho revelam que alguns parâmetros do modelo afetam os resultados da simulação de forma mais significativa do que outros.

??), usam um AG para determinar valores ótimos para os parâmetros de calibração do simulador CORSIM. No trabalho de ??), um AG também é usado para a calibração e validação de parâmetros de submodelos comportamentais, só que para o simulador TransModeler.

Assim, esses trabalhos fomentam o fato de que é importante considerar o processo de calibração dos parâmetros do modelo de simulação de tráfego antes de utilizá-lo como uma ferramenta para previsão e análise para implementação de estratégias de controle de tráfego.

2.2 Uso de técnicas de IC na Otimização Semafórica

Na literatura, várias técnicas de IC têm sido amplamente utilizadas para a otimização do controle semafórico de interseções. Essa sessão apresenta o estado da arte sobre o tema,

mostrando o desenvolvimento que foi feito neste campo utilizando diferentes técnicas de IC, especialmente o algoritmo genético, técnica utilizada neste trabalho.

2.2.1 Algoritmo Genético - AG

Muitos autores têm formulado modelos para auxiliar no planejamento e gestão dos sistemas de transporte. Neste contexto, os algoritmos genéticos têm sido amplamente utilizados em sistemas de controle do tráfego para otimizar os tempos de viagem (??), para reduzir o tamanho das filas (??) e o tempo de atraso dos veículos (??), (??) e (??) e maximizar a capacidade da rede (??), dentre outros objetivos. .

??) utilizaram o AG para produzir estratégias de otimização da temporização semafórica. O foco do trabalho foi mostrar a utilização de um AG aplicado a uma pequena região. O problema abordado envolvia encontrar uma estratégia de controle de semáforos que produzisse o fluxo menos poluente com a menor média de atraso dos veículos. O algoritmo foi aplicado para comprovar o ganho da técnica em uma região simulada de tráfego com quatro interseções. Os autores concluíram, por meio dos resultados, que o AG potencialmente melhora as técnicas existentes. Foi um importante trabalho, pois foi uma das primeiras pesquisas na área utilizando algoritmos genéticos.

No trabalho de ??), os autores propõem o uso do AG para encontrar a sequência de fases para cada junção e a transformam para estágios, pois o *software* utilizado para medida de aptidão (*fitness*), denominado TRANSYT, é baseado em estágios. A medida de aptidão utilizada é o índice de performance (PI) que o TRANSYT calcula pela soma ponderada do atraso de todos os veículos e paradas. Após a execução do experimento, os autores relatam que com o aumento da taxa de mutação (parâmetro utilizado no processo de evolução do AG) o valor de PI varia mais e que o aumento da população (soluções candidatas) do AG melhora a solução, ou seja, maximiza o valor de PI. Uma limitação daquele trabalho é o fato de que a utilização do simulador para avaliar as soluções pode deixar o processo de otimização lento e totalmente dependente da simulação.

??) desenvolveram um método baseado em AG para identificar tamanhos de ciclo, tempos de verde e sequências de fase. Já o trabalho de ??) utilizaram como pesquisa uma pequena região urbana, com nove interseções sinalizadas na cidade de Chicago. Os autores realizam a otimização dos tempos de viagem por meio do TRANSYT-7F (T7F) e comparam os resultados com um AG. Os critérios para medição da eficiência são os atrasos no trecho da ligação e o tamanho das filas na rede. Para simulação de tráfego, juntamente com o AG, os autores usam o CORSIM, que é um modelo de simulação microscópica aplicado a corredores de tráfego. O AG gera os dados de entrada para esse modelo, que realiza a simulação e retorna o resultado para avaliação do algoritmo. Assim como no trabalho de ??), um problema desta abordagem de avaliação das soluções por meio da simulação

é que esse processo atrasa a convergência do algoritmo e, conseqüentemente, provoca lentidão na obtenção dos resultados.

No trabalho de ??), os dados de tráfego são resultados da simulação e servem de entrada para o AG, cujos objetivos são: minimizar o tempo perdido e maximizar a velocidade média dos veículos. Os operadores genéticos padrão e o método de seleção por *ranking* foram utilizados no AG naquele trabalho, obtendo-se bons resultados. Foi observado, que os autores também utilizam o simulador como função de aptidão, o que torna lenta a convergência do algoritmo.

??) apresentam uma estratégia de controle semafórico em tempo real baseada em AG para promover bom desempenho em uma interseção. O sistema inteligente desenvolvido faz decisões em tempo real para modificar tempos de verde para um conjunto de semáforos. Os autores também desenvolveram um emulador para representação de condições de tráfego em uma interseção isolada. O emulador envia os dados de tráfego para o algoritmo, que, em seguida, retorna a configuração de tempos de verde de semáforos que minimiza um índice de performance escolhido como função de aptidão. No final, o modelo de controle em tempo real proposto pelos autores foi comparado a um modelo de controle fixo de tráfego e foi constatado que o modelo em tempo real é mais eficiente.

??) utilizam o AG para otimizar tempos de verde de uma interseção. Inicialmente, o algoritmo recebe como entrada o tamanho da fila de veículos. Após a execução do algoritmo, houve redução no tamanho da fila, porém o impacto causado pelo fluxo de carros entrando na via foi bastante relevante durante o tempo de vermelho e o tempo de paradas, causando um aumento no tamanho da fila. Assim, o fluxo de carros entrando na via teve que ser considerado na modelagem do problema. Os autores observaram que, ao incluir este parâmetro, o resultado foi melhor, ou seja, mais veículos passaram na interseção e, conseqüentemente, o tamanho da fila foi reduzido. Assim como no trabalho de ??) e ??), uma limitação desta abordagem é que os experimentos foram realizados em uma única interseção, não é possível definir se o resultado também seria satisfatório se os experimentos fossem realizados em uma rede de interseções.

Em ??), foi utilizado um AG para otimizar a defasagem, o tempo de ciclo, o tempo de verde e a sequência de fases com objetivo de minimizar o atraso dos veículos. Naquele trabalho, foi utilizada simulação para avaliar as soluções do AG e os autores comparam a performance deste algoritmo com um plano de controle fixo em uma interseção isolada e constataram que o algoritmo evolucionário teve uma performance melhor.

??) usam um AG para otimizar os tempos de verde e entreverdes dos semáforos de uma interseção isolada. O algoritmo alimenta o modelo de simulação com as definições ótimas de tempos de verde e entreverdes de semáforos, ou seja, as configurações de

semáforos com o atraso mínimo no cruzamento. O plano semafórico é determinado em cada intervalo de simulação de acordo com a demanda no último intervalo. Os autores utilizaram o simulador AIMSUN para criar a interseção. O modelo de simulação de tráfego calcula uma medida de eficácia, a fim de medir o desempenho cruzamento. Assim pode-se observar que a simulação é utilizada como medida de desempenho. Conforme visto nos trabalhos anteriores, isso torna o processo de otimização difícil de se adaptar para o mundo real e de convergência lenta.

2.2.2 Abordagem Multiobjetivo

Os AGs também são amplamente aceitos pelos pesquisadores como um método para resolver problemas de otimização multiobjetivo ou ao menos para listar uma Fronteira Pareto aproximada de alta qualidade para um MOP (*multi-objective optimization problem*).

Segundo ??), muitos pesquisadores voltaram a atenção para a resolução de problemas de controle de tráfego considerando múltiplos objetivos usando AGs nos últimos anos, devido aos processos de tomada de decisão no mundo real possuírem várias preocupações sociais e, portanto, vários objetivos devem ser atingidos simultaneamente. Na maioria dos casos, estas funções objetivo são conflitantes e também não são simples o suficiente para serem combinadas em uma única função. Os trabalhos de ??), ??), ??), ??) utilizam a abordagem multiobjetivo para solucionar problemas de controle de tráfego, considerando diferentes objetivos.

??) investigaram a aplicação do algoritmo *Nondominated Sorting Genetic Algorithm* (NSGA) em um problema de otimização semafórica. Os autores desenharam três problemas teóricos para realizar os experimentos, cujo cenário é uma interseção isolada de duas fases com conversão à esquerda. O algoritmo utilizado tinha como objetivo minimizar o atraso médio e o número médio de paradas. Para tanto, os autores utilizaram o tempo verde efetivo para cada fase do semáforo como variável de decisão e concluíram que o AG multiobjetivo teria potencial para ser utilizado nesse tipo de problema. Entretanto, pode ser visto que, como o experimento foi realizado em uma única interseção, não é possível definir se o mesmo seria eficiente em uma rede de interseções e corredores (situação do mundo real).

??) propõem um método de otimização bi-nível aplicado para o problema de minimizar a emissão de monóxido de carbono (CO) e minimizar os tempos de viagens dos veículos em redes rodoviárias. A fronteira de soluções não-dominadas dos dois objetivos é identificada, que consiste em todas as combinações de tempos totais de viagens e dos totais de emissões de CO. Os autores fornecem métodos para computar os encargos de emissões de uma forma que permite aos tomadores de decisão escolher entre os dois objetivos conflitantes. No trabalho, os autores utilizam redes rodoviárias onde as demandas de viagem entre diferentes pares origem-destino (OD) são fixas, ou seja, não há um processo

de realimentação com dados reais da via a cada período de tempo.

??) implementaram o NSGA2 para otimização de um modelo multiobjetivo de controle semafórico de tempo fixo em interseções isoladas não saturadas. Os autores propuseram um modelo em que as variáveis otimizadas seriam o tamanho do ciclo e os tempos de verde dos semáforos. Para tanto, o modelo foi definido com três funções objetivo: atraso médio dos veículos, número médio de paradas e tamanho relativo máximo da fila de veículos. O método multiobjetivo conseguiu diminuir o atraso médio dos veículos e o comprimento da fila em um único cruzamento (interseção isolada).

??) utilizam duas microrregiões de Belo Horizonte para simulação do controle fixo de tráfego e tem como objetivo maximizar a velocidade média dos veículos e minimizar a variância da velocidade média entre eles. Para isto, os autores implementam o algoritmo evolucionário NSGA2 e o algoritmo MBVL-NSGA2 (*Memory-Based Variable-Length Encoding Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm 2*), que associa ao uso do NSGA2 um mecanismo de memória para eliminar a reavaliação de soluções, utilizando uma *Hash Table* para armazenar todas as soluções já visitadas durante a execução e um mecanismo de vizinhança adaptativa controlando a densidade da amostragem de novas soluções.

O trabalho de ??) é uma extensão de ??), esse apresenta a integração do *software* TL-GISSIM, que é responsável pela geração de temporização semafórica, com o algoritmo inspirado em sistemas imunológicos artificiais, especificamente o princípio da seleção, denominado algoritmo de seleção clonal (CLONALG). Em ambos os trabalhos, o controle de tráfego é de tempo fixo, ou seja não há realimentação do sistema com dados reais das interseções e a simulação é utilizada como função de aptidão. Isso é uma limitação destas abordagens, já que torna o processo de convergência lento, dependente de simulação e de difícil adaptação para o mundo real. Esta tese é uma extensão dos trabalhos de ??) e ??), objetivando suprir as limitações encontradas pelos autores.

No trabalho de ??), os autores propuseram um modelo multiobjetivo para dois níveis. Para o nível superior ou nível de decisão política de tráfego são consideradas três funções objetivo que representam a sustentabilidade econômica, ambiental e de saúde, enquanto o nível mais baixo ou nível de usuário considera dois objetivos: o custo do tempo de viagem e o custo do pedágio. O algoritmo NSGA2 lida com o problema de nível superior, enquanto o problema de nível inferior é resolvido pelo método *quasi-Newton*. Os algoritmos procedem de uma distribuição aleatória de vetores objetivos para um fronteira de soluções não-dominadas aproximada contendo um conjunto de soluções que serão escolhidas pelo tomador de decisão de acordo com a necessidade. Os autores concluíram que os resultados obtidos, a partir da execução dos algoritmos para um região simulada, mostram a natureza conflituosa dos objetivos, e demonstram a necessidade de considerar os métodos multiobjetivos para auxiliar na tomada de decisões no contexto do desenvolvimento sustentável de sistemas de

transporte.

No trabalho de ??), é definido uma configuração de tempo de semáforo ótima que minimiza as funções objetivo que calculam as emissões de poluentes dos veículos, o consumo de combustível e o atraso nas interseções. O método combina um modelo de emissão, um simulador de tráfego e um algoritmo genético multiobjetivo para encontrar esta configuração. O modelo foi aplicado em uma interseção isolada e obteve um bom resultado.

2.2.3 Comparação do AG com outras técnicas de IC

Existem diversos trabalhos que comparam o AG com outros métodos de otimização para encontrar a solução mais eficiente para resolver problemas de otimização do controle de tráfego. Em ??), por exemplo, os autores comparam o AG com o método de colônia de formigas para otimização dos horários de uma rota de ônibus. ??) também comparam o desempenho do algoritmo de colônia de formigas com o do AG para calcular o melhor tempo de verde de semáforos para uma rede de trânsito em condições sobressaturadas.

Já o trabalho de ??) apresenta uma comparação entre três algoritmos de otimização usados para calibrar um modelo macroscópico de fluxo de tráfego. Os autores utilizam o algoritmo determinístico *Nelder-Mead*, o algoritmo genético e o método *cross-entropia* (CE) para estimar os parâmetros do modelo para uma rede de autoestrada, utilizando dados reais de tráfego. Os modelos resultantes são validados utilizando conjuntos de dados de tráfego e os algoritmos de otimização são avaliados e comparados no que diz respeito à precisão dos modelos produzidos bem como a velocidade de convergência e o tempo de cálculo necessário.

??) utilizam o método *Simulated Annealing* (SA) para otimizar o tempo de ciclo, as sequências de fases e a defasagem com base nas oportunidades de progressão calculadas pelo simulador TRANSYT-7F. O tempo de verde não foi otimizado pelos autores já que a otimização baseada nessa estratégia não provê critério para a determinação de tempos de verde. Os autores comparam os resultados com um AG e com o *software* TRANSYT-7F e constataram que o SA produz melhores soluções, porém requer mais avaliações e maior tempo de execução já que utiliza a simulação para avaliar as soluções.

2.2.4 Combinação entre o AG e outras técnicas de IC

Há também abordagens que associam o uso de um AG a outras técnicas de IC para otimizar as condições de tráfego da rede. ??) apresenta um método de controle que determina o tempo de verde da fase atual baseado em uma rede neural. A taxa de convergência da rede neural é melhorada usando-se um AG para otimizar o peso e o limiar desta rede.

??) propõem um modelo de controle de tráfego em tempo real acíclico com prioridade

de tráfego. Naquele trabalho, os autores utilizam o AG associado ao algoritmo *Simulated Annealing* para otimizar a sequência e duração das fases com o objetivo de minimizar o atraso dos veículos. Após a execução dos experimentos em uma interseção isolada, os autores concluíram que o modelo proposto supera o de controle fixo, porém observa-se que a sequência de fases não é variável naquele trabalho, pois após definir uma sequência de fases fixa, a duração das fases é a única variável de decisão utilizada pelo autores. Além disso, os autores utilizam simulação para avaliar as soluções das técnicas de IC.

2.2.5 Outras técnicas de IC

Além dos algoritmos evolucionários, outras técnicas de IC também têm sido utilizadas para otimizar o controle de tráfego. Existem sistemas de controle de tráfego que usam sensores para perceber a entrada de veículos e usam lógica *fuzzy* para decidir pela extensão do período de tempo de verde e permitir que mais veículos circulem nas vias (??). ??) apresentam um controlador de tráfego adaptativo baseado em lógica *fuzzy* para fazer ajustes nos tempos de semáforos de uma interseção isolada de acordo com as mudanças do fluxo de chegada dos veículos. Também existem estudos que utilizam comunicação *wireless*, em que os veículos enviam informações para o sistema de controle mais próximo e então o sistema otimiza os tempos dos sinais baseado nestas informações (??).

??) abordam a utilização de um controle *fuzzy* para semáforos de vias urbanas. O problema consiste em uma única interseção com doze movimentos de fluxo possíveis e, dependendo das simulações de tráfego, as regras *fuzzy* decidem ativações de dois, três ou quatro estados para os semáforos. É utilizada uma interseção isolada simples para experimentos. Para inserir outros estados de semáforos além dos três pré-definidos seria necessário alterar e adicionar novas regras, o que demanda tempo e torna o modelo pouco flexível a alterações e de difícil adaptação para o mundo real.

No trabalho de ??), os autores utilizam lógica *fuzzy* para determinar as sequências de fases dos semáforos. Naquele trabalho, os autores desenvolveram um *software* de simulação para realizar os experimentos em uma interseção isolada. Os resultados mostram que o controlador *fuzzy* obteve um melhor desempenho do que o controle pré-programado utilizado para comparação, fornecendo valores menores de atraso.

O trabalho de ??) compara o desempenho da operação com planos de tempo fixo dimensionados pelo simulador TRANSYT versus o controle adaptativo, em tempo real, do sistema SCOOT, avaliando, especificamente nos períodos de pico do tráfego, a magnitude e o grau de variabilidade dos indicadores atraso médio e volume atendido em cada aproximação dos seis cruzamentos integrantes do Sistema Centralizado de Controle do Tráfego de Fortaleza (CTAFOR). Naquele trabalho, os resultados encontrados vieram confirmar conclusões baseadas em simulações computacionais que sugeriram uma crescente superioridade

do controle em tempo real sobre planos fixos à medida em que as demandas de pico aumentam.

O trabalho de ??) propõe uma abordagem de plano de fase dos semáforos para analisar a interpretação das várias características do fluxo de tráfego. Neste trabalho, o Modelo de Misturas de Gaussianas 2-D (GMM) é usado para classificar o fluxo de tráfego dinâmico. Cinco tipos de padrões de fluxo de tráfego são identificados com base em um conjunto de dados de tráfego real dos sistemas rodoviários da cidade de Taiwan. O plano de fases foi aplicado para o conjunto de dados e foi observado que cada padrão de fluxo de tráfego indica uma interpretação diferente de um comportamento especial do tráfego dinâmico.

??) apresentam um controlador, em tempo real, da sequência de fases dos semáforos em rotatórias, baseado em lógica *Fuzzy* e que utiliza o algoritmo de otimização por enxame de partículas (PSO) para otimizar as funções de associação adotadas no controlador proposto. Os experimentos foram realizados para diferentes condições de tráfego em rotatórias e comparados com o um método de controle atuado e variações do controlador *fuzzy* e do PSO. Os resultados deste trabalho mostram a eficácia da utilização do PSO associado ao modelo *fuzzy* na definição das sequências de fases de semáforos que minimizem o tamanho da fila de veículos em espera e o atraso dos veículos nas rotatórias.

??) focaram na estimativa dos planos de fases dos semáforos, do tempo de verde e do tempo ciclo, a partir de dados dos veículos em uma interseção sinalizada e utilizaram o controle de tráfego de tempo fixo. A partir da execução dos experimentos, os resultados comprovam que a estimativa das fases do sinal de tráfego proposta pelo artigo é eficiente e confiável, porém o trabalho apresenta algumas limitações: o controle de tráfego realizado em apenas uma interseção não garante o mesmo comportamento em um rede de interseções (limitação de escalabilidade do problema) e o controle de tempo fixo não representa o dinamismo das redes de tráfegos.

2.3 Tabela Comparativa do Estado da Arte

Com o intuito de facilitar a identificação das contribuições dos principais trabalhos apresentados acima e suas limitações, nesta seção é apresentada a [Tabela 1](#) abaixo. Nesta tabela há um resumo do comparativo entre os trabalhos mais relevantes encontrados nessa revisão da literatura e o modelo CAPSI proposto por esta tese.

São considerados os seguintes parâmetros para cada referência bibliográfica da tabela: tipo e estratégia de controle de tráfego; medida de desempenho ou função de aptidão usada nos experimentos; variáveis de decisão consideradas pelos autores; técnicas de IC que foram utilizadas nos trabalhos e método de avaliação das soluções geradas.

Tabela 1 – Tabela Comparativa do Estado da Arte.

Referência	Controle	Aptidão	Variáveis	IC	Avaliação
??)	real em interseção isolada	atraso	ciclo; tempo de verde; fases e offset	AG	Simulação
??)	ativo em rotatórias	fila e atraso	sequência de fases	Lógica Fuzzy e PSO	-
??)	fixo em interseção isolada	-	fases; ciclo; tempo de verde	-	-
??)	ativo em interseção isolada	atraso	-	AG SA	-
??)	fixo em interseção isolada	atraso; poluentes; combustível	tempo de verde	AG	Simulação
??)	ativo em interseção isolada	atraso	tempo de verde	AG	Simulação
CAPSI	ativo em rede	atraso	tempo de verde; ciclo; fases; offset	AG	Modelo

2.4 Considerações Finais

A partir da revisão da literatura sobre as técnicas de Inteligência Computacional aplicadas ao problema de controle da temporização semafórica, especialmente com o uso de métodos evolucionários, foi possível observar que várias abordagens (com o uso de diferentes métodos) foram propostas para resolução do problema, tanto no estudo em interseções simples ou em rede quanto com o uso de diferentes modelos e medidas de desempenho.

Diante disto, pretende-se com este trabalho, desenvolver o modelo de controle ativo de tráfego que otimize os principais parâmetros do controle semafórico e que seja capaz de suprir algumas limitações enunciadas nas abordagens anteriores. Para tal, esse modelo, denominado CAPSI, é capaz de simular a realimentação em tempo real do sistema de controle em interseções em rede, atendendo ao objetivo de minimizar o tempo de atraso dos veículos nesta rede. Além disto, o CAPSI não depende da simulação para avaliar as soluções do problema, o que é uma vantagem deste trabalho, já que isto é um dos grandes problemas nas abordagens anteriores pois torna o processo de busca lento e de difícil

adaptação e utilização no mundo real.

Capítulo 3

Fundamentação Teórica

Este capítulo discorre sobre os elementos principais da sinalização semafórica utilizados neste projeto: tipos de controle de tráfego, estratégias de controle, parâmetros comportamentais de calibração dos modelos de simulação, medidas de desempenho e as técnicas de cálculo para a determinação dos parâmetros do plano semafórico, conforme o Manual de Semáforos do Departamento Nacional de Trânsito em ??) e o *Highway Capacity Manual* em ??) e ??).

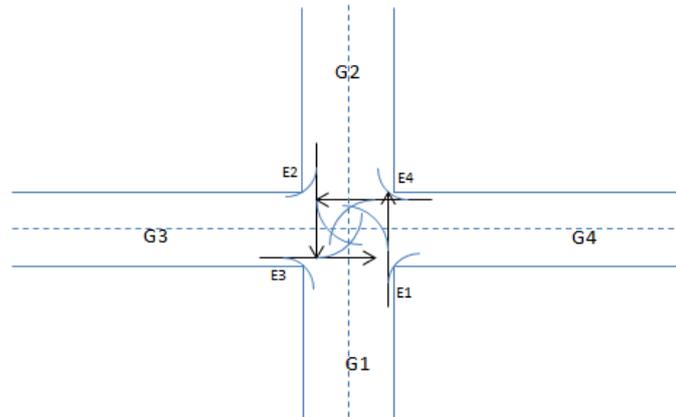
Além disso, nas seções que seguem, são apresentados alguns conceitos de Inteligência Computacional com o foco em computação evolucionária, otimização e os detalhes de implementação e funcionamento dos algoritmos evolucionários utilizados neste trabalho para o tratamento do problema em questão.

3.1 Sinalização Semafórica

A sinalização semafórica é composta de indicações luminosas e tem a finalidade de transmitir diferentes mensagens aos usuários da via pública, regulamentando o direito de passagem ou advertindo sobre situações especiais nas vias. Os elementos básicos que caracterizam a concepção do controle semafórico, segundo ??), ??) e ??), são apresentados a seguir:

- **Interseção:** Áreas em que há um cruzamento ou entroncamento de duas ou mais vias de acesso, como por exemplo a [Figura 3](#), em que é apresentada uma interseção entre duas vias, cujo direito de passagem dos movimentos dos estágios E_1 , E_2 , E_3 e E_4 é controlado pelos grupos semafóricos G_1 , G_2 , G_3 e G_4 .
- **Movimento:** O termo movimento é usado para identificar cada uma das possíveis rotas entre a origem e o destino possíveis de veículos e/ou pedestres, no entorno de uma interseção. Movimentos convergentes são aqueles que possuem origens diferentes e mesmo destino; por outro lado, os movimentos divergentes têm mesma origem e destinos diferentes. Um conjunto de múltiplos movimentos realizados si-

Figura 3 – Interseção entre duas vias.



multaneamente é chamado de grupo de movimentos. Uma interseção pode conter movimentos conflitantes entre si, e, para diminuir os riscos de acidentes entre veículos, criou-se um dispositivo chamado semáforo;

- **Semáforo:** O semáforo é um dispositivo de controle do tráfego que alterna o direito de passagem entre motoristas e/ou pedestres a partir de indicações luminosas em interseções de vias que possuem movimentos conflitantes;
- **Fase:** A sequência de indicação de cores de um semáforo possui intervalos de tempo, em segundos. Essa sequência, aplicada a uma ou mais correntes de tráfego (grupo de movimentos), é denominada fase;
- **Estágio:** Representa o intervalo de tempo em que um ou mais grupos de movimentos recebem o direito de passagem;
- **Ciclo:** O tempo total de uma fase é a soma dos tempos de verde, amarelo e vermelho. Este tempo total é igual para todas as fases e é denominado ciclo (sequência completa de estágios), pois é usado repetidamente para gerar uma sequência de sinalização. A programação semaforizada é feita com um tempo de ciclo único para todas as interseções;
- **Defasagem:** Considerando-se uma corrente de tráfego que passa por dois locais semaforizados pertencentes à mesma rede, denomina-se defasagem o intervalo de tempo decorrido entre o início do verde que essa corrente recebe nos dois locais;
- **Sequência de Fases:** Um sistema de sequência de fases (*phasing system* ou *phase sequence*) determina a sequência dos tempos de verde das fases dos semáforos de uma interseção em que os movimentos não conflitantes vão ter o direito de passagem (??). Para um número n de fases, tem-se $n!$ combinações possíveis de sequências de fases.

A eficiência operacional dos modelos de tráfego pode ser aumentada significativamente utilizando-se um sistema de sequência de fases variável, considerando as possíveis variações no padrão do fluxo de veículos durante o dia, especialmente nas

horas de pico, afirma ??).

O aspecto mais crítico de qualquer projeto de sincronização de sinal é a seleção de um plano de fase apropriado. O plano de fases compreende o número de fases a serem usadas e a sequência na qual elas são implementadas. Como diretriz geral, o controle simples de duas fases deve ser usado, a menos que as condições determinem a necessidade de fases adicionais, pois o intervalo de mudança entre as fases pode contribuir para a perda de tempo no ciclo.

De acordo com ??), o controle de múltiplas fases é adotado em qualquer cruzamento onde uma ou mais curvas para a esquerda ou para a direita exigem faseamento protegido. Geralmente, é o movimento à esquerda que requer uma fase parcialmente ou totalmente protegida. A política e as práticas locais são determinantes críticos dessa necessidade. É de responsabilidade do engenheiro de tráfego reconhecer qual definição de plano de fases deve ser usada em cada situação;

- **Parâmetros Comportamentais e dos Veículos:** Descrevem o padrão de comportamento dos motoristas de determinadas regiões e podem ser considerados na definição de estratégias de tráfego para produzir modelos de controle mais fiéis a realidade da rede de estudo. Os mais importantes são:
 - **Tempo de Reação:** O tempo de percepção e reação é o tempo perdido pelo motorista, composto pelo tempo necessário para a percepção da mudança do semáforo para amarelo e o tempo de reação utilizado até começar a frear;
 - **Velocidade:** Geralmente definida de acordo com o valor proposto pelo Código Nacional de Trânsito;
 - **Desaceleração Máxima:** Padrão de redução de velocidade no deslocamento e em função da sinalização semaforica;
- **Diagrama de intervalos luminosos:** Consiste na representação pelo diagrama da [Figura 4](#) que contém a duração e sequência dos intervalos luminosos, associando-os aos grupos semaforicos correspondentes. Na [Figura 4](#) são apresentados, em segundos, os instantes de tempo de verde, amarelo e vermelho dos grupos semaforicos G_1 e G_2 , a duração de cada intervalo luminoso e o percentual dos intervalos no ciclo;

O bom desempenho do tráfego, em termos de fluidez e segurança, está diretamente relacionado com a regulagem dos semáforos existentes no sistema viário. Segundo ??), regular um semáforo significa:

- determinar o tempo de ciclo ótimo da interseção;
- calcular os tempos de verde necessários para cada fase, em função do ciclo adotado e, adicionalmente a sequência destas fases e
- calcular as defasagens entre os semáforos adjacentes.

Ainda segundo ??), regular um semáforo é desenvolver planos de tráfego que efetuem da

Figura 4 – Diagrama de intervalos luminosos.

Diagrama de Intervalos Luminosos							
INSTANTE(s)	0	30	34	36	74	78	80
G1	[Green]		[Yellow]	[Red]	[Red]		[Red]
G2	[Red]		[Red]	[Green]	[Yellow]	[Red]	[Red]
INTERVALOS	1	2	3	4	5	6	
DURAÇÃO (s)	30	4	2	38	4	2	
% CICLO	38	5	2	48	5	2	
ESTÁGIOS	1			2			

Fonte: ??)

melhor maneira o controle de veículos na interseção, segundo um critério estabelecido, como, por exemplo, reduzir ao mínimo possível o atraso dos veículos. A elaboração desses planos está em estreita dependência com a proposta de estratégia de controle adotada e com o tipo de equipamento (controlador) disponível e/ou utilizado.

3.1.1 Tipos de Controle

O controle do tráfego em uma interseção ou seção de via por meio da sinalização semafórica pode ser realizado de acordo com diferentes tipos e estratégias e ser implementado por diferentes modos. As principais alternativas são:

1. **Tempo Fixo:** O controle em tempo fixo utiliza planos semafóricos calculados com base em dados de tráfego disponíveis, obtidos por contagens volumétricas e outros levantamentos de campo. O controle pode ser efetuado com base em um único plano semafórico, ou na adoção de planos específicos para atender a demanda de tráfego de períodos distintos do dia e de diferentes dias da semana; Ao longo do período de ação de um plano semafórico, o tempo de ciclo, a sequência de estágios, a duração dos intervalos luminosos e a defasagem, no caso das redes semafóricas, são mantidos constantes;
2. **Atuado:** No sistema de controle atuado, os tempos dos semáforos são atualizados conforme o fluxo atual do tráfego. ??) define esse sistema como uma evolução do tempo fixo, porém seus planos continuam sendo pré-calculados e implementados em função do horário e do dia da semana; e
3. **Ativo:** O gerenciamento ativo de tráfego envolve um conjunto de técnicas que tem por objetivo gerenciar dinamicamente congestionamentos recorrentes e não recorrentes com base nas condições de tráfego reais. De acordo com ??) estes sistemas consistem em uma combinação de estratégias operacionais que, quando implantadas em conjunto, ajudam a aperfeiçoar a operação da infraestrutura existente e oferecem

benefícios mensuráveis para a rede de transporte. Neste trabalho, a estratégia de controle ativo visa determinar a temporização semafórica de interseções de acordo com a demanda real de tráfego obtida a cada intervalo de tempo de ciclo. Dentre esses sistemas, pode-se citar o australiano *Sydney Coordinated Adaptive Traffic System* (SCATS) (??), o britânico *Split, Cycle and Offset Optimization Technique* (SCOOT) (??) e o espanhol *Intelligent Traffic Adaptive Control Agent* (ITACA) (??).

3.1.2 Estratégias de Controle

Após definir o tipo de controle semafórico, o projetista deve decidir entre duas estratégias básicas de controle: controle isolado ou controle em rede.

No controle isolado, cada interseção é controlada independentemente das demais, ou seja, não há nenhum tipo de coordenação semafórica. Nesse caso, a definição da programação semafórica leva em conta apenas a demanda do tráfego em todas as aproximações. Essa estratégia pode comprometer o desempenho da circulação do tráfego em situações cujas interseções controladas por sinalização semafórica estiverem muito próximas entre si.

Segundo o ??), o controle em rede pode visar o aumento do desempenho da circulação do tráfego ao longo de uma rede aberta ou de uma rede fechada. O controle em rede aberta visa privilegiar a circulação do tráfego em uma via (ou em um percurso pré-estabelecido) e, por isso, é comumente referido como controle em corredor. O controle em rede fechada, que visa melhorar o desempenho geral do tráfego em uma determinada região, é também denominado de controle em área. A estratégia de controle em rede permite a programação da sinalização semafórica visando não somente o desempenho do tráfego em cada interseção mas, sobretudo, o seu desempenho global ao longo do conjunto de cruzamentos. Esse desempenho é avaliado com base em critérios definidos pelo órgão gestor do trânsito, em função do propósito do sistema de controle.

3.1.3 Medidas de Desempenho

Após a implantação dos planos semafóricos (programação semafórica) ser efetuada, é necessário fazer constantes avaliações para verificar se o desempenho da operação de tráfego está suficientemente bom. Existem várias medidas de desempenho que podem ser empregadas nesta avaliação, como: o número de paradas dos veículos nos semáforos; o tempo de atraso médio dos veículos; o tempo médio de viagem e a velocidade média dos veículos. Nesta tese, a medida utilizada é o atraso médio dos veículos nas interseções da região em estudo.

Essas medidas são apresentadas nas próximas subseções e, vale ressaltar, que elas podem ser determinadas usando simulações de trânsito por meio de programas de computador,

modelos matemáticos, ou ainda, podem ser obtidas diretamente por meio de pesquisas em campo.

3.1.3.1 Número de Paradas

O número de paradas é um dos principais indicadores de qualidade da operação do trânsito, podendo ser caracterizado pelo número total de paradas, número médio de paradas por veículo, ou porcentagem de veículos que param devido à sinalização semafórica. A programação semafórica deve visar a minimização do número de paradas que, além de gerar desconforto ao usuário, aumenta o consumo de combustível e a emissão de determinados poluentes. O número de veículos que sofrem parada por ciclo (n_p), pode ser calculado pela [Equação 1](#):

$$[n_p] = \frac{q \times S}{S - q} \times \frac{C - x}{3600}, \quad (1)$$

em que:

- q é o fluxo (veículos/hora);
- S é o fluxo de saturação (veículos/hora);
- C é o tempo de ciclo (segundos); e
- x é o tempo de verde efetivo (segundos).

3.1.3.2 Atraso Médio

A medida de desempenho “atraso” mede a espera causada aos veículos pela sinalização semafórica. Esse atributo representa a diferença entre o tempo gasto por um veículo para percorrer um trecho sob o controle semafórico e o tempo que gastaria se percorresse o mesmo trecho em regime de fluxo ininterrupto, na velocidade desejada. Este indicador é objeto de estudo principal deste trabalho, por isto é apresentado e discutido em maior profundidade e com maior detalhamento no [Capítulo 4](#).

Segundo [??](#)), o tempo de atraso é a medida mais importante de desempenho em uma interseção sinalizada porque se refere à quantidade de tempo de viagem perdido, ao consumo de combustível e à frustração e desconforto dos condutores. A estimativa precisa do atraso é uma tarefa difícil devido aos fluxos de tráfego aleatórios e a outros fatores incontroláveis.

O atraso pode ser estimado por medições em campo, simulação e modelos analíticos. Na estimativa de atraso nas interseções sinalizadas, vários modelos analíticos foram propostos e desenvolvidos usando diferentes hipóteses para várias condições de tráfego:

- **Modelos de Atraso Estocásticos:** Usam as suposições de que as chegadas são aleatórias e os intervalos de partida são uniformes, mas esses pressupostos são

geralmente irrealistas. São aplicáveis apenas para condições sub saturadas e preveem atrasos infinitos quando os fluxos de chegada se aproximam da capacidade;

- **Modelos de Atraso Determinísticos:** Modelos determinísticos são mais realistas para previsão de atraso para condições super saturadas, mas esses modelos ignoram o efeito da aleatoriedade no fluxo de tráfego e
- **Modelos de Atraso Dependentes do Tempo:** Foram desenvolvidos para fornecer modelos de atrasos mais realistas, superando as limitações dos dois modelos anteriores, combinando-os com uma técnica de transformação de coordenadas.

Existem três modelos diferentes de atraso dependentes do tempo que são comumente usados para estimar atraso em interseções:

1. Modelo Australiano (??) e (??):

$$a_{akcelik} = \frac{D}{q}, \quad (2)$$

em que:

$$D = \frac{qC(1-\lambda)^2}{2(1-y)} + N_0x, \quad (3)$$

e:

$$N_0 = \begin{cases} \frac{cT}{4} \left((x-1) + \sqrt{(x-1)^2 + \frac{12(x-x_0)}{cT}} \right), & x > x_0 \\ 0, & x \leq x_0. \end{cases} \quad (4)$$

2. Modelo Canadense (??):

$$a_{canadense} = \frac{C(1-\lambda)^2}{2(1-\lambda x)} + 900T \left[(x-1) + \sqrt{(x-1)^2 + \frac{4x}{cT}} \right], \quad (5)$$

3. Modelo da publicação estadunidense - Highway Capacity Manual (??):

$$a_{HCM} = \left(\frac{0.5C(1 - \frac{g^2}{C})}{1 - [\min(1, x) \frac{g}{C}] } \right) PF + 900T \left[(x-1) + \sqrt{(x-1)^2 + \frac{8klx}{cT}} \right] + \frac{1800Q_b(1+u)t}{cT}, \quad (6)$$

em que:

- $a_{akcelik}$ é a estimativa de tempo atraso médio por veículos em segundos proposta por ?? e ??;
- $a_{canadense}$ é a estimativa proposta por ??;
- a_{HCM} é modelo proposto pelo ??;
- D é o atraso total;
- N_0 é a fila de transbordamento média de veículos;
- C é o tempo de ciclo em segundos;
- λ é a proporção do tempo de verde;

- y é a taxa do fluxo de veículos por fluxo de saturação (q/S);
- x é o grau de saturação;
- c é a capacidade;
- x_0 é o grau de saturação abaixo do qual o segundo termo de atraso é zero;
- g é o tempo de verde efetivo;
- T é o período de análise;
- k é o fator de atraso incremental que depende das configurações de controle e l é o fator de ajuste de medição (valores estimados de k e l para determinados graus de saturação podem ser encontrados em ??);
- Q_b é a fila inicial no início do período T ;
- t é a duração da demanda não atendida em T ; e
- u é o parâmetro de atraso, também definido em ??).

Para o modelo proposto pelo ??), o valor de PF (fator de ajuste da progressão do atraso uniforme) é dado por:

$$PF = \frac{(1 - P)fPA}{1 - \frac{g}{C}}, \quad (7)$$

em que:

- P é a proporção de veículos chegando no tempo de verde; e
- f_{PA} é o fator de ajuste suplementar para o pelotão que chega durante o tempo de verde (este valor é determinado a partir do tipo de chegada dos veículos e da proporção de verde e pode ser obtido em ??).

Existe um parâmetro de atraso k nesses modelos que é fixo, mas este parâmetro não leva em conta os efeitos das demandas variáveis de tráfego e do tempo variável dos períodos de análise. Assim, o parâmetro k pode ser estimado em função do grau de saturação do período de tempo de análise, conforme indicado em ??).

3.1.3.3 Tempo Médio de Viagem

O tempo médio de viagem é uma medida utilizada para calcular o tempo de percurso para cada veículo (do ponto de entrada ao ponto de saída da rede). Depois calcula-se o tempo médio de viagem dos veículos na rede (t_m) em segundos, pela [Equação 8](#):

$$t_m = \frac{\sum_{i=1}^n tv_i}{n}, \quad (8)$$

em que:

- tv_i é o tempo de viagem do veículo i (segundos); e
- n é o número de veículos.

3.1.3.4 Velocidade Média

A velocidade média é uma medida que pode ser obtida a partir de medições em campo e de simuladores de tráfego. Primeiramente, deve-se medir a velocidade média por veículo. Depois, deve-se obter a velocidade média dos veículos na rede (v_m) em metros/segundo. Esse cálculo é expresso na [Equação 9](#):

$$v_m = \frac{\sum_{i=1}^n vm_i}{n}, \quad (9)$$

em que:

- vm_i é a velocidade média do veículo i (metros/segundo); e
- n é o número de veículos.

3.1.4 Cálculo do Plano Semafórico

Segundo [??](#)) e [??](#)), as equações para o cálculo dos parâmetros de um plano semafórico são:

3.1.4.1 Capacidade

Denomina-se capacidade de um grupo de movimentos ao número máximo de veículos que pode passar em uma aproximação controlada por sinalização semafórica durante uma hora. A capacidade c é definida pela [Equação 10](#):

$$[c] = S \times \frac{x}{C}, \quad (10)$$

sendo:

$$x = xn + t_a - l, \quad (11)$$

em que:

- S : fluxo de saturação;
- x : tempo de verde efetivo;
- C : tempo de ciclo (segundos);
- xn : tempo de verde normal (segundos);
- t_a : tempo de amarelo (segundos); e
- l : tempo perdido no início do verde e no final do amarelo (segundos).

3.1.4.2 Fluxo de Saturação

É o fluxo que seria obtido se houvesse uma fila de veículos na aproximação e a ela fossem dados 100% de tempo de verde do cruzamento (escoamento ininterrupto). O fluxo de saturação é expresso em unidade de veículos/hora de tempo verde ($vec./htv$). Em

aproximações padronizadas esse fluxo pode ser estimado a partir da [Equação 12](#), obtida pelo método de Webster em (??):

$$S = 525 * L, \quad (12)$$

em que:

- S : fluxo de saturação em veículos por hora de tempo verde; e
- L : largura da aproximação (metros).

O fluxo de saturação é afetado pelas condições da via, do tráfego e do ambiente. Em relação às condições da via, os fatores mais importantes são a topografia, geometria, o número e a largura das faixas, e o estado do pavimento. Em função dessas condições, seu valor em geral varia entre 1600 e 2000 unidades de carro de passeio por hora por faixa (DENATRAN, 2014).

3.1.4.3 Grau de Saturação

É a relação entre a demanda de tráfego e a capacidade de atendimento de uma aproximação, representada na [Equação 13](#):

$$g_i = \frac{q_i}{c_i}, \quad (13)$$

em que:

- g_i : grau de saturação da aproximação i ; e
- q_i : demanda (fluxo horário) da aproximação i (Veq/h).

Substituindo o termo c_i definido na [Equação 10](#), tem-se a [Equação 14](#) resultante.

$$g_i = \frac{q_i}{S_i \times \frac{x}{C}}. \quad (14)$$

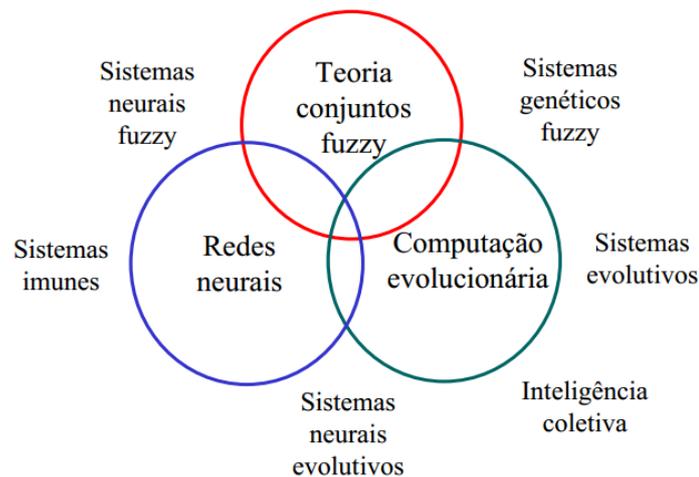
O grau de saturação é um coeficiente que indica, para as condições existentes (reais) de operação do cruzamento, o quanto a demanda está próxima da capacidade horária de escoamento de veículos. Alterando-se a proporção de verde dedicado à aproximação, o grau de saturação se modificará. Nesse sentido, ele é uma medida relativa da taxa de ocupação (??).

3.2 Inteligência Computacional

Segundo ??), a Inteligência Computacional (IC) aplicada é um sistema de métodos e infraestrutura que tem o propósito de melhorar a inteligência humana, aprendendo e descobrindo novos padrões, relações e estruturas em ambientes dinâmicos complexos, para

resolver problemas práticos. Em contraste com a Inteligência Artificial (IA) aplicada, que era simbolizada pela tentativa de inserir o conhecimento do especialista em programas de computador (*expert in the box*), a IC aplicada pode ser vista como uma tentativa de colaboração efetiva entre humano e computador com o objetivo de aumentar a inteligência natural biológica. A [Figura 5](#) apresenta um panorama da Inteligência Computacional com suas principais técnicas:

Figura 5 – Subconjunto e interrelação entre técnicas da Inteligência Computacional.



Inteligência Computacional

Fonte: ??)

Segundo ??), os sistemas de inteligência computacional possuem as seguintes características principais:

- Adaptação: aprendizado de máquina com o uso das Redes Neurais Artificiais (RNA) e teoria do aprendizado estatístico.
- Raciocínio aproximado: na presença de incertezas inerentes ao comportamento humano, com o uso do raciocínio probabilístico e lógica *fuzzy*.
- Capacidade de busca automática e refinamento de soluções para problemas numéricos: otimização heurística, computação evolucionária e inteligência de enxame, entre outras técnicas.

Dentre as técnicas de IC apresentadas, destaca-se a computação evolucionária que tem sido amplamente utilizada nos últimos anos para tratar problemas de otimização do controle semafórico e que é objeto de estudo neste trabalho. Antes de discorrer sobre computação evolucionária, é importante definir o conceito de otimização.

3.2.1 Otimização

A Otimização é o campo de conhecimento cujas técnicas visam determinar os extremos (máximos ou mínimos) de funções, em domínios determinados. De maneira concreta, pode-se pensar que uma função cujo extremo se quer descobrir representa algum fator de mérito relacionado com um sistema que se deseja construir ou analisar (??).

A otimização mono-objetivo consiste no problema de otimização voltado apenas para uma única função objetivo $f(x)$ e todas as restrições voltadas unicamente para esta função com intuito de limitar o espaço de soluções do problema.

Um problema de programação matemática (ou simplesmente, problema de otimização) apresenta o seguinte modelo geral:

$$\text{minimizar } f(x), \quad (15)$$

$$\text{sujeito a: } \begin{cases} g_i(x) \leq 0, \forall_i = 1, 2, 3, \dots, m \\ h_j(x) = 0, \forall_j = 1, 2, 3, \dots, n, \end{cases} \quad (16)$$

Deseja-se encontrar um valor de x ótimo que minimize o problema de otimização, em que x é o vetor de variáveis de decisão; $f(x)$ é a função objetivo, $g_i(x)$ e $h_j(x)$ são, respectivamente, as restrições de desigualdade e igualdade do problema. Se pelo menos uma destas equações for não-linear, o problema é dito não-linear.

3.2.2 Computação Evolucionária

Nos últimos 40 anos, foi progressivamente se firmando a ideia de construções heurísticas inspiradas em mecanismos de adaptação dos seres vivos, conforme observado na natureza (??). Neste contexto, a Computação Evolucionária (CE) compreende um conjunto de técnicas computacionais inspiradas na evolução natural das espécies. Assim, cria-se uma população de indivíduos que vão reproduzir e competir pela sobrevivência, ou seja, pela sua continuidade no algoritmo computacional. Os melhores sobrevivem e transferem suas características a novas gerações (??).

Ainda segundo ??), o mecanismo de adaptação das espécies pode ser transposto para construir um procedimento computacional de adaptação para tratar problemas de otimização de alta complexidade. Este mecanismo heurístico trataria simultaneamente um conjunto de vetores de variáveis de decisão (esse conjunto seria o análogo computacional de uma população de seres vivos). Cada vetor compreenderia um indivíduo desta população e estes indivíduos seriam avaliados por meio de função de aptidão e os que obtiverem a melhor avaliação seriam selecionados para dar origem aos novos descendentes, gerando assim uma pressão que conduz o processo a convergência sempre para melhores valores da função objetivo.

Dentre as diversas técnicas de CE, destaca-se o AG, amplamente utilizado na comunidade científica para resolver problemas de otimização da temporização semafórica de interseções e o algoritmo de evolução diferencial que é um método simples e eficiente que tem recebido cada vez mais destaque no âmbito da otimização não-linear de variáveis contínuas. Ambos os métodos podem ser utilizados para resolver problemas de otimização.

3.2.2.1 Algoritmo Genético

O desenvolvimento de simulações computacionais de sistemas genéticos teve início nos anos 50 e 60, mas foi John Holland que começou a desenvolver as primeiras pesquisas no tema. Em 1975, Holland publicou "*Adaptation in Natural and Artificial Systems*", ponto inicial dos Algoritmos Genéticos (AG). David E. Goldberg, aluno de Holland, nos anos 80 obteve seu primeiro sucesso em aplicação industrial com AG. Desde então o AG é utilizado para solucionar problemas de otimização e aprendizado de máquinas (??).

O AG é uma técnica para encontrar uma boa solução para um problema a partir do processo de seleção, recombinação (*crossover*) e mutação, cujos funcionamentos são inspirados em modelos simplificados da evolução natural. Os algoritmos genéticos processam um conjunto inicial de possíveis soluções para um problema (população inicial). Os elementos que constituem esta população são designados por indivíduos ou cromossomos. Cromossomos são usualmente implementados na forma de vetores, onde cada componente do vetor é conhecido como gene. Este conjunto é transformado e evoluído ao longo de sucessivas iterações (gerações). Estas transformações ocorrem da seguinte maneira:

- Os elementos mais aptos de uma geração são selecionados (avaliados por uma função de aptidão ou *fitness*) para servirem de progenitores das soluções que aparecerão na geração seguinte;
- Os operadores de transformação (*crossover* e mutação), designados operadores genéticos, atuam sobre os elementos, gerando novas soluções, ao mesmo tempo que tentam garantir que o processo mantenha um nível adequado de diversidade.

De acordo com ??), devido ao mecanismo de seleção, os indivíduos que constituem uma nova população ao longo das gerações têm tendência de serem melhores que os indivíduos das gerações anteriores, ou seja, representam uma melhor solução para o problema. Assim, à medida que o número de gerações aumenta, um AG converge gradualmente para regiões do espaço de busca onde se encontram as soluções mais promissoras. A otimização termina quando um determinado critério de parada é atingido. Em termos práticos, para aplicar um AG a um determinado problema é necessário definir os seguintes parâmetros:

1. Tamanho da população;
2. Critério de parada;
3. Probabilidade de aplicação dos operadores genéticos.

Além disso, é preciso definir os seguintes componentes essenciais apresentados nas subseções que se seguem.

3.2.2.1.1 Representação das Soluções

A proposta de ??) era de que as soluções deveriam ser representadas por uma sequência binária com N posições. Assim, os indivíduos processados são sequências de 0's e 1's concatenados, codificando a informação necessária para representar um ponto do espaço de busca. A codificação usando o próprio valor do atributo que se quer representar (letras, códigos, números reais, etc.) para representar um indivíduo também é muito utilizada.

3.2.2.1.2 Função de Aptidão

A função de aptidão associa a cada solução uma medida de qualidade, representando a sua capacidade para resolver o problema. Segundo ??), é pelo uso desta função que se mede quão próximo um indivíduo está da solução desejada ou quão boa é esta solução. Esta função deve ser representativa e diferenciar na proporção correta as más soluções das boas. Se houver pouca precisão na avaliação, uma solução ótima pode ser descartada durante a execução do AG, além de se gastar mais tempo explorando soluções pouco promissoras.

3.2.2.1.3 Seleção

No processo de seleção, os indivíduos mais aptos têm maior probabilidade de serem selecionados para dar origem às novas gerações. No trabalho original de ??), é utilizada a seleção por roleta, em que cada indivíduo é representado na roleta proporcionalmente ao seu índice de aptidão. Assim, para indivíduos com alta aptidão é dada uma porção maior da roleta, enquanto aos indivíduos de aptidão mais baixa, é dada uma porção relativamente menor.

Um outro método é a seleção por torneio (??), em que um número N de indivíduos é escolhido aleatoriamente para formar uma sub-população temporária. Deste grupo, o indivíduo selecionado dependerá de uma probabilidade k definida. Um exemplo básico da implementação deste algoritmo é mostrado no Algoritmo 1, em que $N = 2$.

3.2.2.1.4 Operadores Genéticos

Os operadores genéticos (recombinação e mutação) são necessários para que a população se diversifique e mantenha características de adaptação adquiridas pelas gerações anteriores (??).

Algoritmo 1: Método de Seleção por Torneio

início k = probabilidade definida;**repita**

Escolha 2 indivíduos da população aleatoriamente;

 r = valor aleatório entre 0 e 1;**se** $r < k$ **então**

| O melhor indivíduo é escolhido;

fim**senão**

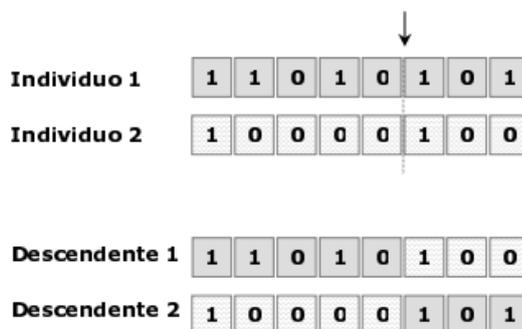
| O pior indivíduo é escolhido;

fim**até** N vezes;**fim**Fonte: (??)

De acordo com ??), a recombinação ou cruzamento (*crossover*) é uma característica fundamental do AG. Pares de genitores podem ser escolhidos aleatoriamente da população e novos indivíduos são criados a partir da troca do material genético. Estes serão formados por sequências genéticas parciais de cada um dos elementos originais. A probabilidade de aplicação do *crossover* é um parâmetro do AG e o seu valor é usualmente elevado.

Dentre as formas de cruzamento ou recombinação, destaca-se a recombinação com um ponto de corte (*single-point crossover*), proposta por ??). Segundo ??), o cruzamento com um ponto de corte é realizado em dois pais, cada pai é cortado em um ponto aleatório ao longo dos cromossomos e recombinado com um pedaço do outro para formar os descendentes (Figura 6). Vale ressaltar que o ponto de corte não é limitado a valores binários, podendo ser, também, utilizado em cromossomos com outros tipos de dados, como valores reais por exemplo.

Figura 6 – Cruzamento em um ponto de corte para valores binários.



Fonte: (??)

Além deste operador, também é amplamente utilizado o cruzamento uniforme. Segundo

??), esta estratégia consiste em gerar cada gene do descendente, copiando o gene de um dos pais, porém este gene é escolhido de acordo com uma “máscara de Cruzamento” gerada aleatoriamente. No processo de criação deste cromossomo, todas as posições da máscara são percorridas, analisando seus valores. Quando o valor da posição corrente for 1, o gene do primeiro pai referente à mesma posição da máscara é copiado, se o valor da máscara for 0, é copiado o gene do segundo pai. No final do processo é gerado o novo descendente, como pode ser observado na [Tabela 2](#).

Tabela 2 – Cruzamento Uniforme.

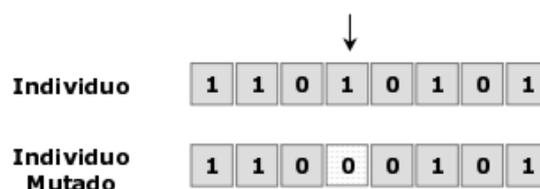
Máscara de Cruzamento	0101001
Primeiro Pai	1101101
Segundo Pai	0001110
Descendente	0101111

Fonte: (??)

Para representações reais, os operadores de recombinação dividem-se em dois grupos: recombinação discreta e aritmética. Os do primeiro grupo funcionam de forma análoga aos operadores de recombinação binária apresentados acima. Utilizando-se os operadores aritméticos, os valores de cada gene dos descendentes é encontrado dentro do intervalo definido pelos respectivos alelos (possíveis valores que um determinado gene pode assumir) que surgem nos progenitores.

Os indivíduos que resultam do cruzamento são sujeitos a mutação. A mutação é um operador unário e constitui um processo completamente aleatório que tem como objetivo manter um nível de diversidade adequado na população. O processo de mutação simples é ilustrado na [Figura 7](#). Quando o processo é aplicado a um gene do cromossomo, troca-se o seu valor.

Figura 7 – Mutação Simples.



Fonte: (??)

Outro operador de mutação, no caso de representações reais, é a mutação gaussiana, em que o novo valor para o gene G_i é obtido por meio da expressão:

$$G_i \leftarrow G_i + N(p_i, \alpha), \quad (17)$$

em que:

$N(p_i, \alpha)$ é uma distribuição normal com média p_i e desvio padrão α .

3.2.2.1.5 Estrutura Canônica

Finalmente, a estrutura canônica de um AG é dada pelo Algoritmo 2.

Algoritmo 2: Sequência Genérica de um Algoritmo Genético

início

$t \leftarrow 0$

Gerar a população inicial $P(t)$;

Avaliar os indivíduos de $P(t)$;

repita

 Selecionar progenitores $P'(t)$ a partir de $P(t)$;

 Aplicar operadores genéticos a $P'(t)$ obtendo a nova população $P(t + 1)$;

 Avaliar $P(t + 1)$;

$t \leftarrow t + 1$;

até Critério de terminação atingido;

Devolver resultado final da otimização;

fim

Fonte: (??)

3.2.2.2 Algoritmo de Evolução Diferencial

De acordo com (??), o algoritmo de Evolução Diferencial (*Differential Evolution* - DE) (??) é um algoritmo de otimização simples e eficiente. É um algoritmo classificado como uma instância dos algoritmos evolucionários, embora seu mecanismo de busca seja sustentado pelo operador de *mutação diferencial* que não tem base ou inspiração em nenhum processo natural. A forma com que este operador gera perturbações (mutações) se sustenta em argumentos matemáticos e heurísticos que indicam a adequabilidade para a otimização de funções.

O algoritmo possui as seguintes qualidades computacionais interessantes: simplicidade de implementação; robustez e eficiência; autoadaptação; e versatilidade. Segundo (??), o DE satisfaz alguns requisitos interessantes: capacidade de lidar com funções não-lineares, não-diferenciáveis e multimodais; passível de paralelização; acessibilidade - poucas variáveis de controle cujos valores são ajustados de maneira relativamente simples; auto-ajuste do passo de adaptação - conforme a população converge, os passos são cada vez menores; e boas propriedades de convergência.

Seja uma população de soluções candidatas, representada por $X_t = x_{t,i}; i = 1, \dots, N$, em que t é o índice da geração corrente e i é o índice do indivíduo na população, representado

por um vetor coluna:

$$x_{t,i} = \begin{bmatrix} x_{t,i,1} \\ x_{t,i,2} \\ \vdots \\ x_{t,i,n} \end{bmatrix}. \quad (18)$$

O mecanismo de busca do algoritmo de evolução diferencial utiliza vetores-diferença criados a partir de pares de vetores da própria população, com o seguinte procedimento:

- Dois indivíduos são selecionados aleatoriamente da população corrente e é criado um vetor-diferença a partir deles;
- Este vetor-diferença é combinado a um terceiro indivíduo, também selecionado aleatoriamente, produzindo uma nova solução mutante, que é o resultado de uma perturbação em algum indivíduo da população.

A [Equação 19](#) ilustra esse procedimento:

$$v_{t,i} = x_{t,r1} + F(x_{t,r2} - x_{t,r3}), \quad (19)$$

em que:

$r1, r2, r3 \in \{1, \dots, N\}$;

$v_{t,i}$ representa a i -ésima solução mutante;

F é um fator de escala aplicado ao vetor-diferença e parâmetro do DE;

$x_{t,r1}$ é o vetor de base, ao qual é aplicada a mutação diferencial.

Usando este procedimento, obtém-se uma população mutante $V_t = \{v_{t,i}; i = 1, \dots, N\}$.

3.2.2.2.1 Recombinação

A recombinação é obtida da seguinte maneira: Os indivíduos da população corrente X_t são recombinados com os indivíduos da população mutante, produzindo a descendência ou população de soluções teste U_t . Na versão clássica do DE, emprega-se a recombinação discreta com probabilidade $C \in [0, 1]$:

$$U_{t,i,j} = \begin{cases} v_{t,i,j}, & \text{se } U_{[0,1]} \leq C \text{ v } j = \delta_i, \\ x_{t,i,j}, & \text{caso contrário,} \end{cases} \quad (20)$$

em que $U_{[0,1]}$ representa a amostragem de uma variável aleatória com distribuição uniforme entre a e b e $\delta_i \in \{1, \dots, N\}$ é um índice aleatório sorteado para o vetor teste i . Como em algum momento a igualdade $j = \delta_i$ é verificada, essa condição garante que pelo menos um dos parâmetros da solução teste é herdado do indivíduo mutante. O parâmetro C controla a fração de valores em $u_{t,i}$ que são copiados do vetor mutante $v_{t,i}$.

3.2.2.2.2 Seleção

A seleção para sobrevivência pode ser descrita por:

$$x_{t+1,i} = \begin{cases} u_{t,i}, & \text{se } f(u_{t,i}) \leq f(x_{t,i}), \\ x_{t,i}, & \text{caso contrário,} \end{cases} \quad (21)$$

O valor da função objetivo é avaliado em $u_{t,i}$. Cada solução teste $u_{t,i}$ é comparada com $x_{t,i}$. Se a solução teste é melhor do que a solução corrente $x_{t,i}$, a solução corrente é eliminada e seu lugar ocupado por $u_{t,i}$. Caso contrário, a solução teste é descartada e a solução corrente sobrevive, permanecendo na população da próxima geração representada por $x_{t+1,i}$. O processo se repete até que algum critério de parada seja satisfeito.

Há diversas variações do método de seleção do algoritmo, dentre elas as duas mais utilizadas na literatura são:

- DE_{Rand} : Versão clássica do algoritmo, utiliza seleção aleatória com probabilidade uniforme do vetor de base;
- DE_{Best} : O melhor indivíduo é usado como vetor de base.

3.2.2.2.3 Estrutura Canônica

Finalmente, a estrutura canônica de um algoritmo de Evolução Diferencial é dada pelo Algoritmo 3.

3.3 Considerações Finais

Este capítulo apresentou a fundamentação teórica necessária para compreensão do problema proposto nesta tese. A partir da descrição dos componentes que constituem o plano semaforico e as técnicas de IC aplicadas ao controle semaforico, é possível familiarizar-se com o problema a ser tratado, mostrando que é possível tratá-lo com o uso de técnicas de Inteligência Computacional e descrevê-lo como um problema de otimização. No próximo capítulo, será apresentado como estas técnicas de IC podem ser associadas ao uso de um modelo matemático e computacional para otimizar as condições de tráfego de interseções.

Algoritmo 3: Pseudocódigo do Método de Evolução Diferencial Canônico.

```
início
   $t \leftarrow 1$ 
  Inicializar população  $X_t = \{x_{t,i}; i = 1, \dots, N\}$ 
  enquanto algum critério de parada não for satisfeito faça
    para  $i = 1$  até  $N$  faça
      Selecione aleatoriamente  $r_1, r_2, r_3 \in \{1, \dots, N\}$ 
      Selecione aleatoriamente  $\delta_i \in \{1, \dots, n\}$ 
      para  $j = 1$  até  $n$  faça
        se  $U_{[0,1]} \leq C \vee j = \delta_i$  então
           $u_{t,i,j} = x_{t,r_1,j} + F(x_{t,r_2,j} - x_{t,r_3,j})$ 
        fim
        senão
           $u_{t,i,j} = x_{t,i,j}$ 
        fim
      fim
    fim
    para  $i = 1$  até  $N$  faça
      se  $f(u_{t,i}) \leq f(x_{t,i})$  então
         $x_{t+1,i} = u_{t,i}$ 
      fim
      senão
         $x_{t+1,i} = x_{t,i}$ 
      fim
    fim
     $t \leftarrow t + 1$ 
  fim
fim
```

Fonte: Adaptado de (??)

Capítulo 4

Modelagem do Problema

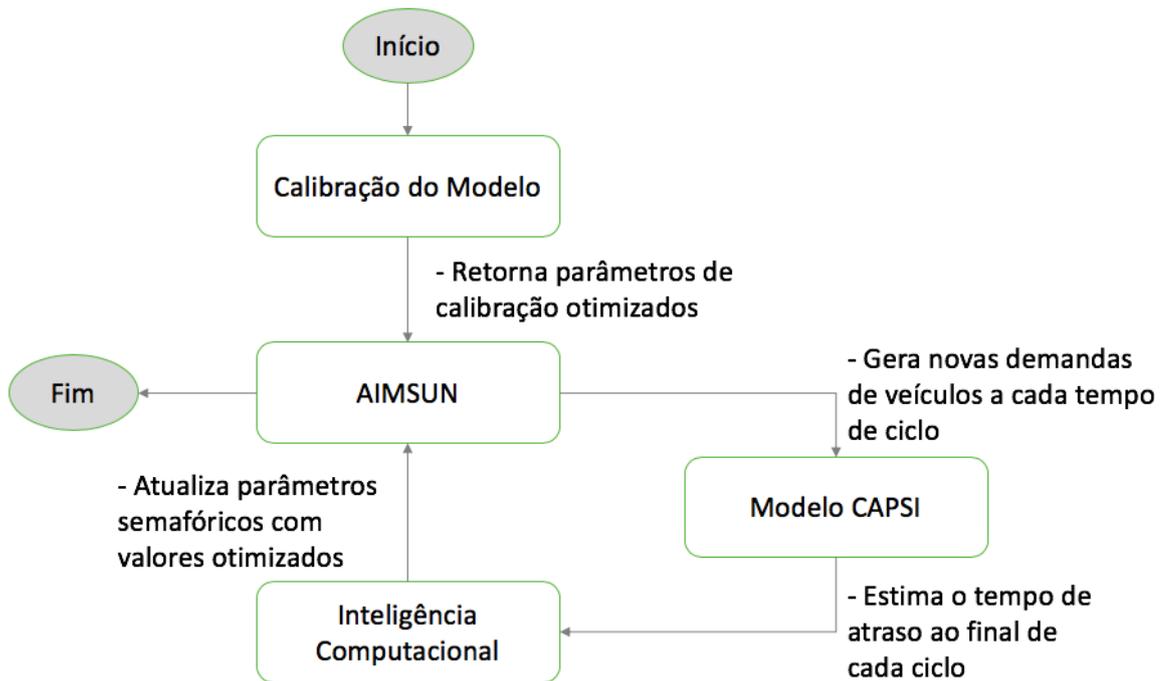
Dentre as diversas estratégias de mobilidade urbana na construção de cidades inteligentes, destacam-se os semáforos inteligentes ou reativos. Para implementar esta estratégia, nesta tese, uma abordagem de controle ativo é apresentada neste capítulo, o modelo CAPSI - Controle Ativo dos Parâmetros Semafóricos de Interseções, em que, a cada intervalo de tempo de ciclo, os algoritmos evolucionários recebem os dados de fluxo das vias e determinam a configuração semafórica, ou plano semafórico (tempos de verde, tempo de ciclo, sequência de fases e defasagem), para este período, baseados na condição real de tráfego.

A estratégia de tráfego adotada é o controle em rede, em que o plano semafórico é definido para uma rede de tráfego trabalhando em conjunto. Esta estratégia combinada como controle de uma determinada região (controle de área) visa otimizar o tráfego global da rede e não somente interseções isoladas. O funcionamento em rede é uma característica predominante nos casos reais de controle semafórico.

O esquema geral de funcionamento deste modelo de otimização dos parâmetros semafóricos pode ser observado na [Figura 8](#). O funcionamento deste modelo é descrito conforme:

1. **Início:** Sinaliza o início da execução do modelo;
2. **Calibração do modelo:** O processo de calibração dos parâmetros comportamentais e dos veículos do modelo de simulação de tráfego (AIMSUN) é realizado. Neste processo, utiliza-se um AG como técnica de otimização para calibrar o modelo, com o objetivo de minimizar o erro normalizado absoluto médio (*MANE*), que é a diferença entre o tempo de atraso real da rede observado em campo e a estimativa do tempo de atraso obtida pelo AIMSUN, a partir da otimização dos parâmetros pelo AG. Na inicialização desse AG, os valores padrão dos parâmetros utilizados na rede de tráfego desenhada no AIMSUN são utilizados como parte da população inicial do algoritmo. Então, o AG inicia o processo de evolução no qual utiliza a estimativa

Figura 8 – Esquema geral do modelo de otimização CAPSI.

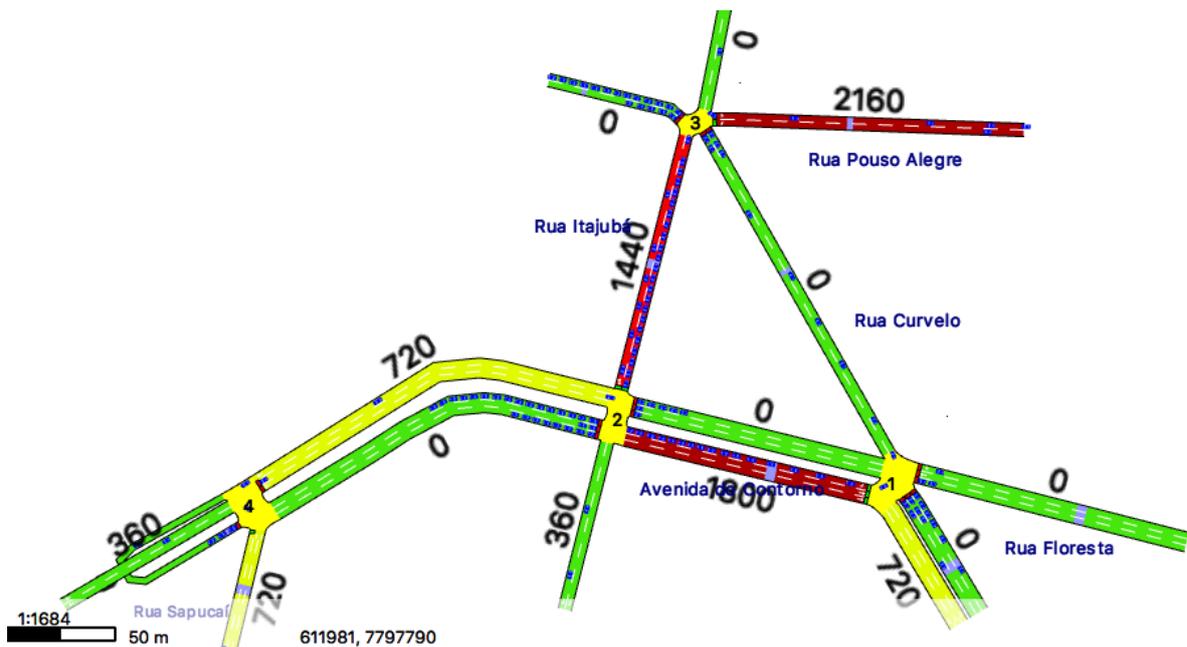


MANE calculada pelo modelo matemático para encontrar o conjunto otimizado dos parâmetros de simulação microscópica para a rede de tráfego;

3. **AIMSUN**: A configuração otimizada de parâmetros comportamentais encontrada no passo anterior é carregada no simulador AIMSUN. Logo após, a rede de tráfego inserida no AIMSUN gera demanda de tráfego para execução dos experimentos com o modelo CAPSI, a cada intervalo de tempo de ciclo c . Essa demanda carregada no AIMSUN é baseada em dados reais fornecidos pela BHTrans, mas o método proposto pode ser implementado em uma rede real, basta substituir o AIMSUN por dados em tempo real coletados por sensores instalados na infraestrutura de transporte;
4. **Modelo CAPSI**: O CAPSI recebe os dados de entrada do AIMSUN e estima o tempo de atraso médio dos veículos d . Para definir qual função de estimativa de tempo de atraso dos veículos deve ser utilizada, dentre as mais referenciadas na literatura, um experimento adicional é realizado neste passo;
5. **Inteligência Computacional**: Então, técnicas testes de inteligência computacional podem ser utilizadas, por exemplo o AG e o DE que são os algoritmos utilizadas neste trabalho, no processo de otimização dos parâmetros semafóricos. Nesse passo vale ressaltar que o modelo é genérico, trata-se de um *framework* em que se pode aplicar diferentes heurísticas computacionais e, portanto, outras técnicas de IC podem ser exploradas como solução no modelo. Essa otimização consiste em encontrar uma boa configuração dos parâmetros de controle semafórico (tempo de verde x , tempo de ciclo c , sequência de fases s e defasagem o) da rede de tráfego que minimize a estimativa de tempo de atraso calculada pelo modelo CAPSI.

6. **AIMSUN:** A configuração otimizada dos parâmetros semafóricos obtida no passo anterior é carregada no AIMSUN, como mostra a [Figura 9](#) em que os veículos estão circulando nas vias respeitando a sinalização otimizada indicada pelo CAPSI, e um novo ciclo c se inicia em que os passos acima são repetidos (de menos a calibração do modelo que é feita só uma vez no início do esquema geral) até que o tempo total de simulação e execução dos experimentos seja finalizado;
7. **Fim:** Finalização da execução do modelo e geração de relatórios para análise.

Figura 9 – Veículos circulando nas vias durante a simulação.



Resumindo, o modelo é executado a cada tempo de ciclo c , em que há o processo de realimentação do sistema com novos dados de demanda de tráfego, gerando soluções válidas e boas pelas técnicas de IC e atualizando os planos semafóricos da rede de tráfego, respondendo, em tempo real, às mudanças na demanda.

Nas próximas subseções são apresentados os aspectos gerais dos algoritmos evolucionários abordados neste trabalho. Para o uso das técnicas evolucionárias é necessário decidir sobre a representação computacional da variável de decisão que será utilizada no modelo e como será realizado o tratamento das restrições. Além disso, é necessário definir a função de aptidão que será usada, função objetivo e operadores genéticos.

A priori, são apresentadas as definições computacionais para o AG utilizado na calibração do modelo de simulação do AIMSUN. Logo após, as definições computacionais para os algoritmos evolucionários (AG e DE) associados ao modelo CAPSI são apresentadas.

4.0.1 Algoritmo Genético para Calibração dos Parâmetros do AIMSUN

As definições computacionais do AG utilizadas na calibração do modelo de simulação microscópica são apresentadas nas próximas subseções.

4.0.1.1 Variável de Decisão

A variável de decisão do AG para a calibração do AIMSUN corresponde a um vetor contendo o conjunto de parâmetros da [Tabela 3](#). Para este trabalho, adotou-se a representação real, na qual cada indivíduo corresponde diretamente ao valor de uma variável de decisão.

Tabela 3 – Parâmetros de calibração do modelo de simulação.

Parâmetro	Valor Padrão	Espaço de Busca do AG
Tempo de Reação	0,75s	0,5 – 2,0
Tempo de Reação na Parada	1,35s	0,70 – 3,0
Tempo de Reação nos Semáforos	1,35s	0,70 – 3,0
Velocidade Máxima Desejada para os Veículos	60,0km/h	50 – 180
Desaceleração Máxima dos Veículos	6,0m/s	4,0 – 7,0
Velocidade de Aceitação dos Veículos	1,10km/s	0,5 – 2,0
Distância Mínima dos Veículos	1,0m	0,5 – 2,0

Este conjunto de parâmetros, valores padrão e espaço de busca (mínimo - máximo) foram escolhidos para calibrar os parâmetros do simulador AIMSUN para a rede de tráfego de estudo com base em pesquisas anteriores como [??](#)), [??](#)) e [??](#)).

4.0.1.2 Função Objetivo e Formulação do Problema

A função objetivo utilizada nesta abordagem é o erro normalizado absoluto médio (*MANE*), que é a diferença entre o tempo de atraso observado para a rede e o tempo de atraso obtido a partir da simulação, no processo de otimização dos valores dos parâmetros de calibração pelo AG.

Assim, deseja-se estabelecer o melhor conjunto de parâmetros comportamentais para realizar a calibração do modelo de simulação, satisfazendo o objetivo de minimizar a função *MANE*. Este problema tem uma formulação de otimização que é apresentada a seguir:

$$\text{minimizar } \left\{ \begin{aligned} MANE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{d_{observado} - d_{estimado}}{N} \end{aligned} \right. \quad (22)$$

$$\text{sujeito a: } \left\{ \begin{aligned} &0,5 \leq \text{tempo}R \leq 2,0, \\ &0,7 \leq \text{tempo}RP \leq 3,0, \\ &0,7 \leq \text{tempo}RS \leq 3,0, \\ &50,0 \leq \text{veic}V \leq 180,0, \\ &4,0 \leq \text{veic}D \leq 7,0, \\ &0,5 \leq \text{veic}VA \leq 2,0, \\ &0,5 \leq \text{veic}DM \leq 2,0. \end{aligned} \right. \quad (23)$$

em que:

- N é o número de medidas;
- $d_{observado}$ é o atraso obtido em campo no mesmo período em que os dados de tráfego (demanda de veículos coletadas pela BHTrans para os demais experimentos) foram coletados. Para a coleta desse tempo de atraso, utilizou-se o Método da Placa, que, conforme mencionado no Manual de Estudos de Tráfego (??), consiste na anotação, na entrada e saída da seção analisada, da placa e do tempo de passagem dos veículos. Posteriormente, as chapas registradas nas entradas e saídas dos segmentos são comparadas, obtendo-se a mensuração do atraso dos veículos, por sentido;
- $d_{estimado}$ atraso estimado pelo AIMSUN;
- $\text{tempo}R$ é o tempo de reação dos veículos;
- $\text{tempo}RP$ é o tempo de reação nas paradas;
- $\text{tempo}RS$ é o tempo de reação nos semáforos;
- $\text{veic}V$ é a velocidade máxima desejada;
- $\text{veic}D$ é a desaceleração máxima;
- $\text{veic}VA$ é a velocidade de aceitação dos veículos e
- $\text{veic}DM$ é a distância mínima entre os veículos.

A função objetivo $MANE$ foi escolhida por indicar um erro médio em termos absolutos, sem considerar se há desvios sistemáticos, sendo aplicada constantemente em estudos de calibração de simuladores de tráfego, como pode ser observado em ??).

4.0.1.3 Operadores Genéticos

Por simplificação (já que o objetivo principal desta tese é o desenvolvimento do modelo matemático genérico aplicado a qualquer técnica de IC e não o estudo aprofundado de variações no comportamento do algoritmo utilizado) e por apresentar bons resultados em

??), os operadores genéticos utilizados pelo AG no processo de calibração do modelo de simulação microscópica e valores dos parâmetros foram:

- **Seleção:** Torneio;
- **Cruzamento:** 1 ponto de corte com taxa de cruzamento igual a 80%;
- **Mutação:** Gaussiana com taxa de mutação igual a 4%;
- **Tamanho da População:** 50 indivíduos.

Os detalhes acerca destes métodos são apresentados no [Capítulo 3](#). O critério de parada utilizado para o AG calibrar o modelo foi o final do período de simulação.

4.0.2 Inteligência Computacional - Modelo CAPSI

As definições computacionais das técnicas de inteligência computacional utilizadas nesse trabalho na otimização dos parâmetros do controle semafórico a partir do uso do modelo CAPSI e os algoritmos evolucionários (AG e DE) são apresentadas nas próximas subseções.

4.0.2.1 Variável de Decisão

Nesse problema de otimização, a partir de algoritmos evolucionários, a variável de decisão é representada por um vetor. A [Tabela 4](#) apresenta um exemplo de variável de decisão para uma rede de tráfego com quatro interseções (coluna "Valor Inicial"):

Tabela 4 – Variáveis de decisão do modelo de simulação.

Variável de Decisão	Representação	Valor Inicial	Espaço de Busca
Tempo de verde - x	Real	[[25,0, 65,0], [53,0, 75,0], [35,0, 41,0, 14,0], [49,0, 41,0]]	15,0 - 140,0
Tempo de ciclo - c	Real	[90,0]	90,0 - 140,0
Sequência de fases - s	Inteira	[1]	0, 1, 2, 3, 4 e 5
Defasagem - o	Real	[15,0, 15,0, 15,0]	0,0 - 20,0

Cada posição do vetor da variável de decisão corresponde a um vetor que contém os valores dos seguintes parâmetros do plano semafórico: x tempos de verde efetivos para cada fase f de um ciclo c de cada interseção i ; o tempo de ciclo c único para as interseções; a sequência de fases s que está codificada a partir de valores inteiros entre 0 e 5, em que cada valor corresponde a codificação de uma sequência de fases: 0 = [0, 1, 2], 1 = [0, 2, 1], 2 = [1, 0, 2], 3 = [1, 2, 0], 4 = [2, 0, 1] e 5 = [2, 1, 0], por exemplo. Observe que, foram consideradas sequência de fases de tamanho igual a 3 devido ao fato das redes de tráfego do estudo de caso deste trabalho possuírem no máximo 3 fases, mas o modelo proposto é de fácil alteração para implementação em uma rede com mais fases. A defasagem o é

representada por um valor real entre 0,0 e 20,00 para as $n - 1$ interseções da região (o valor da defasagem é igual a zero para a primeira interseção, pois a defasagem é calculada a partir da relação da primeira interseção com as demais).

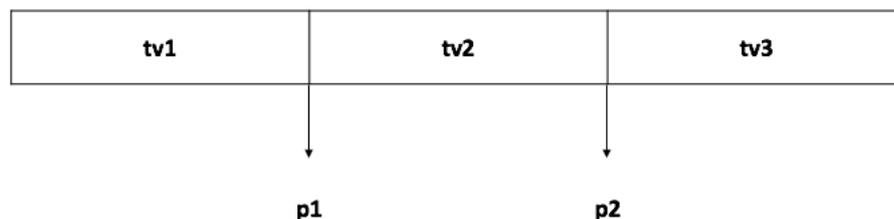
Como visto no [Capítulo 3](#), uma vez que o tempo de ciclo é igual à soma dos tempos de verde e entreverdes (uma restrição de igualdade imposta pelo problema), modificando os valores de um tempo de verde, inevitavelmente, o tempo total de ciclo seria diferente do tempo de ciclo predefinido. Como isso não é desejável, adotou-se a estratégia de partições ou prateleiras móveis, como descrito a seguir.

4.0.2.1.1 Estratégia de Partições Móveis

Para lidar com a restrição de igualdade discutida, a estratégia de partições móveis foi adotada (??). Esta estratégia utiliza $N - 1$ partições para representar N variáveis de decisão.

Para explicar o funcionamento desta estratégia, considere como exemplo uma interseção simples com a programação semafórica de 1 ciclo com 3 fases. Para cada fase, o algoritmo evolucionário calcularia o seu tempo de verde ótimo x . Sendo assim o número N de variáveis de decisão seria igual a 3. Com o uso desta estratégia, ao invés de utilizar uma variável para representar cada uma das 3 soluções do exemplo (tv1, tv2 e tv3) da [Figura 10](#), seriam utilizadas $N - 1$ partições p , ou seja, 2 partições (p1 e p2). Desta forma, o objetivo do algoritmo de otimização passa a ser encontrar as posições ótimas destas $N - 1$ partições, em vez de encontrar N tempos de verde ótimos.

Figura 10 – Estratégia de partições móveis.



Utilizando esta abordagem, além de se atender automaticamente a restrição de igualdade do problema, necessita-se de uma dimensão a menos para representar as soluções, o que facilita a busca do algoritmo de otimização conforme o número de interseções vai aumentando.

4.0.2.2 Função de Aptidão

Conforme visto na seção anterior, as soluções devem ser corrigidas para encontrar o tempo de ciclo corretamente. Além disso para evitar soluções inviáveis, o tempo de verde tem

que ser maior do que zero ($x > 0$), assim não podem existir partições repetidas (partições repetidas podem representar um valor de $x = 0$).

Para manipular esta restrição de ultrapassagem de partições, utiliza-se uma função de penalidade $F_{Penalidade}$ adicionada à função de aptidão do indivíduo (neste trabalho, a função de aptidão corresponde à própria função objetivo $F_{Objetivo}$). Obviamente, os indivíduos vão evitar áreas proibidas devido à baixa aptidão que alcançam quando não atendem a restrição estabelecida.

Utilizando esta estratégia, a aptidão (*score*) s do indivíduo x é dada pela [Equação 24](#):

$$s(x) = \frac{1}{F_{Objetivo}(x) + kp * F_{Penalidade}(x)}, \quad (24)$$

em que:

$F_{Objetivo}(x)$ é o valor da função objetivo para o indivíduo x ;

$F_{penalidade}(x)$ é o valor do indivíduo na função de penalidade;

kp é a constante de penalidade aplicada; e

x é o tempo de verde;

4.0.2.3 Função Objetivo e Formulação do Problema

A função objetivo utilizada nesta abordagem é uma nova proposta de modelo para estimar o tempo de atraso dos veículos nas interseções, foco deste trabalho, em que as variáveis de decisão (tempo de verde; tempo de ciclo; sequência de fases e defasagem) são levadas em consideração no processo de otimização. Neste modelo, denominado CAPSI, pretende-se estender uma estimativa de tempo de atraso utilizada na literatura para um modelo de atraso mais completo, em que todas essas variáveis de decisão são consideradas no processo de estimativa do tempo de atraso.

Esta estimativa de atraso da literatura, usada como base para o modelo CAPSI, é definida a partir de um experimento adicional em que são comparadas as funções mais utilizadas na literatura para calcular o tempo de atraso, a fim de se definir qual apresenta a melhor estimativa para essa medida de desempenho e, assim, definir qual é utilizada pelos algoritmos evolucionários na formulação da função objetivo deste problema.

Assim, para esta abordagem, deseja-se que todo veículo circulando nas interseções obtenha o menor tempo de atraso possível, permitindo um maior fluxo de automóveis nas regiões em estudo. A nova proposta apresentada pelo modelo CAPSI tem formulação de otimização e é descrita da seguinte maneira:

$$\text{minimizar } \left\{ A = a_{inicial} + \sum_{i=1}^n (a_i + (a_i \times (\sum_{j=0}^{i-1} (x_j) + o[I]))) \right. \quad (25)$$

$$\text{sujeito a: } \left\{ \begin{array}{l} c = \sum_{i=1}^v x_i, \\ 15, 0 \leq x \leq 140, 0, \\ 90, 0 \leq c \leq 140, 0, \\ s = \{0, 1, 2, 3, 4, 5\}, \\ 0, 0 \leq o \leq 20, 0. \end{array} \right. \quad (26)$$

em que:

- a_i é o atraso médio calculado por um dos modelos de atraso dependentes do tempo apresentados na (Subsubseção 3.1.3.2), que é definido a partir de um experimento. Pode-se observar que nesses modelos de atraso, o tempo de verde x e tempo de ciclo c já são considerados como parâmetros (variáveis de decisão ou de projeto). Cabe agora determinar como introduzir a sequência de fases s e a defasagem o como variáveis de decisão também. Para tal, a função A apresentada acima, que é a função de atraso do modelo CAPSI proposto por esta tese, é calculada da seguinte maneira:
 - . Inicialmente, calcula-se o valor de atraso de $a_{inicial}$ para a fase inicial de semáforos a ser utilizada;
 - . Logo após, os atrasos a_i são calculados para as próximas fases i até $n = f - 1$ (n é igual ao número de fases menos 1);
 - . O valor de a_i das próximas fases é obtidos a partir da multiplicação do atraso a_i pelo somatório dos tempos de verde x das fases anteriores (até $i - 1$) mais o valor de defasagem o da interseção I .

Assim, a decisão por utilizar determinada fase de semáforo (dar o direito de passagem ou “tempo de verde” para os movimentos desta fase) terá um acréscimo do valor do tempo de verde das fases anteriores mais o valor de defasagem da interseção, a fim de determinar se a sequência de fases (em que o direito de passagem é dado) interfere no atraso médio dos veículos na interseção.

As delimitações do espaço de busca apresentadas nas seções anteriores são tratadas como restrições na formulação acima, em que v é a quantidade de tempos de verde x a serem otimizados, c é o tempo de ciclo, s é a sequência de fases e o é a defasagem.

Conforme visto anteriormente, todos os parâmetros são calculados a partir dos dados obtidos pela simulação, porém o método também pode ser utilizado em uma rede real que possuir sensores de tráfego em sua infraestrutura. Esses sensores enviariam os dados de tráfego para o método de forma análoga ao que é feito usando-se o simulador AIMSUN.

4.0.2.4 Operadores Genéticos

Há muitas implementações dos operadores genéticos na literatura contemporânea. Por simplicidade e por terem demonstrado bom desempenho nas abordagens anteriores (??), (??), (??), os operadores genéticos utilizados nesta tese pelos algoritmos evolucionários testes são apresentados na [Tabela 5](#) e os detalhes acerca dos mesmos são apresentados no [Capítulo 3](#).

Para usar técnicas evolucionárias é necessário definir um conjunto de valores para os parâmetros e operadores dos algoritmos. Para tal, por simplificação (já que o objetivo principal desta tese é o desenvolvimento do modelo matemático genérico aplicado a qualquer técnica de IC e não o estudo aprofundado de variações no comportamento dos algoritmos utilizados) e por apresentar bons resultados em (??), (??), o conjunto de valores utilizado para os experimentos desta tese foi:

- **Tamanho da população:** 50 indivíduos;
- **Número de Gerações:** Até a convergência da função de avaliação;
- **Taxa de Cruzamento:** 80%;
- **Taxa de Mutação:** 4%.

Tabela 5 – Operadores Genéticos.

Operador Genético	AG	DE
Seleção	Torneio	Melhor Indivíduo
Cruzamento	1 ponto de corte	Recombinação discreta
Mutação	Gaussiana	Mutação Diferencial

O critério de parada utilizado, para dar oportunidades iguais aos algoritmos para fins de comparação, foi a convergência da função de avaliação, ou seja, os algoritmos param quando, ao longo de várias gerações, não há mais melhora significativa nos resultados.

4.1 Considerações Finais

Neste capítulo foi apresentada a modelagem matemática e computacional utilizada neste trabalho para tratar o problema de otimização dos parâmetros de controle ativo da temporização semafórica de interseções. Como na literatura há muitos trabalhos que obtiveram sucesso utilizando algoritmos evolucionários para o controle semafórico, o modelo CAPSI foi proposto com o intuito de aplicar um controle ativo da temporização semafórica nas redes de tráfego em estudo e explorar essas técnicas evolucionárias como soluções teste para tratar o problema, obtendo resultados mais promissores para as instância utilizadas nos experimentos. Esses resultados são apresentados no próximo capítulo.

Capítulo 5

Resultados Experimentais

Neste capítulo são apresentados os experimentos realizados nesta tese, conforme o planejamento dos experimentos sugerido na [Seção 5.1](#).

Conforme descrito na [Seção 5.1](#), a rede de interseções do Bairro Floresta utilizada para a execução dos experimentos *E1*, *E2*, *E3*, *E4*, *E5* e *E6* é apresentada nesse capítulo, bem como os dados que foram coletados para esta rede. Logo após, a rede de interseções da região da Savassi também é apresentada para realização dos experimentos *E7*, *E8* e *E9* e *E10*.

5.1 Planejamento dos Experimentos

Esta seção apresenta, brevemente, o planejamento dos experimentos realizados nesta tese. Na [Tabela 6](#), os experimentos são mostrados na ordem em que são realizados.

Tabela 6 – Lista de experimentos e abreviações utilizadas no texto.

Código	Nome	Local
<i>E1</i>	Calibração do Simulador	Bairro Floresta
<i>E2</i>	Definição da Função de Atraso	Bairro Floresta
<i>E3</i>	Aplicação do Modelo CAPSI	Bairro Floresta
<i>E4</i>	Comparação entre Algoritmos Evolucionários	Bairro Floresta
<i>E5</i>	Comparação do Modelo CAPSI e solução da BHTrans	Bairro Floresta
<i>E6</i>	Simulação da Oscilação de Tráfego	Bairro Floresta
<i>E7</i>	Aplicação do Modelo CAPSI	Região da Savassi
<i>E8</i>	Comparação entre Algoritmos Evolucionários	Região da Savassi
<i>E9</i>	Comparação do Modelo CAPSI e solução da BHTrans	Região da Savassi
<i>E10</i>	Simulação da Oscilação de Tráfego	Região da Savassi

Na [Tabela 6](#), *E1* é um experimento inicial para calibração dos parâmetros comportamentais e dos veículos no simulador AIMSUN. O processo de calibração do modelo é importante para reproduzir, o mais próximo possível, a condição real da rede de tráfego a ser analisada

no modelo de simulação. Assim, as decisões estratégicas de controle de tráfego, tomadas a partir da análise deste modelo de simulação, serão embasadas em informações reais e poderão ser aplicadas na prática com mais segurança e eficiência.

Nesse experimento, o AG é usado para encontrar um bom conjunto de parâmetros para o modelo de simulação que minimize o erro normalizado absoluto médio (*MANE* - *mean absolute normalized error*) entre o modelo de tempo de atraso estimado pelo AIMSUN como função de aptidão do AG e os valores de tempo de atraso observados e medidos em campo.

E2 é um experimento adicional, no qual os modelos mais utilizados na literatura, para estimativa do tempo de atraso dos veículos em interseções, são comparados a fim de se definir qual apresenta melhor estimativa para essa medida de desempenho e, assim, definir qual será utilizado como base para definição do modelo CAPSI. São eles:

1. Modelo de atraso australiano proposto por Akcelik em *??*) e *??*) - $a_{akcelik}$;
2. Modelo de atraso estadunidense proposto pelo Manual Highway Capacity Manual (HCM) em *??*) e *??*) - a_{HCM} ;
3. Modelo de atraso Canadense proposto em *??*) - $a_{canadense}$.

Para definir qual função utilizar, o valor de *MANE* é calculado, que corresponde à diferença entre os valores de atrasos estimados pelos modelos listados acima e o tempo de atraso observado em campo.

Já em *E3* o modelo matemático CAPSI, foco deste trabalho, apresenta uma proposta de estimativa de tempo de atraso (uma extensão e aplicação prática da função definida pelo experimento *E2*), considerando, como variáveis de decisão no processo de otimização, os quatro principais parâmetros de controle semafórico das interseções. São eles:

- Tempo de verde (x);
- Tempo de ciclo (c);
- Sequência de fases (s); e
- Defasagem (o).

Assim, em *E3*, o modelo CAPSI é implementado e otimizado a partir de uma solução teste de IC (o algoritmo genético) para determinar, a cada tempo de ciclo, os valores desses parâmetros semafóricos que minimizam o atraso médio dos veículos na rede de interseções, de acordo com a demanda real de tráfego carregada e obtida a partir do simulador AIMSUN.

Para validar se a otimização dos quatro parâmetros semafóricos acima (modelo CAPSI) contribuem para a minimização do tempo de atraso dos veículos na rede de tráfego em estudo (rede de interseções do Bairro Floresta), no experimento *E3*, as configurações para a variável de decisão considerada pelo modelo de estimativa de atraso, no processo de

otimização, são apresentadas na [Tabela 7](#).

Tabela 7 – Configurações utilizadas no experimento *E3* desta tese.

Configuração	Variável de Decisão
<i>C1</i>	x
<i>C2</i>	$x - c$
<i>C3</i>	$x - c - s$
<i>C4</i>	$x - c - s - o$

Na configuração *C1*, somente o tempo de verde x é otimizado, as demais variáveis (tempo de ciclo c , sequência de fases s e defasagem o) são mantidas com os valores constantes obtidos em campo. Em *C2*, o tempo de verde e o tempo de ciclo são otimizados, deixando a sequência de fases e a defasagem constantes. Já em *C3* somente a defasagem é constante, pois as demais variáveis são otimizadas. Por fim, em *C4* - configuração completa do modelo CAPSI, foco deste trabalho, todos os parâmetros semafóricos da rede são otimizados simultaneamente.

Assim, estas configurações são comparadas a fim de determinar, estatisticamente, se a otimização dos quatro parâmetros semafóricos a partir do modelo CAPSI (configuração *C4*) apresenta menores valores de atraso para os veículos do que as demais configurações que consideram menos parâmetros no processo de otimização. Além disso, espera-se verificar se *C4* proporciona uma programação eficiente de tráfego deixando o fluxo de veículos mais estável, minimizando o congestionamento e os atrasos.

No experimento *E4*, o CAPSI utiliza, também, o algoritmo DE como solução teste no processo de otimização do controle semafórico da rede de interseções do Bairro Floresta. Nesse experimento, o objetivo principal é mostrar a possibilidade de se explorar diferentes técnicas de IC com o modelo CAPSI. Em *E4*, pretende-se verificar qual das duas técnicas de Inteligência Computacional, AG ou DE, é a mais eficiente na resolução do problema de otimização em questão. Este experimento analisa, a partir da curva de convergência média dos algoritmos e do teste de hipóteses, a classificação média do melhor indivíduo da população (a melhor configuração dos parâmetros em *C4*) na função objetivo (tempo médio de atraso) para todas as gerações, com base em 30 execuções dos algoritmos, para atender ao teorema central do limite.

No experimento *E5*, os resultados obtidos com a otimização dos parâmetros do controle semafórico a partir do modelo CAPSI durante todo o período de simulação (2 horas) utilizando o AG e o DE são comparados com os resultados utilizando o plano de controle semafórico atual da BHTrans, a fim de determinar se o CAPSI consegue obter um plano semafórico mais eficiente do que o plano que é utilizado atualmente, ou seja, planos semafóricos que resultam em menores tempos de atraso para os veículos na rede em estudo (Bairro Floresta).

Para verificar se possíveis oscilações na demanda de veículos causadas, por exemplo, por situações eventuais na rede de tráfego (fluxo maior na porta de escolas, obras ou reparações nas vias, manifestações, eventos, horário de início ou final do expediente de trabalho das pessoas, entre outras), podem ocasionar, também, na oscilação do tempo de verde ou direito de passagem dos veículos em determinadas vias, o experimento *E6* é realizado. Em *E6*, deseja-se verificar se o CAPSI é um modelo sustentável de controle semafórico que responde, em tempo real, às alterações eventuais de fluxo de veículos que podem ocorrer nas vias, e que não são tratadas por outros planos semafóricos, como por exemplo o da BHTrans.

Em *E7*, o CAPSI é aplicado em outra região (interseções da região da Savassi - Belo Horizonte), a fim de verificar a possibilidade de generalização do modelo. Para tal, o CAPSI é novamente implementado a partir de um AG para determinar, a cada tempo de ciclo, os valores dos parâmetros semafóricos que minimizam o atraso médio dos veículos nas interseções dessa região, de acordo com a demanda real de tráfego obtida pelo simulador AIMSUN (disponibilizada pela BHTrans).

No experimento *E7*, as mesmas configurações *C1*, *C2*, *C3* e *C4* do experimento *E3* são utilizadas no processo de otimização, conforme informado na [Tabela 7](#) acima. E, assim como em *E3*, espera-se determinar em *E7*, estatisticamente, se a otimização de todos os parâmetros semafóricos a partir do CAPSI (configuração *C4*) apresenta menores valores de atrasos para os veículos na rede de tráfego em estudo (região da Savassi) do que as demais configurações.

Em *E8*, assim como em *E4*, o CAPSI utiliza, também, o algoritmo DE no processo de otimização do controle semafórico, só que para a região da Savassi. Nesse experimento, pretende-se verificar qual das duas técnicas de Inteligência Computacional, AG ou DE, é a mais eficiente na resolução do problema de otimização para essa região.

No experimento *E9*, os resultados obtidos a partir do uso do modelo CAPSI durante todo o período de simulação, utilizando o AG e o DE, são comparado com o plano semafórico atual da BHTrans para a região da Savassi. Nesse experimento, pretende-se determinar se o CAPSI consegue obter um plano semafórico mais eficiente do que o plano que é utilizado atualmente nessa região, com o objetivo de minimizar o tempo de atraso total dos veículos durante todo o período de simulação.

Por fim, em *E10*, deseja-se verificar se possíveis aumentos na demanda de veículos, podem ocasionar, também, na oscilação dos tempos de verde das interseções da região da Savassi, mostrando, assim, a capacidade de sustentabilidade e adaptação do modelo diante de mudanças na rede de tráfego.

Os algoritmos propostos nesta tese são implementados na linguagem Python (versão 2.7.5) devido a sua facilidade de compreensão e por ser amplamente utilizada na computação científica para codificação dos algoritmos. Além disso, o AIMSUN tem uma interface de programação de aplicações (API, da sigla em inglês para *Application Programming Interface*) para Python, o que facilita o desenvolvimento dos algoritmos e sua integração com as simulações.

O tempo de execução de cada passo de simulação dos experimentos é de 1 segundo, muito menor do que o tempo de ciclo, o que sugere a capacidade prática que o modelo CAPSI possui de ser adaptado e implementado no mundo real. A versão do simulador AIMSUN utilizada nesta tese foi a AIMSUN Next 8.2.2 e o computador utilizado para realização dos experimentos é um MacBook Air, com o sistema operacional macOS High Sierra, processador Intel Core i5 de 1,6 GHz e 4 GB de memória RAM.

5.2 Rede de Tráfego - Bairro Floresta

A Rede de Tráfego inserida no AIMSUN e apresentada na [Figura 11](#) é uma região do bairro Floresta em Belo Horizonte (Brasil) e é a rede utilizada para realização dos experimentos *E1*, *E2*, *E3*, *E4*, *E5* e *E6*. Belo Horizonte é a capital do Estado de Minas Gerais, com aproximadamente 4 milhões de habitantes e uma frota de mais de 1.2 milhões de veículos particulares. A região do Bairro Floresta é composta pelas quatro interseções sinalizadas descritas na [Tabela 8](#).

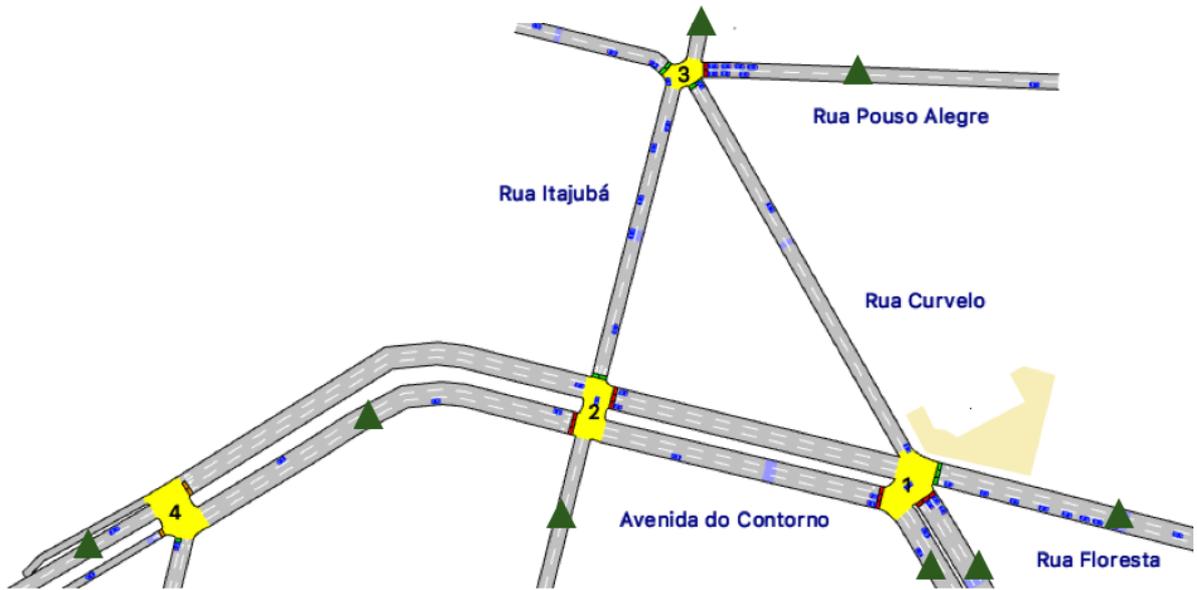
Na [Figura 11](#), os triângulos verdes são os pontos de medição em campo e também representam o local onde foram colocados os detectores de dados da rede de tráfego no simulador AIMSUN.

Tabela 8 – Característica das Interseções.

ID	Interseção	Número de Movimentos	Número de Fases
1	Contorno com Curvelo	7	3
2	Contorno com Itajubá	6	2
3	Pouso Alegre com Curvelo	4	2
4	Contorno com Sapucaí	4	2

Para o experimento *E1*, os dados de tempo de atraso foram coletados em campo no mesmo período em que os dados de tráfego (demanda de veículos coletadas pela BHTrans para os demais experimentos) foram coletados. Para a coleta do tempo de atraso, utilizou-se o Método da Placa, que, conforme mencionado no Manual de Estudos de Tráfego (??), consiste na anotação, na entrada e saída da seção analisada, da placa e do tempo de passagem dos veículos. Posteriormente, as chapas registradas nas entradas e saídas dos segmentos são comparadas, obtendo-se a mensuração do atraso dos veículos, por sentido.

Figura 11 – Rede de Tráfego criada no AIMSUN - Bairro Floresta.



O processo de otimização consiste em obter os tempos de verde x das nove fases dos semáforos das quatro interseções descritas na Tabela 8, o tempo de ciclo c dos semáforos (tempo de ciclo único para as interseções da rede), a sequência de fases s para interseções com 3 fases ou mais (Interseção de ID = 1) e o tempo de defasagem o para cada interseção. A Tabela 9 mostra o fluxo dos movimentos (dado em veículos por hora) das interseções mostradas pela Tabela 8. Na Tabela 9 todos os movimentos controlados por cada grupo semafórico (GS) são marcados pela cor vermelha.

Tabela 9 – Características dos movimentos

GS	Interseção ID 1		Interseção ID 2		Interseção ID 3		Interseção ID 4	
	Movimento	v/h	Movimento	v/h	Movimento	v/h	Movimento	v/h
1		756		824		850		1351
2		1262		408		635		1300
3		168		1221		1303		543
4		168						

Tabela 10 – Característica das Fases.

Fase	Interseção ID 1 Movimentos	Interseção ID 2 Movimentos	Interseção ID 3 Movimentos	Interseção ID 4 Movimentos
0	1, 4	1, 2	1, 3	1, 2
1	2	3	2	3
2	3, 4			

A [Tabela 10](#) mostra os movimentos permitidos nas fases dos semáforos de cada interseção da [Tabela 8](#), o que significa que cada fase tem um conjunto de movimentos que pode operar com plano semafórico semelhante (isto é, mesmo tempo verde no mesmo intervalo de tempo) pois a fase é composta pelos movimentos não conflitantes dos grupos semafóricos descritos na [Tabela 9](#).

Segundo dados da Prefeitura de Belo Horizonte (??), o bairro Floresta, localizado na região Leste, nasceu como subúrbio. Foi um dos primeiros locais de moradia dos operários que trabalharam na construção da capital. Atualmente possui 33.757 habitantes, uma variedade de estabelecimentos comerciais e importantes vias de acesso delimitam a região. Assim, esta área foi escolhida para os experimentos porque é uma região onde o congestionamento de tráfego é intenso devido à variedade de comércios que possui e ao acesso fácil existente para o centro da cidade e outros bairros. Além disso, o centro de controle operacional da BHTrans tem um sistema de controle de tráfego para a região, que alterna entre os programas dos semáforos de acordo com o fluxo de tráfego em determinados períodos do dia (controle atuado). Este fluxo é obtido a partir da utilização de sensores que realizam a contagem de veículo por movimento nas intersecções.

A BHTrans forneceu os dados de fluxo de veículos por movimento para as quatro intersecções da região, no período de 08:00 às 10:00 da manhã, com o intervalo de cinco minutos pelo período de um mês. Foi calculada a média dessa demanda durante esse período para utilizar como entrada para realização dos experimentos desta tese. A empresa também forneceu o plano de controle semafórico (tempo de verde, tempo de ciclo, sequência de fases e defasagem) utilizado nas intersecções neste período para fins de comparação e que é utilizado com um dos indivíduos na população inicial dos algoritmos, conforme a [Figura 12](#). A partir deste plano semafórico é possível observar o tempo de verde x de cada grupo semafórico descrito em [Tabela 9](#) e o tempo total de ciclo c fixo igual a 90 segundos.

Pode-se observar, também, a sequência de fases da Interseção de ID=1, que possui 3 fases e que é utilizada nos experimentos $E3$ e $E4$ para análise da sequência de fases como variável de decisão no modelo CAPSI. Assim, conforme pode ser observado na [Figura 12](#), a sequência de fases dos grupos semafóricos desta interseção é a seguinte: inicialmente, tem-se a **fase 0** em que os grupos semafóricos $GS1$ e $GS4$ têm o direito de passagem (primeira indicação de tempo de verde efetivo para os semáforos na tabela com o valor de

Figura 12 – Plano semafórico BHTrans.

	0s	10s	20s	30s	40s	50s	60s	70s	80s	90s	
Interseção ID 1											
GS1	Verde – 32s			A	Vermelho						
GS2	Vermelho				Verde - 38			A	Vermelho		
GS3	Vermelho							Verde		A	
GS4	Verde – 32s			A	Vermelho				Verde		A
Interseção ID 2											
GS1	Verde – 22s		A	Vermelho							
GS2	Verde – 22s		A	Vermelho							
GS3	Vermelho			Verde – 62s						A	
Interseção ID 3											
GS1	Verde - 50s				A	Vermelho					
GS2	Vermelho					Verde – 34s			A		
GS3	Verde – 50s				A	Vermelho					
Interseção ID 4											
GS1	Verde- 46s			A	Vermelho						
GS2	Verde – 46s			A	Vermelho						
GS3	Vermelho					Verde – 38s			A		

35 segundos, sendo 32 segundos de tempo de verde e 3 segundos de tempo de amarelo), logo após, na próxima fase (**fase 1**) o grupo semafórico *GS2* tem 41 segundos de tempo de verde efetivo (38 de tempo de verde mais 3 segundos de amarelo) e na última fase (**fase 2**) os grupos semafóricos *GS3* e *GS4* têm o direito de passagem com um tempo de verde de 14 segundos (11 de verde mais 3 de amarelo).

Resumidamente, tem-se:

- **Fase 0:** Grupos semafóricos *GS1* e *GS4*;
- **Fase 1:** Grupo semafórico *GS2*;
- **Fase 2:** Grupos semafóricos *GS3* e *GS4*.

As demais interseções possuem somente 2 fases e no modelo proposto não faz sentido otimizar sequências com duas 2 fases, porque ao fazer a otimização desta sequência de fases, por repetidas vezes, para 2 fases (0 e 1, por exemplo), utilizar a sequência 0 e 1 ou a sequência 1 e 0 não faz diferença já que 0's e 1's aparecerão um após o outro e vice-versa.

Estes dados foram carregados no AIMSUN juntamente com os dados de velocidade máxima e capacidade das vias obtidos usando a ferramenta aberta para mapeamento de vias chamada *OpenStreetMap*. Embora os experimentos relatados aqui sejam realizados por meio de simulação, a técnica proposta é possível de ser implementada em uma rede de tráfego do mundo real, substituindo o AIMSUN por dados em tempo real obtidos a partir de

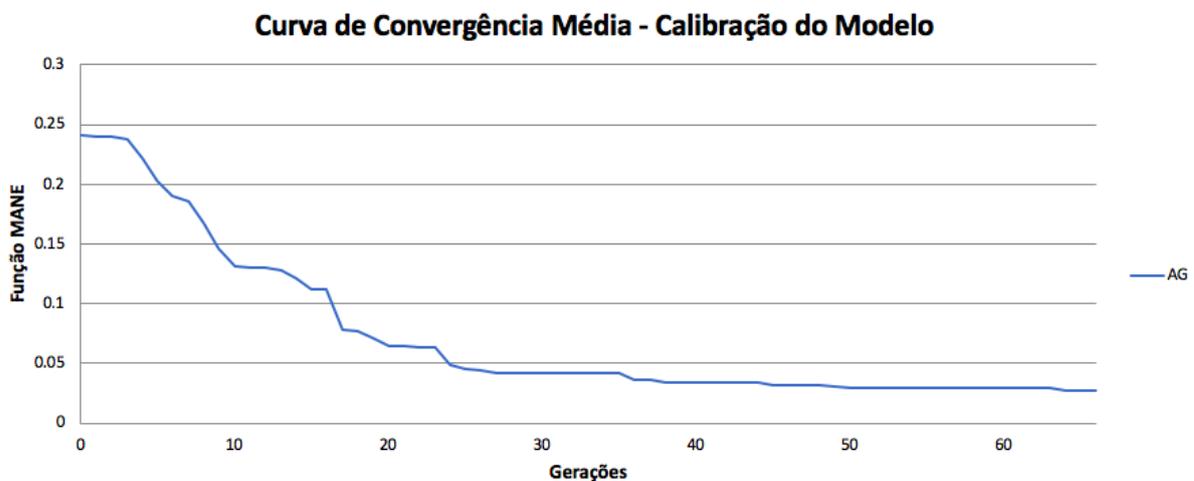
sensores instalados na infra-estrutura de tráfego, por exemplo, detectores de *loop*, câmeras de vídeo ou equipamentos semelhantes capazes de medir as variáveis de entrada para o modelo matemático.

O período de simulação é de duas horas, em que, a cada tempo de ciclo c , o simulador recebe um novo conjunto de valores otimizados para os parâmetros semafóricos (tempos de verde, tempo de ciclo, sequência de fases e defasagem) obtidos a partir da execução dos algoritmos de otimização, que minimizam o tempo de atraso médio dos veículos nestas interseções.

5.2.1 Experimento $E1$

Nesse experimento inicial o AG foi utilizado para encontrar valores dos parâmetros comportamentais do modelo de simulação para que a medida de desempenho escolhida, o tempo de atraso, tenha valores simulados e observados semelhantes (função $MANE$). Os resultados experimentais obtidos a partir da execução do AG para o problema são representados pelo gráfico da curva de convergência média da [Figura 13](#).

Figura 13 – Experimento $E1$.



A curva de convergência média mostra a classificação média dos melhores indivíduos da população considerando a função objetivo para cada geração, com base em 30 execuções do algoritmo. Analisando o experimento, pode-se observar que a curva diminui gradualmente para valores cada vez menores da função objetivo. Este fato suporta a hipótese de que um algoritmo genético pode ser usado para calibrar os parâmetros de simulação microscópica do simulador AIMSUN para a rede de interseções em análise.

Na [Figura 13](#), com 70 gerações, o AG atinge um valor mínimo de $MANE$ em torno de 0,027, o que significa que o valor absoluto da diferença entre o tempo real de atraso da

rede e o tempo de atraso obtido pela otimização dos parâmetros de calibração é de quase 3%. Este valor mostra que as saídas do modelo são semelhantes aos dados observados. Tal constatação é necessária para se estimar de modo preciso - a partir de simulações numéricas - o comportamento dos veículos em condições reais. Previsões confiáveis permitem que os requisitos de engenharia sejam atendidos a um custo menor. Os valores ótimos dos parâmetros encontrados pelo AG são mostrados na [Tabela 11](#).

Tabela 11 – Parâmetros de Calibração - Valores Otimizados.

Parâmetros	Valores Otimizados
Tempo de Reação	1,02s
Tempo de Reação na Parada	1,87s
Tempo de Reação no Semáforo	1,65s
Velocidade Máxima Desejada para os Veículos	86km/h
Desaceleração Máxima dos Veículos	4,00m/s
Velocidade de Aceitação dos Veículos	0,94km/s
Distância Mínima entre os Veículos	2,00m

Para verificar se o valor de $MANE$ encontrado a partir da otimização dos parâmetros de simulação do AIMSUN pelo AG foi bom, foi realizado um experimento usando os parâmetros de calibração padrão do AIMSUN na rede de tráfego, no qual foi encontrado um valor $MANE$ de 0,1189. Assim, a aplicação da melhor solução encontrada pelo AG ([Tabela 11](#)) no modelo de simulação de tráfego forneceu um valor $MANE$ de 0,027, ou seja, aproximadamente 78% menor do que utilizando os valores padrão (*default*) dos parâmetros.

Assim, pode-se concluir que a aplicação da melhor solução encontrada pelo AG no modelo de simulação de tráfego forneceu um valor $MANE$ menor que ao usar os valores padrão dos parâmetros, o que mostra que o processo de calibração é essencial, pois garante que o modelo de simulação reflita com mais precisão o ambiente de experimento, de modo que as decisões estratégicas sobre gerenciamento de tráfego para a rede analisada feitas com base nesses resultados não serão decisões mal embasadas.

5.2.2 Experimento $E2$

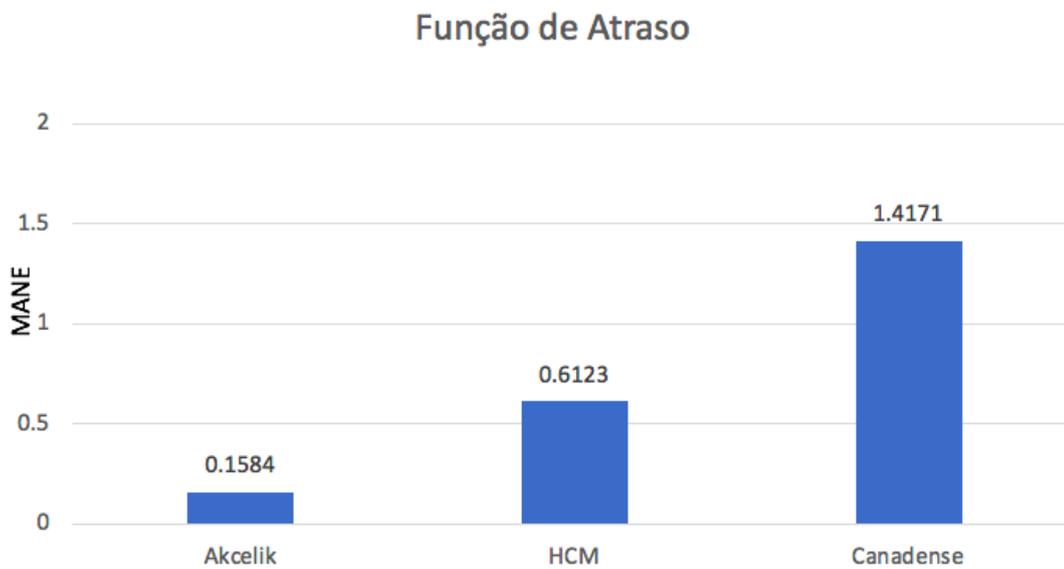
Nesse experimento é realizada a comparação estatística a partir da função $MANE$ das estimativas de tempo de atraso obtidas pela aplicação dos modelos de atraso dependentes do tempo mais utilizados na literatura com o valor de atraso obtido em campo para rede de tráfego do Bairro Floresta, são eles:

1. Modelo de atraso australiano proposto por Akcelik em (??) e (??) - $a_{akcelik}$
2. Modelo de atraso estadunidense proposto pelo Manual Highway Capacity Manual (HCM) em (??) - a_{HCM}

3. Modelo de atraso Canadense proposto em (??) - $a_{canadense}$

O objetivo deste experimento é definir qual modelo apresenta uma estimativa de atraso mais próxima da realidade e pode ser utilizada para o cálculo do tempo de atraso pelo modelo CAPSI associado aos algoritmos evolucionários nos experimentos desta tese. Os resultados experimentais obtidos a partir da execução do experimento $E2$ podem ser observados na Figura 14.

Figura 14 – Experimento $E2$.



A partir deste gráfico, é possível observar que o modelo de atraso que gerou um valor de $MANE$ (diferença entre o atraso observado e o estimado) menor foi o modelo proposto por (??) e (??), com o valor $MANE$ igual a 0.1584. Assim, pode se afirmar, estatisticamente, que o modelo de estimativa de atraso do Akcelik é melhor do que demais para estimar essa medida, já que obteve um valor menor de diferença do tempo de atraso observado que os outros modelos (1, 4171 para o modelo Canadense e 0, 6123 para o estadunidense).

5.2.3 Experimento $E3$

Após a calibração dos parâmetros comportamentais do modelo de simulação do AIMSUN no experimento $E1$ e da definição da função de atraso que será utilizada pelos algoritmos evolucionários (modelo de atraso do Akcelik) a partir da execução de $E2$, o experimento $E3$ é realizado. Em $E3$, experimento principal deste trabalho, o modelo CAPSI, associado ao uso de uma solução teste de IC - o algoritmo genético, é usado para otimizar as seguintes configurações das variáveis de decisão (Tabela 12):

Como mencionado anteriormente, o período de simulação é de 2 horas, por ser considerado tempo suficiente para que a rede alcance um regime de estado permanente. Para cada

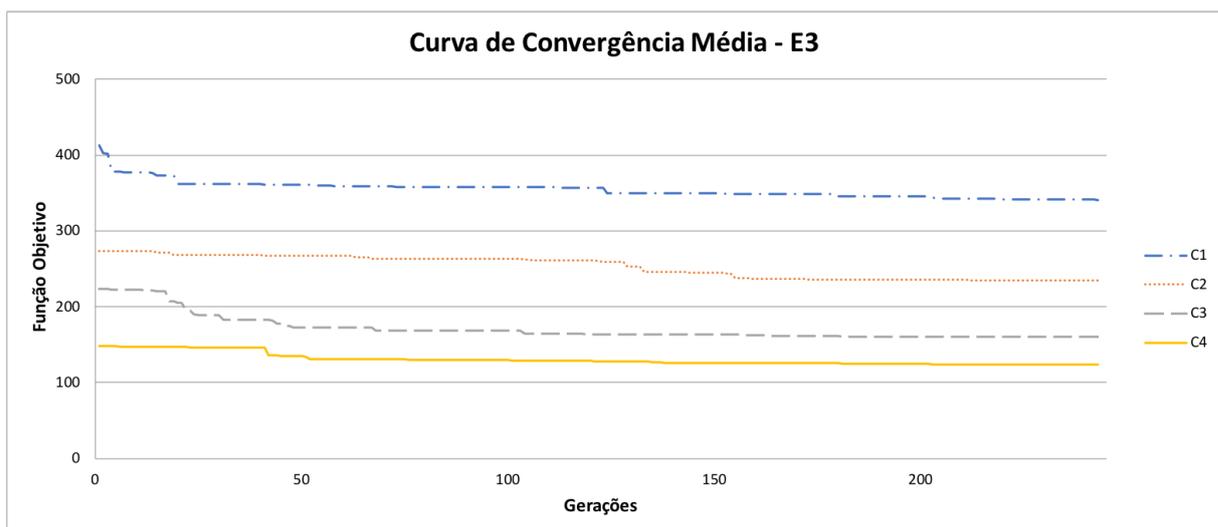
Tabela 12 – Experimentos.

Configuração	Variável de Decisão
$C1$	x
$C2$	$x - c$
$C3$	$x - c - s$
$C4$	$x - c - s - o$

intervalo de tempo de ciclo deste período, o simulador recebe um novo plano semafórico (com novos tempos verdes x , tempo de ciclo c , sequência de fases s e defasagem o) do AG. Seria inviável, neste trabalho, mostrar a curva de convergência média para todos os parâmetros de controle semafóricos gerados pelos algoritmos, ou seja todas as 80 configurações de parâmetros semafóricos otimizadas durante cada intervalo de tempo de ciclo durante as 2 horas de simulação. Assim, o experimento $E3$ foi registrado nessa tese, utilizando uma instância do problema como exemplo, ou seja, um intervalo específico de simulação escolhido aleatoriamente, com o objetivo de demonstrar um conjunto de valores dos parâmetros semafóricos eficiente para o problema de minimização do tempo de atraso do veículos na rede de tráfego em estudo.

A partir deste experimento, deseja-se verificar se a otimização da configuração $C4$ associada ao modelo CAPSI (proposta deste trabalho) apresenta valores de estimativa de atraso melhores do que as demais configurações. Os resultados experimentais de $E3$ podem ser observados a partir do gráfico da curva de convergência média da [Figura 15](#).

Figura 15 – Experimento $E3$.



A curva de convergência média mostra a classificação média do melhor indivíduo da população na função objetivo para todas as gerações, com base em 30 execuções do AG usando as configurações $C1$, $C2$, $C3$ e $C4$ como variáveis de decisão para o modelo CAPSI. Analisando o experimento, percebe-se que as curvas do gráfico diminuem para valores

cada vez menores da função objetivo (tempo de atraso). Este fato suporta a hipótese de que algoritmos evolucionários podem ser usados para encontrar boas configurações dos parâmetros semaforicos que minimizem o tempo de atraso dos veículos nas interseções.

Pode-se observar, a partir da análise do gráfico da [Figura 15](#), que a otimização de todos os parâmetros semaforicos (tempos de verde x , tempo de ciclo c , sequência de fases s e defasagem o) proposta pela configuração $C4$ converge para valores menores de tempo de atraso do que as demais configurações. No experimento $E3$, com 220 gerações, o AG utilizando $C4$ converge para um valor mínimo de 123,85 segundos de tempo de atraso, enquanto que, utilizando $C1$, $C2$ e $C3$ os valores encontrados de tempo de atraso, com 220 gerações, são 340,84, 234,36 e 160,03 segundos, respectivamente.

No entanto, para comparar estatisticamente estas amostras, deve ser realizado um teste de hipóteses. Para tal, é necessário verificar os pressupostos dos testes tradicionais para decidir qual procedimento de teste utilizar: paramétrico se os pressupostos são atendidos ou não paramétricos caso o contrário. Um dos pressupostos mais importantes é o de normalidade dos dados e, para checar tal suposição para os dados da tese, usamos o teste de *Shapiro-Wilk* através do *software* R. A hipótese nula deste teste é que a amostra provém de uma população normal, que, ao aplicar o teste para nossos dados, foi rejeitada pois o p-valor do teste foi menor que qualquer nível de significância adotado.

Como a suposição de normalidade para as amostras foi rejeitada, optou-se por uma alternativa não paramétrica para as diversas comparações desta tese. O teste utilizado é denominado teste de *Kruskal Wallis* kw_0 , que não considera a normalidade como pressuposto, conforme observado em [??](#)) e [??](#)).

Além disso, o pressuposto de homoscedasticidade (que é o termo para designar variância constante dos resíduos), analisado a partir do teste de *Bartlett* no R, também não foi observado para as distribuições desse experimento, somente o teste de independência (a partir do teste de análise dos resíduos). Portanto o teste não paramétrico kw_0 , para as quatro configurações ou amostras ($k = 4$), dado pela [Equação 27](#), se apresenta adequado para a análise em questão.

$$kw_0 = \left[\frac{12}{(N(N+1))} \right] \left[\frac{\sum R_1^2}{n_1} + \frac{\sum R_2^2}{n_2} + \frac{\sum R_3^2}{n_3} + \frac{\sum R_4^2}{n_4} \right] - 3(N+1), \quad (27)$$

em que:

- N é o total de elementos em todas as amostras,
- n_1, n_2, n_3 e n_4 são a quantidade de elementos em cada configuração e
- $\sum R_1, \sum R_2, \sum R_3$ e $\sum R_4$ são as somatórias dos postos em cada configuração $C1, C2, C3$ e $C4$, respectivamente.

Nesse teste, a hipótese nula estabelece que a diferença entre os efeitos do tratamento τ_{C1} , τ_{C2} , τ_{C3} e τ_{C4} das respostas de cada configuração, respectivamente, é igual a zero, ou seja, não há diferença entre os efeitos. A hipótese alternativa estabelece há diferença entre os efeitos.

$$\text{Teste de Hipóteses } kw_0 = \begin{cases} H_0 : \tau_{C1} = \tau_{C2} = \tau_{C3} = \tau_{C4}, \\ H_1 : \tau_{C1}, \tau_{C2}, \tau_{C3} \text{ e } \tau_{C4} \text{ não são todos iguais.} \end{cases} \quad (28)$$

Definindo-se um nível de confiança de 95%, ou seja, nível de significância $\alpha = 0,05$ e sabendo que $k = 4$, obtém-se o valor crítico corresponde ao ponto $Q_{0,95} = 9,48$ para o teste. Como o valor de kw_0 calculado para o experimento $E3$ foi igual a $910,5$, tem-se que $910,5 > 9,48$ e um p -valor menor que $2,2e - 16$, ou seja, menor que o nível de significância α . Um p -valor baixo sugere que a amostra fornece evidências suficientes para rejeitar a Hipótese nula para toda a população. Portanto, com esse resultado, rejeita-se a hipótese nula e se pode afirmar, estatisticamente, que ao menos um das configurações é diferente das demais.

Como teste de *Kruskal-Wallis* foi significativo, uma análise *post-hoc* pode ser realizada para determinar quais configurações diferem entre si, pois o teste kw_0 não apresenta esta informação. Neste sentido, utilizou-se o Teste de *Wilcoxon-Mann-Whitney* no R, para comparações múltiplas, conforme ??).

Este teste permite verificar se o problema usando $C4$ (configuração proposta por este trabalho) apresenta respostas estatisticamente diferente das soluções dadas pelas configurações $C1$, $C2$ e $C3$ separadamente. Adicionalmente, demonstrando que as respostas ou soluções são estatisticamente diferentes, também pode ser verificado, de acordo com os resultados obtidos nas convergências médias, se a configuração $C4$ é melhor do que as outras. Para tal, utilizando o teste de *Wilcoxon-Mann-Whitney*, realizou-se os testes de hipótese cm_1 , cm_2 e cm_3 :

$$\text{Teste de Hipóteses } cm_1 = \begin{cases} H_0 : \tau_{C4} - \tau_{C1} = 0, \\ H_1 : \tau_{C4} - \tau_{C1} < 0. \end{cases} \quad (29)$$

$$\text{Teste de Hipóteses } cm_2 = \begin{cases} H_0 : \tau_{C4} - \tau_{C2} = 0, \\ H_1 : \tau_{C4} - \tau_{C2} < 0. \end{cases} \quad (30)$$

$$\text{Teste de Hipóteses } cm_3 = \begin{cases} H_0 : \tau_{C4} - \tau_{C3} = 0, \\ H_1 : \tau_{C4} - \tau_{C3} < 0. \end{cases} \quad (31)$$

Em todos os testes, os p – valores encontrados foram menores que $2e - 16$, ou seja, p – valores $< 0,05$ (nível de significância). Como estes resultados, rejeitam-se as hipóteses nulas de igualdade entre a solução proposta pela configuração $C4$ e as demais configurações, ou seja, $C1$ em cm_1 , $C2$ em cm_2 e $C3$ em cm_3 . Portanto, pode-se dizer que, com um nível de confiança de 95%, a configuração $C4$ proposta para o problema de otimização deste trabalho, é diferente das demais e, portanto, apresenta menores valores finais de tempo de atraso, sendo assim, a mais adequada como solução para o problema.

O plano semafórico obtido pela otimização do modelo CAPSI, a partir do AG, utilizando-se as variáveis de decisão: tempo de verde x , tempo de ciclo c , sequência de fases s e defasagem o da configuração $C4$, pode ser observado na [Figura 16](#). Utilizando este plano semafórico para as interseções de ID = 1, 2, 3 e 4 da rede de interseções do bairro Floresta, obteve-se um tempo médio de atraso de 123,85 segundos.

Figura 16 – Planos semafóricos obtido pela otimização do modelo CAPSI com $C4$ - Bairro Floresta.

		Interseção ID 1						
Ciclo		0s	20s	40s	60s	80s	100s	110s
GS1		Vermelho				Verde – 55s		A
GS2		Verde – 18s	A	Vermelho				
GS3		Vermelho		Verde – 28s	A	Vermelho		
GS4		Vermelho		Verde – 28s + 3s + 55s				A
		Interseção ID 2						
		Defasagem 5s						
GS1		Vermelho	Verde – 34s			A	Vermelho	
GS2		Vermelho	A	Verde – 34s		A	Vermelho	
GS3		A	Vermelho			Verde – 68s		
		Interseção ID 3						
		Defasagem 8s						
GS1		Vermelho	Verde – 32s			A	Vermelho	
GS2		Verde	A	Vermelho			Verde – 67s	
GS3		Vermelho	Verde – 32s			A	Vermelho	
		Interseção ID 4						
		Defasagem 6s						
GS1		Vermelho	Verde – 38s			A	Vermelho	
GS2		Vermelho	Verde – 38s			A	Vermelho	
GS3		Verde	A	Vermelho			Verde – 63s	

Além dos valores de tempo de verde x para cada grupo semafórico das interseções, pode-se observar, a partir da [Figura 16](#), que a sequência de fases s obtida para a interseção de

$ID1$ foi igual a $[1, 2, 0]$, em que: inicialmente, tem-se a **fase 1** em que o grupo semafórico $GS2$ tem o direito de passagem (primeira indicação de tempo de verde para os semáforos na figura com o valor de 21 segundos de tempo de verde efetivo, que correspondem a 18 segundos de tempo de verde mais 3 segundos de tempo de amarelo). Logo após, na próxima fase (**fase 2**), os grupos semafóricos $GS3$ e $GS4$ têm 31 segundos de tempo de verde efetivo (28 segundos de tempo de verde mais 3 de amarelo) e na última fase (**fase 0**) os grupos semafóricos $GS1$ e $GS4$ têm o direito de passagem com 58 segundos de verde efetivo (55 de tempo de verde mais 3 de amarelo).

Além disso, pode-se observar na figura que o tempo de defasagem o para as interseções $ID2$, $ID3$ e $ID4$, em relação a interseção $ID1$, obtidos pela otimização do CAPSI foi igual a 5, 8 e 6 segundos, respectivamente e o tempo de ciclo c foi igual a 110 segundos para todas as interseções.

5.2.4 Experimento $E4$

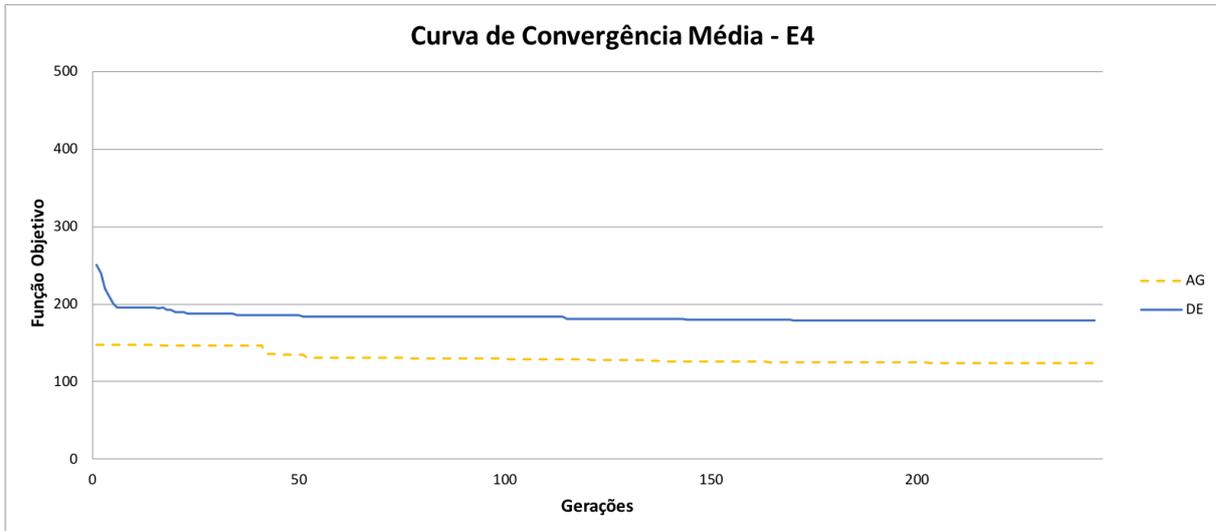
Com o objetivo de apresentar uma nova abordagem para o problema, mostrando a grande capacidade prática do modelo CAPSI associado ao uso de diferentes técnicas de inteligência computacional, foi realizado o experimento $E4$, com o uso do algoritmo de evolução diferencial (DE) comparado ao resultado obtido com o AG (experimento $E3$ utilizando a configuração $C4$), a fim de decidir qual técnica apresenta a melhor solução para o problema, ou seja, uma configuração de tempo de verde, tempo de ciclo, sequência de fases e defasagem que proporcione menores valores de tempo de atraso na rede de interseções utilizada neste experimento.

O experimento $E4$ foi realizado utilizando a mesma instância de $E3$, ou seja, o mesmo intervalo específico de simulação. Então, para o plano semafórico gerado pelo DE, nesse intervalo, o tempo médio de atraso dos veículos foi calculado a partir da função proposta por (??) e (??). O resultado do experimento é mostrado na [Figura 17](#). Na [Figura 17](#) é descrito o conjunto de soluções eficientes geradas pelo DE em comparação com o resultado obtido pelo AG no experimento $E3$ utilizando $C4$.

Pode-se observar, a partir da análise do gráfico da [Figura 17](#), que a curva de convergência média, utilizando tanto o AG quanto o DE, converge para valores mínimos de tempo de atraso a partir das gerações. No experimento $E4$, o AG utilizando $C4$ converge para um valor mínimo de 123,85 segundos de tempo de atraso, enquanto que o DE converge para um valor de 179,35 segundos.

Para comparar estatisticamente estas amostras, foi realizado o teste de *Wilcoxon-Mann-Whitney*, assim como no experimento $E3$. O resultado encontrado no teste mostra um p – valor menor do que $2,2e - 16$, ou seja, menor que o nível de significância 0,05.

Figura 17 – Experimento *E4*



Assim, definindo-se um nível de confiança de 95%, pode-se dizer, estatisticamente, que existe diferença significativa entre as amostras. Portanto, o AG utilizando *C4* apresenta menores valores finais de tempo de atraso do que o DE utilizando a mesma configuração de parâmetros.

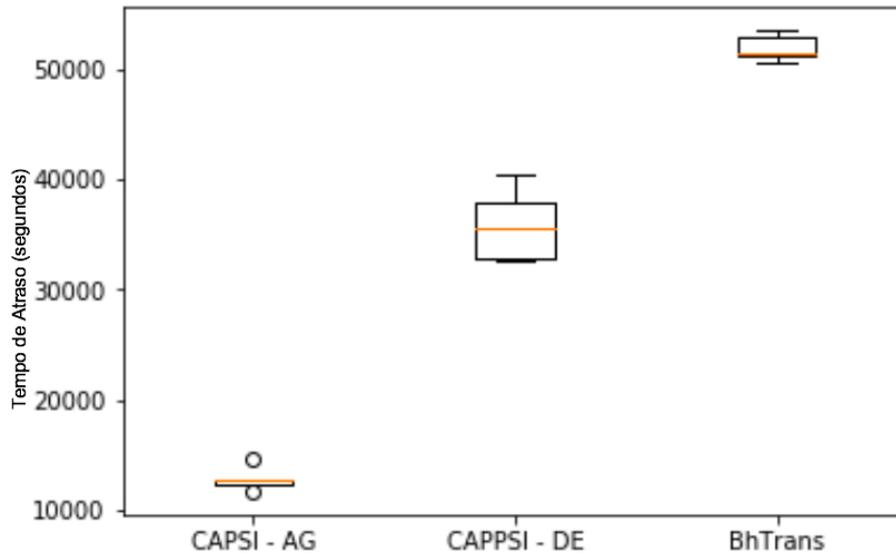
5.2.5 Experimento *E5*

Pode-se observar que os experimentos *E3* e *E4* foram realizados utilizando apenas um determinado plano semafórico obtido em um intervalo específico de simulação, ou seja, usando apenas uma instância do problema.

Para esta instância, o modelo CAPSI foi utilizado na otimização dos parâmetros semafóricos da rede utilizando quatro configurações de valores para os parâmetros (*C1*, *C2*, *C3* e *C4*). Pode-se constatar que a configuração *C4* (modelo CAPSI) utilizando o AG apresentou melhores valores finais de tempo de atraso do que o DE utilizando a mesma configuração de parâmetros.

Com o objetivo de escolher qual destas abordagens (AG ou DE) é a mais eficiente no processo de otimização de todos os planos semafóricos gerados durante todo o período de simulação (2 horas) que minimizem o tempo médio total de atraso da rede, o método de comparação estatística *box plot* foi usado, como mostra a [Figura 18](#). Este método é útil para comparar diferentes conjuntos em relação às a sua homogeneidade e tendências. Outra variável foi adicionado à comparação, o atraso médio total da rede quando o controle ativo não está sendo usado, ou seja, quando a rede está sendo operada com plano semafórico utilizado atualmente pela BHTrans e sem otimização.

Figura 18 – Diagrama *box plot* de comparação entre as soluções - Bairro Floresta.



Assim, na [Figura 18](#), os resultados obtidos com a execução do modelo CAPSI e os algoritmos AG e DE utilizando a configuração *C4*, usando sementes aleatórias para o fluxo de veículos circulando nas vias, foram comparados com os resultados obtidos utilizando o atual plano semafórico da BHTrans, a fim de avaliar se o modelo proposto por este trabalho otimiza as condições de tráfego da região, produzindo resultados melhores do que a solução utilizada atualmente. A técnica que apresentar o menor valor do tempo médio de atraso total para a toda a rede é a melhor solução para o problema. No *box plot*, utilizando-se o CAPSI associado ao AG obteve-se o menor valor de atraso total para todas as interseções da rede. Como não há intersecção entre os quartis do gráfico, é possível comprovar estatisticamente que o AG fornece a melhor solução para o problema no período de tempo considerado para esta comparação.

A partir da análise estatística do gráfico para resultados práticos, pode-se dizer que com o uso do AG e do modelo CAPSI (configuração *C4*) no processo de otimização do plano de controle de tráfego da rede de interseções, pode-se obter uma redução de, aproximadamente, 75,5% do tempo total de atraso médio de veículos, quando comparado com o plano de controle da BHTrans. Isto significa dizer que os veículos vão circular pela região com menor tempo médio de atraso, resultando em uma diminuição do congestionamento do tráfego, porque os veículos vão gastar menos tempo parados nos semáforos.

A [Figura 19](#) apresenta os gráficos temporais dos tempos de verde durante toda a simulação para cada interseção da região do Bairro Floresta. Pode-se observar, a partir da figura, que há oscilação nos tempos de verde para os grupos semafóricos das fases das interseções, respondendo às alterações nas demandas de veículos durante a simulação. Podem ser observados, também, os resultados obtidos pela instância utilizada no experimento *E3* (um

ponto marcado no gráfico como "Instância E3"): o tempo de ciclo igual a 110 segundos; os respectivos tempos de verde e defasagens apresentados no plano semafórico obtido pela configuração C4 em E3 (Figura 16) e marcados por linhas verticais tracejadas na Figura 19. Por fim, a Figura 20 apresenta os tempos de defasagem das interseções ID2, ID3 e ID4 durante toda a simulação e o tempo de defasagem da instância E3 marcado por uma linha vertical tracejada.

5.2.6 Experimento E6

Em E6, para cada interseção, aumentou-se em 50% a demanda de tráfego em determinados movimentos das vias, durante 30 minutos (no intervalo de simulação de 1800 segundos à 3600 segundos, ou seja, de 08:30 às 09:00), com o intuito de verificar se o CAPSI é um modelo sustentável de controle semafórico e se os tempos de verde respondem, em tempo real, às oscilações eventuais que podem ocorrer na quantidade de veículos trafegando nas vias (aumento na demanda de veículos). Na Tabela 13, pode-se observar os grupos semafóricos escolhidos, de forma aleatória, para realizar esse aumento de 50% no fluxo de veículos de seus movimentos para o experimento E6 (dada em veículos por hora).

Tabela 13 – Aumento na Demanda por Interseção.

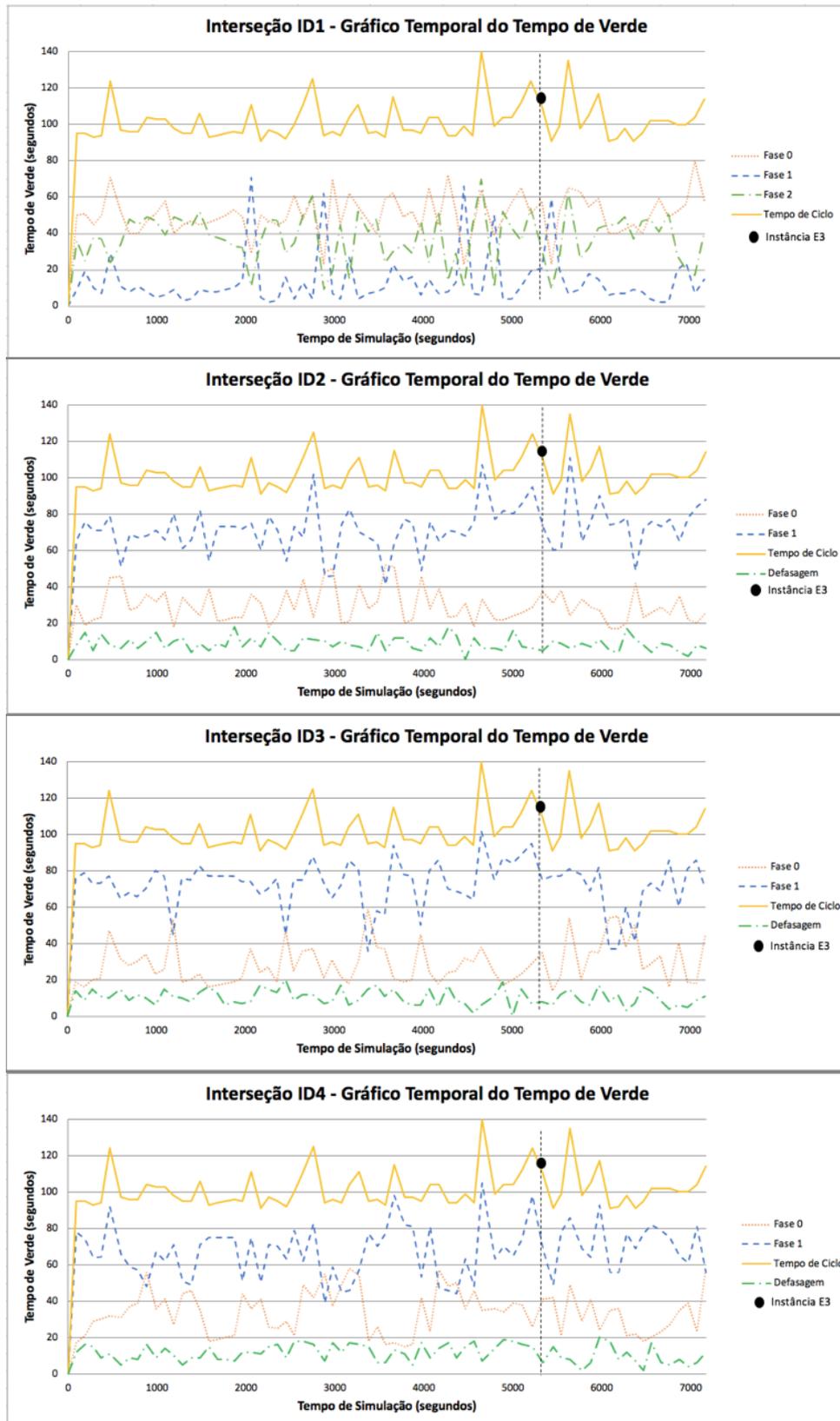
Interseção ID	Fase Escolhida	Grupos Semafóricos	Nova Demanda (v/h)
1	Fase 2	GS3 e GS4	252 v/h para GS3 e GS4
2	Fase 0	GS1 GS2	1236 v/h para GS1 612 v/h para GS2
3	Fase 1	GS2	953 v/h
4	Fase 1	GS3	815 v/h

Na figura Figura 21, pode-se observar o aumento nos tempos de verde nas fases das interseções em que houve o aumento na demanda de tráfego informado pela Tabela 13. A partir da análise desses gráficos, pode-se concluir que o modelo CAPSI responde, em tempo real, às oscilações na demanda de tráfego, indicando o tempo de verde necessário para atender essas oscilações.

Finalmente, a Figura 22 apresenta, para o aumento na demanda proposto pela Tabela 13, os resultados obtidos com a execução do modelo CAPSI e o AG na otimização do controle semafórico comparados com os resultados obtidos utilizando o atual plano semafórico da BHTrans, durante toda a simulação.

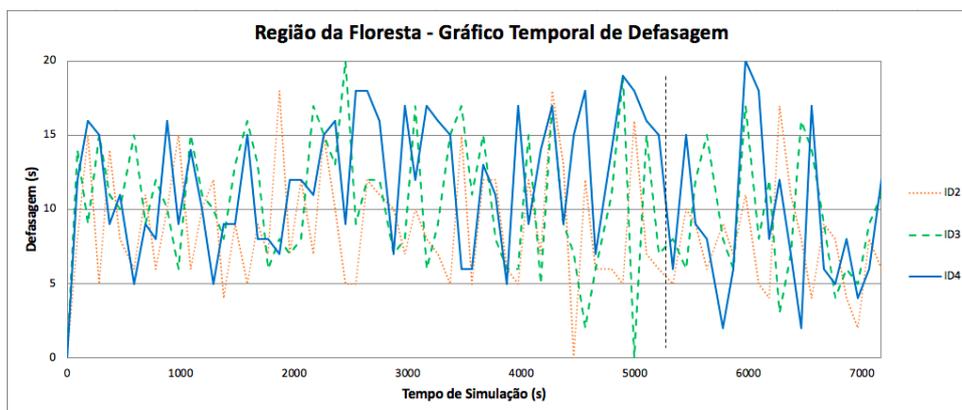
A partir desse gráfico, é possível verificar que diante do aumento da demanda de veículos, o CAPSI ainda otimiza as condições de tráfego da região, produzindo resultados melhores do que a solução utilizada atualmente pela BHTrans, ou seja, planos semafóricos que resultam em um menor valor de atraso total para os veículos nas interseções da rede durante todo o período de simulação. Como não há intersecção entre os quartis do gráfico, é possível

Figura 19 – Valores dos Tempos de Verde durante a simulação.



comprovar estatisticamente que o AG fornece a melhor solução para o problema no período de tempo considerado para esta comparação.

Figura 20 – Valores das Defasagens durante a simulação.



Assim, pode-se dizer, a partir do gráfico, que com o uso do AG e do modelo CAPSI no processo de otimização do plano de controle de tráfego após o aumento na demanda de veículos, obtêm-se uma redução de, aproximadamente, 85,8% do tempo total de atraso dos veículos, quando comparado com a solução da BHTrans. Portanto, o aumento na demanda de veículos resulta em um tempo de atraso ainda maior utilizando o plano semafórico atual da BHTrans para o controle de tráfego da região. Essa constatação sugere que o plano da BHTrans não responde de forma eficiente às oscilações de tráfego.

5.3 Rede de Tráfego - Região da Savassi

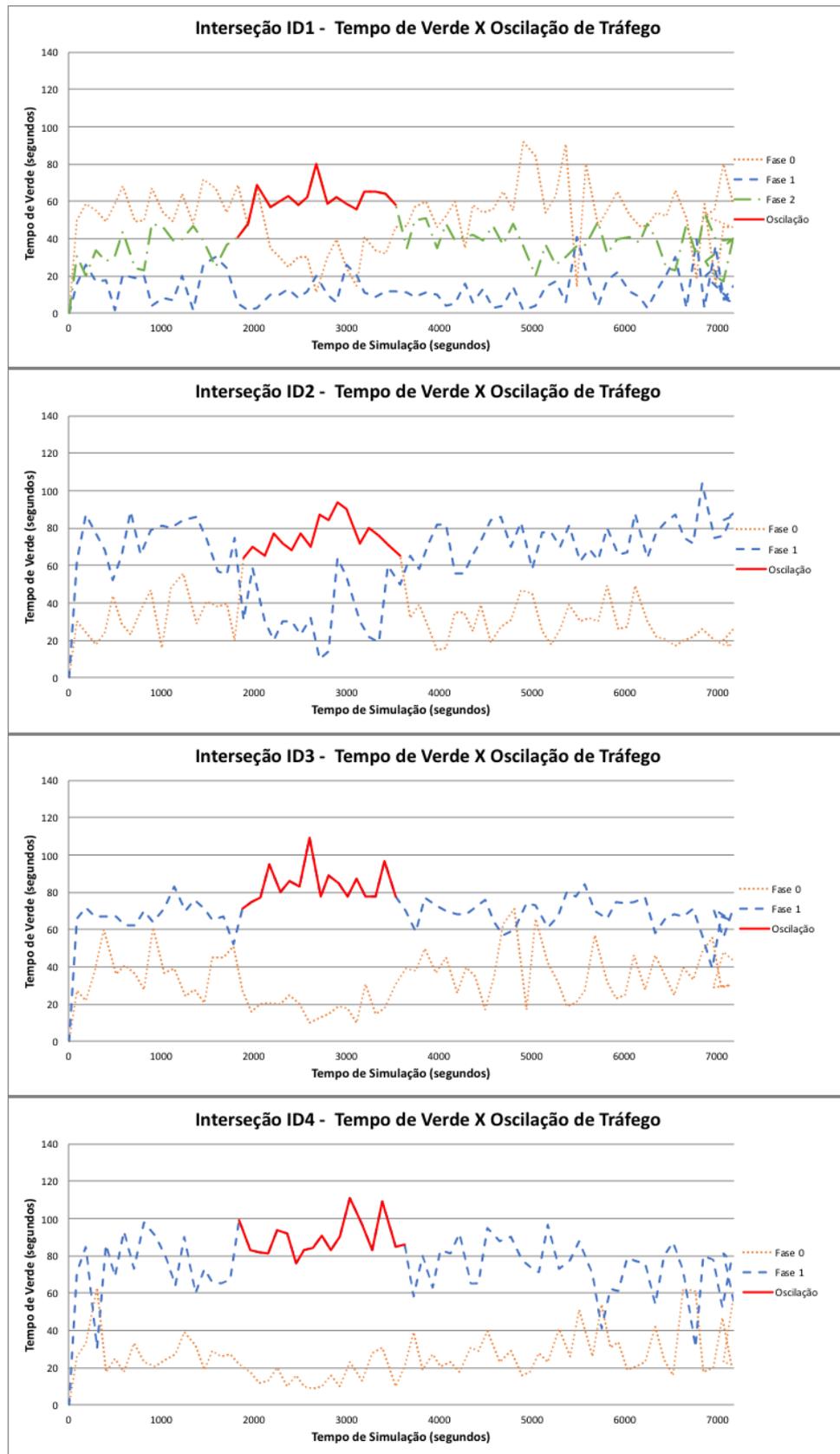
A Rede de Tráfego inserida no AIMSUN e apresentada na (Figura 23) é uma rede de interseções da região da Savassi em Belo Horizonte (Brasil), utilizada para realização dos experimentos *E7*, *E8*, *E9* e *E10*. O objetivo desse experimento é verificar a possibilidade de generalização e adaptabilidade do modelo para emprego em duas regiões diferentes. Esta região é composta pelas três interseções sinalizadas descritas na Tabela 14.

Tabela 14 – Característica das Interseções - Região da Savassi..

ID	Interseção	Número de Movimentos	Número de Fases
1	Contorno com Getúlio Vargas	7	3
2	Getúlio Vargas com Alagoas	5	2
3	Contorno com Alagoas	5	2

Em *E7*, o processo de otimização consiste em obter os tempos de verde x das sete fases dos semáforos das três interseções descritas na Tabela 14, o tempo de ciclo c dos semáforos (valor único para as interseções da rede), a sequência de fases s para interseções com 3 fases ou mais (Interseção de ID = 1) e o tempo de defasagem o para cada interseção. A Tabela 15 mostra o fluxo dos movimentos (dado em veículos por hora) das interseções mostradas pela Tabela 14. Na Tabela 15 todos os movimentos controlados por cada grupo semafórico (GS) são marcados pela cor vermelha.

Figura 21 – Valores dos Tempos de Verde Devido às Oscilações de Tráfego.



A Tabela 16 mostra os movimentos permitidos nas fases dos semáforos de cada intersecção da Tabela 14.

Figura 22 – Diagrama *box plot* de comparação entre as soluções dado um aumento na demanda - Floresta.

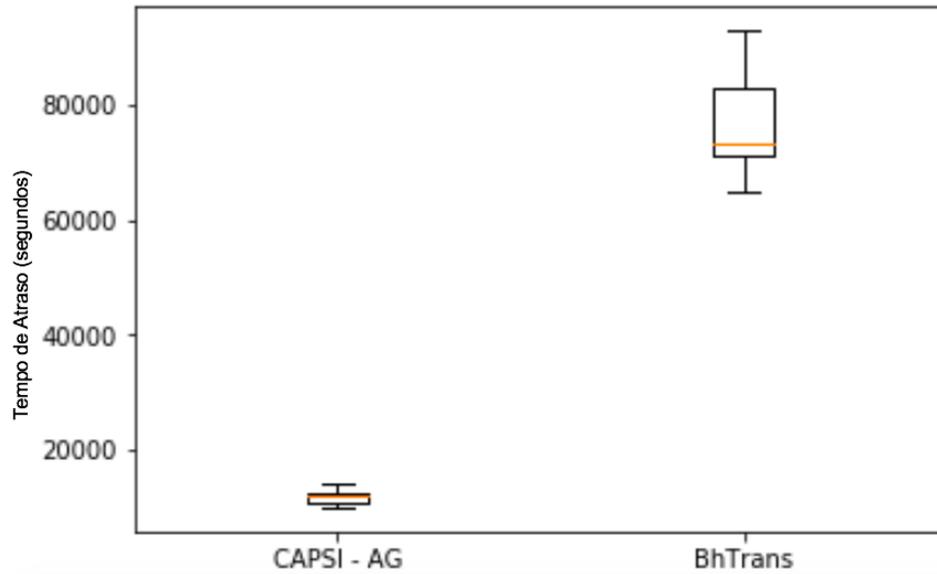
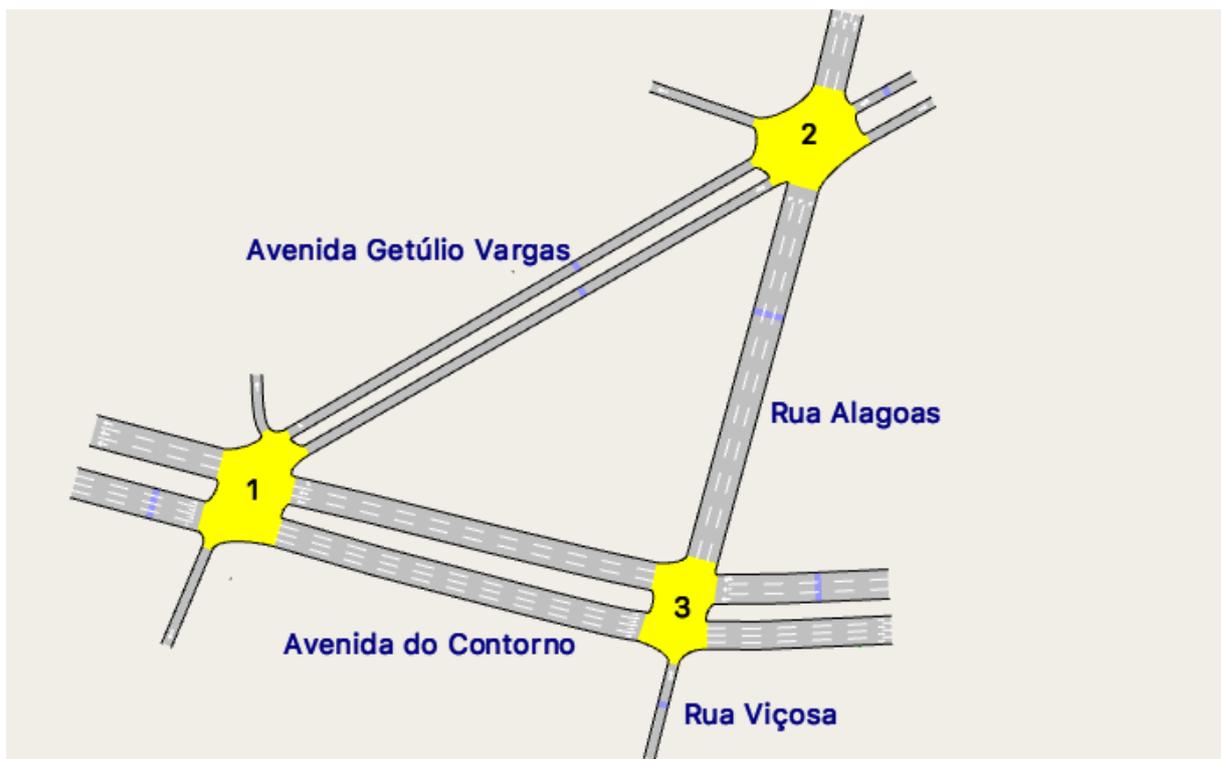


Figura 23 – Rede de Tráfego criada no AIMSUN - Região da Savassi.



A BHTrans forneceu os dados de fluxo de veículos por movimento para as três interseções da região, no período de 08:00 às 14:00 da manhã. A empresa também forneceu o plano de controle semafórico utilizado nas interseções neste período para fins de comparação e que é utilizado com um dos indivíduos na população inicial dos algoritmos, conforme a [Figura 24](#). A partir deste plano semafórico é possível observar o tempo de verde x de cada

Tabela 15 – Características dos movimentos- Região da Savassi.

GS	Interseção ID 1		Interseção ID 2		Interseção ID 3	
	Movimento	v/h	Movimento	v/h	Movimento	v/h
1		532		800		170
2		646		207		428
3		207		608		430
4		207				

Tabela 16 – Característica das Fases.

Fase	Interseção ID 1 Movimentos	Interseção ID 2 Movimentos	Interseção ID 3 Movimentos
0	1, 2	2, 3	2, 3
1	3	1	1
2	1, 4		

grupo semaforico descrito em [Tabela 15](#) e o tempo total de ciclo c fixo igual a 90 segundos.

5.3.1 Experimento $E7$

Em $E7$, o modelo CAPSI, associado ao uso de um AG, é usado para otimizar as configurações $C1$, $C2$, $C3$ e $C4$ que foram apresentadas para o experimento $E3$ da [Subseção 5.2.3](#), só que agora para as interseções da região da Savassi.

Assim como em $E3$, o experimento $E7$ esta sendo registrado, neste texto, utilizando-se uma instância do problema, ou seja, um intervalo específico de simulação escolhido aleatoriamente, com o objetivo de demonstrar um conjunto de valores dos parâmetros semaforicos

Figura 24 – Plano semafórico BHTrans.

Ciclo	Interseção ID 1					
	0s	20s	40s	60s	90s	
GS1	Verde 40s		A	Vermelho		Verde 17s A
GS2	Verde 40s		A	Vermelho		
GS3	Vermelho			Verde 24s	A	Vermelho
GS4	Vermelho				Verde 17s	A
Interseção ID 2						
GS1	Vermelho			Verde – 32s		A
GS2	Verde 52s			A	Vermelho	
GS3	Verde 52s			A	Vermelho	
Interseção ID 3						
GS1	Vermelho			Verde – 41s		A
GS2	Verde 43s		A	Vermelho		
GS3	Verde 43s		A	Vermelho		

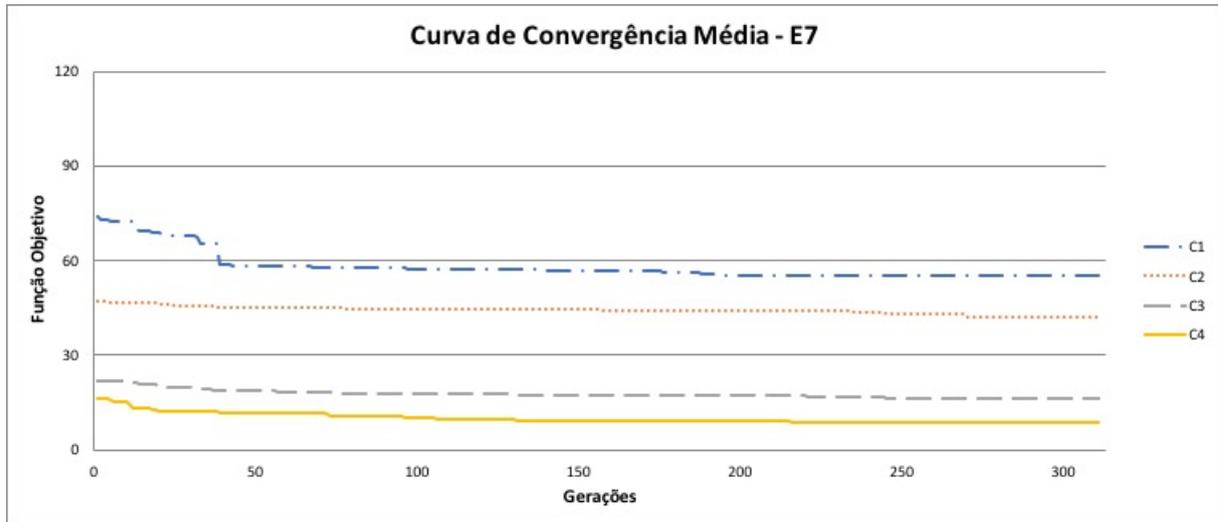
eficiente para o problema de minimização do tempo de atraso do veículos na rede de tráfego da região da Savassi nesse intervalo de tempo. A partir deste experimento, deseja-se verificar se a otimização da configuração C_4 associada ao modelo CAPSI apresenta valores de estimativa de atraso menores do que as demais configurações nessa região.

Os resultados de E_7 podem ser observados a partir do gráfico da curva de convergência média da [Figura 25](#). Analisando o gráfico, percebe-se que as curvas dos gráficos diminuem para valores cada vez menores da função objetivo (tempo de atraso). Pode-se observar que a otimização proposta pela configuração C_4 converge para valores menores de tempo de atraso do que as demais configurações. Com 313 gerações, o AG utilizando C_4 converge para um valor mínimo de 8,87 segundos de tempo de atraso, enquanto que, utilizando C_1 , C_2 e C_3 os valores encontrado de tempo de atraso, após 313 gerações, são 55, 14, 42, 20 e 16, 30 respectivamente.

No entanto, para comparar estatisticamente estas amostras, pode ser realizado um teste de hipóteses. Assim como em E_3 os pressupostos de normalidade e homoscedasticidade não foram observados para as configurações ou amostras utilizadas em E_7 para a região da Savassi. Portanto, optou-se, também, utilizar o teste de *Kruskal Wallis* nesse experimento.

A partir desse teste, pretende-se comparar, para o nível de confiança $\alpha = 0,05$, se o há diferença entre as configurações utilizadas como resposta ou solução para o problema. E, logo após, a partir do teste de *Wilcoxon-Mann-Whitney*, deseja-se verificar se a configuração C_4 é diferente do problema usando C_1 , C_2 e C_3 para o experimento E_7 (Região da Savassi), assim como foi realizado em E_3 (Região do Bairro Floresta). Adicionalmente, demonstrando

Figura 25 – Experimento *E7*.



que *C4* é diferente, também pode ser verificado, de acordo com os resultados obtidos nas convergências médias, que *C4* é melhor do que as demais.

Em *E7*, o valor encontrado para o teste *Kruskal Wallis* foi de 1165,1 e *p* – valor menor que $2,2e - 16$ e para os testes de *Wilcoxon-Mann-Whitney* os *p* – valores foram todos menores de $2e - 16$. Assim, pode-se afirmar que, com 95% de confiança, que existe diferença significativa entre as amostras e, também, que a configuração de parâmetros semafóricos de *C4* apresenta menores valores de tempo de atraso do que as demais configurações, sendo portanto mais adequada para a modelagem do problema na rede de interseções da região da Savassi.

O plano semafórico obtido a partir da otimização do modelo CAPSI (configuração *C4*), a partir do AG, utilizando-se as variáveis de decisão: tempo de verde *x*, tempo de ciclo *c*, sequência de fases *s* e defasagem *o*, pode ser observado na Figura 26. Utilizando-se este plano semafórico para as interseções da região da Savassi desenhada no AIMSUN, obteve-se um tempo médio de atraso de 8,87 segundos.

Pode-se observar, a partir da Figura 26, o tempo de verde *x* para cada grupo semafórico de todas as interseções e a sequência de fases otimizada *s* obtida para a interseção *ID1* igual a $[1, 0, 2]$, em que: inicialmente, tem-se a **fase 1** em que o grupo semafórico *GS3* tem o direito de passagem (primeira indicação de tempo de verde efetivo para os semáforos na figura com o valor de 21 segundos, sendo 18 segundos de tempo de verde e 3 segundos de tempo de amarelo). Logo após, na próxima fase (**fase 0**), os grupos semafóricos *GS1* e *GS2* têm 41 segundos de tempo de verde efetivo (38 de tempo de verde mais 3 de amarelo) e na última fase (**fase 2**) os grupos semafóricos *GS1* e *GS4* têm o direito de passagem com um tempo de verde de 62 segundos (59 de verde e 3 de amarelo).

Figura 26 – Planos semaforicos obtido pela otimização do modelo CAPSI com $C4$.

Ciclo	Interseção ID 1						124s
	0s	20s	40s	60s	80s	100s	
GS1	Vermelho		Verde 38s + 3s + 59s				A
GS2	Vermelho		Verde 38s		A	Vermelho	
GS3	Verde- 18s	A	Vermelho				
GS4	Vermelho				Verde 59s		A
Defasagem 6s Interseção ID 2							
GS1	A	Vermelho		Verde – 96s			
GS2	Verde 19s	A	Vermelho				
GS3	Verde 19s	A	Vermelho				
Defasagem 7s Interseção ID 3							
GS1	A	Vermelho		Verde – 92s			
GS2	Verde 22s	A	Vermelho				
GS3	Verde 22s	A	Vermelho				

Além disso, pode-se observar na figura que o tempo de defasagem σ para as interseções $ID2$ e $ID3$, em relação a interseção $ID1$, obtidos pela otimização do CAPSI foi igual a 6 e 7 segundos, respectivamente e o tempo de ciclo c foi igual a 124 segundos para todas as interseções da região da Savassi.

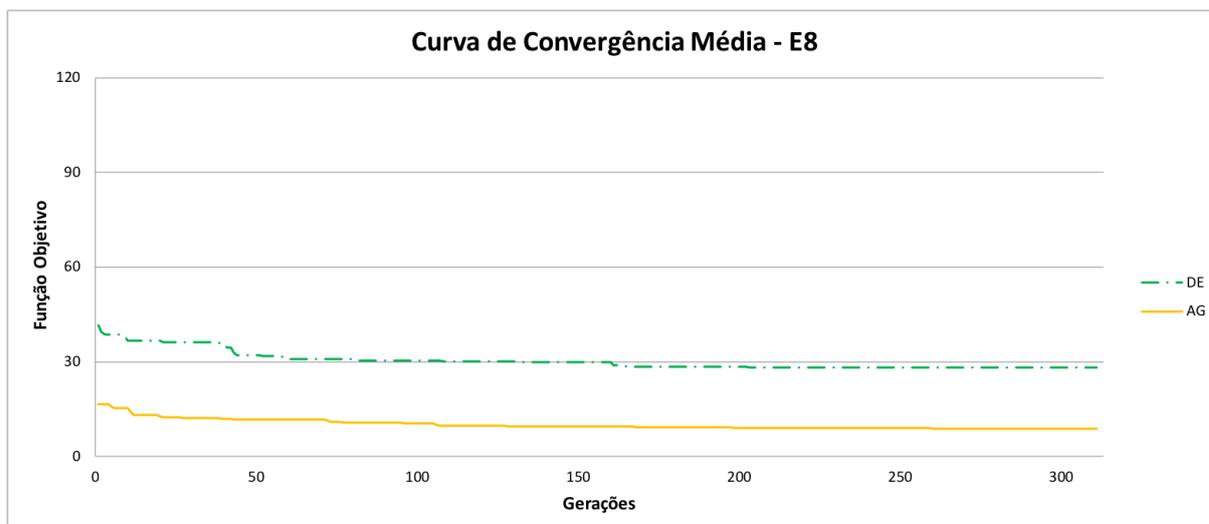
5.3.2 Experimento $E8$

No experimento $E8$, o algoritmo de evolução diferencial (DE) é comparado ao resultado obtido com o AG (experimento $E7$ utilizando a configuração $C4$) para as interseções da região da Savassi, a fim de decidir qual técnica apresenta a melhor solução para o problema na região, ou seja, uma configuração semaforica que proporcione menores valores de tempo de atraso.

O experimento $E8$ foi realizado utilizando a mesma instância de $E7$, ou seja, o mesmo intervalo específico de simulação. Então, para o plano semaforico gerado pelo DE, nesse intervalo, o tempo médio de atraso dos veículos foi calculado e o resultado desse experimento é mostrado na [Figura 27](#). Na [Figura 27](#) é descrito o conjunto de soluções eficientes geradas pelo DE em comparação com o resultado obtido pelo AG no experimento $E7$ utilizando $C4$.

Pode-se observar, a partir da análise do gráfico da [Figura 27](#), que a curva de convergência média, utilizando tanto o AG quanto o DE, converge para valores mínimos de tempo de atraso a partir das gerações. No experimento $E7$, o AG utilizando $C4$ converge para um valor mínimo de 8,87 segundos de tempo de atraso, enquanto que o DE converge para um valor de 28,7 segundos.

Figura 27 – Experimento *E8*



Para comparar estatisticamente estas amostras, foi realizado o teste de *Wilcoxon-Mann-Whitney*. O resultado do *p – valor* encontrado no teste foi menor que $2e - 16$. Assim, definindo-se um nível de confiança de 95%, pode-se dizer, estatisticamente, que existe diferença significativa entre as amostras. Portanto, assim como no bairro Floresta, na região da Savassi (experimento *E8*), o AG, utilizando *C4*, também apresenta menores valores finais de tempo de atraso do que o DE utilizando a mesma configuração de parâmetros.

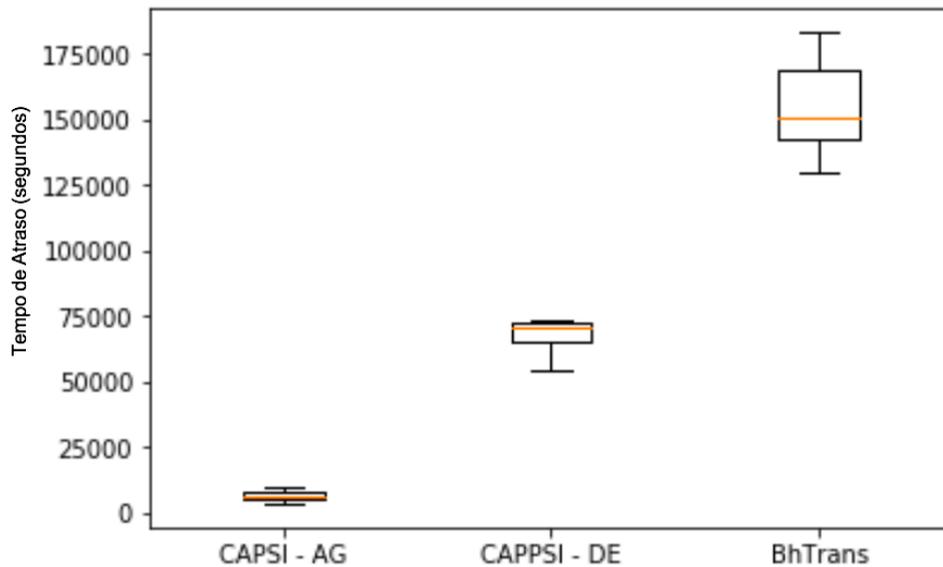
5.3.3 Experimento *E9*

Com o objetivo de escolher qual destas abordagens (AG ou DE) é a mais eficiente no processo de obtenção de todos os planos semafóricos gerados durante todo o período de simulação que minimizem o tempo médio total de atraso da rede, o método de comparação estatística *box plot* foi usado, como mostra a [Figura 28](#). Este método é útil para comparar diferentes conjuntos em relação à sua homogeneidade e tendências. No experimento *E9*, outra variável foi adicionado à comparação, o atraso médio total da rede quando o controle ativo não está sendo usado, ou seja, quando a rede está sendo operada com plano semafórico utilizado atualmente pela BHTrans para a região em questão e sem otimização.

Assim, na [Figura 28](#), os resultados obtidos com a execução do modelo CAPSI e os algoritmos AG e DE utilizando a configuração *C4*, usando sementes aleatórias para o fluxo de veículos circulando nas vias, foram comparados com os resultados obtidos utilizando o atual plano semafórico da BHTrans, a fim de avaliar se o modelo proposto por este trabalho otimiza as condições de tráfego da região, produzindo resultados melhores do que a solução utilizada atualmente.

Assim como o que ocorreu no experimento *E5* em que foi feita a comparação do AG e do

Figura 28 – Diagrama *box plot* de comparação entre as soluções - Bairro Savassi.



DE com a solução da BHTrans para a rede de interseções do bairro Floresta durante todo o período de simulação, em *E9*, utilizando-se o CAPSI associado ao AG, também, obteve-se um menor valor de atraso total para todas as interseções da região da Savassi.

A partir da análise estatística do gráfico para resultados práticos, pode-se dizer que com o uso do AG e do modelo CAPSI (configuração *C4*) no processo de otimização do plano de controle de tráfego da rede de interseções da Savassi, pode-se obter uma redução de, aproximadamente, 95,7% do tempo total de atraso médio de veículos, quando comparado com o plano de controle da BHTrans.

A [Figura 29](#) apresenta os gráficos temporais dos tempos de verde durante toda a simulação para as interseções da região da Savassi. Pode se observar, na figura, que há oscilação nos tempos de verde para os grupos semafóricos das fases das interseções, respondendo às alterações nas demandas de veículos durante toda a simulação. Podem ser observados, também, os resultados obtidos pela instância utilizada no experimento *E7* (um ponto marcado no gráfico como "Instância *E7*"): o tempo de ciclo igual a 124 segundos, os respectivos tempos de verde e defasagens apresentados no plano semafórico de *E7* ([Figura 26](#)) e marcados por linhas verticais tracejadas na [Figura 29](#).

Por fim, a [Figura 30](#) apresenta os tempos de defasagem das interseções *ID2* e *ID3* durante toda a simulação e o tempo de defasagem da instância *E7* marcado por uma linha vertical tracejada.

Figura 29 – Valores dos Tempos de Verde durante a simulação.

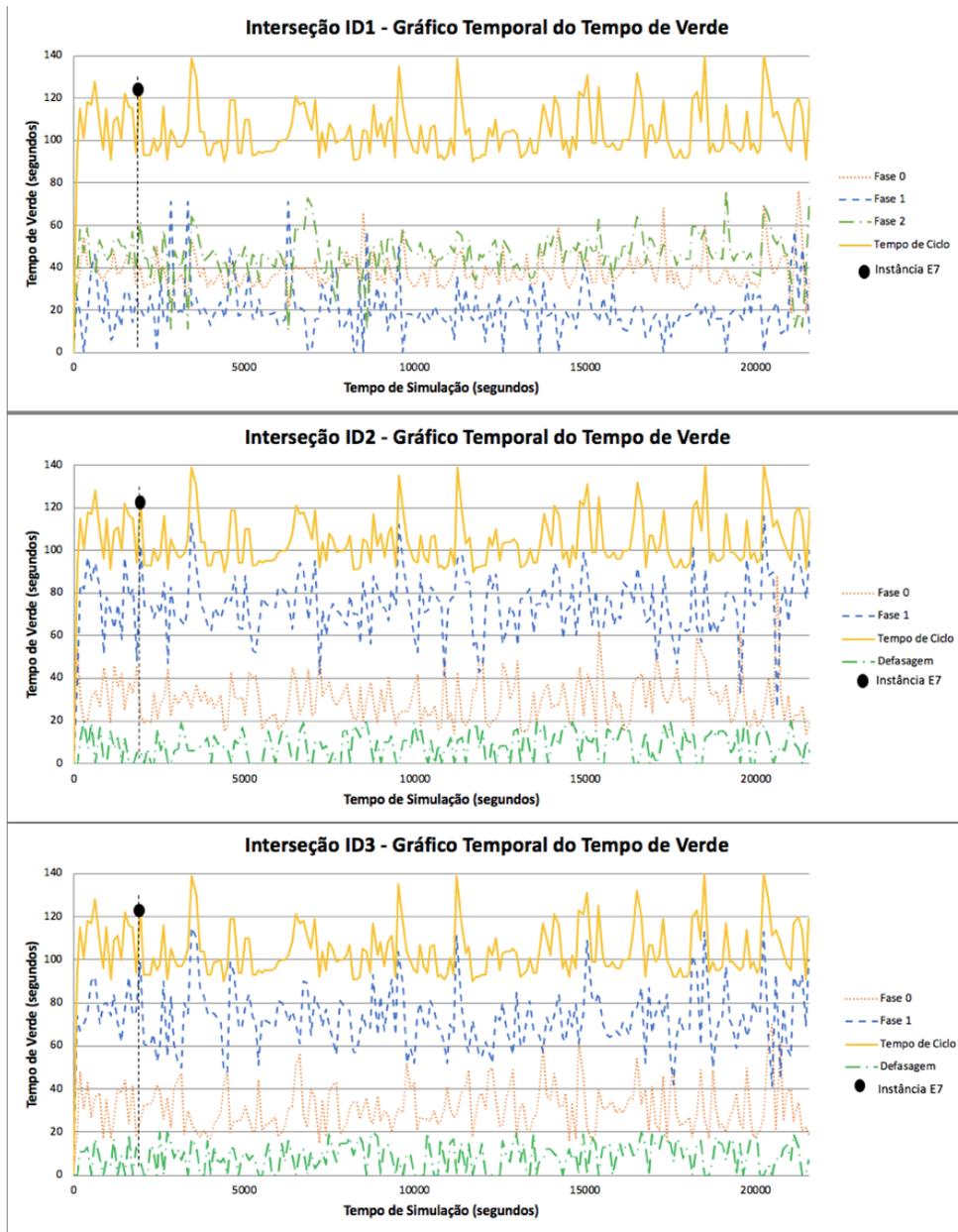
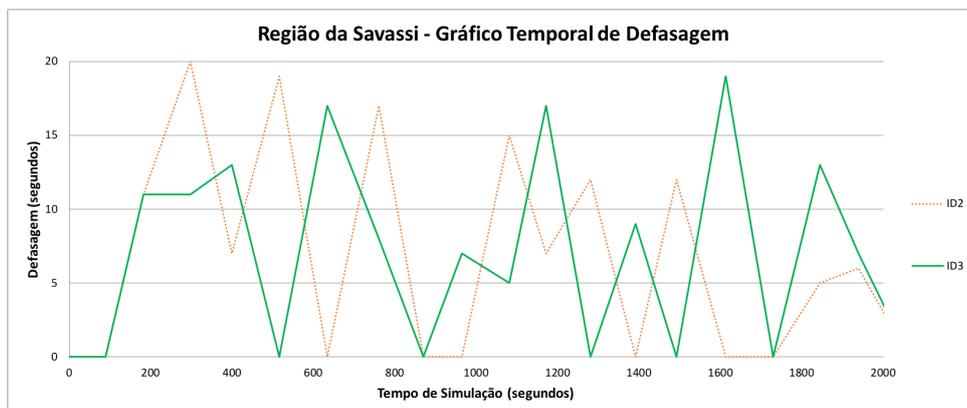


Figura 30 – Valores das Defasagens durante a simulação.



5.3.4 Experimento *E10*

Em *E10*, assim como foi feito em *E6*, para cada interseção, aumentou-se em 50% a demanda de tráfego em determinados movimentos das vias controladas por grupos semafóricos pertencentes às fases das interseções, durante 30 minutos (no intervalo de simulação de 3600 segundos à 5400 segundos, ou seja, de 09:00 às 09:30), com o intuito de verificar se o CAPSI apresenta um modelo sustentável de controle semafórico também nas interseções da região da Savassi. Na [Tabela 17](#), pode-se observar as fases escolhidas das interseções, de forma aleatória, para realizar o aumento de 50% no fluxo dos movimentos (dados pro veículos por hora) no intervalo de 09:00 às 09:30 para realização do experimento *E10*.

Tabela 17 – Aumento na Demanda por Interseção - Região da Savassi.

Interseção ID	Fase Escolhida	Grupos Semafóricos	Nova Demanda (v/h)
1	Fase 2	GS1 GS4	785 v/h para GS1 311 v/h para GS4
2	Fase 0	GS2 GS3	311 v/h para GS2 912 v/h para GS3
3	Fase 0	GS2 GS3	642 v/h para GS2 645 v/h para GS3

Na figura [Figura 31](#), pode-se observar o aumento nos tempos de verde nas fases das interseções em que houve o aumento na demanda de tráfego informado pela [Tabela 17](#). A partir da análise desses gráficos, pode-se concluir que o modelo CAPSI responde, em tempo real, às oscilações na demanda de tráfego também na região da Savassi, indicando o tempo de verde necessário para atender essas oscilações.

Finalmente, a [Figura 32](#) apresenta, para o aumento na demanda proposto pela [Tabela 17](#), os resultados obtidos com a execução do modelo CAPSI e o AG na otimização do controle semafórico comparados com os resultados obtidos utilizando o atual plano semafórico da BHTrans, durante toda a simulação.

A partir desse gráfico, é possível verificar que diante do aumento da demanda de veículos, o CAPSI ainda otimiza as condições de tráfego da região, produzindo resultados melhores do que a solução utilizada atualmente pela BHTrans.

Assim, pode-se dizer, a partir do gráfico, que com o uso do AG e do modelo CAPSI no processo de otimização do plano de controle de tráfego dessa região, obtêm-se uma redução de, aproximadamente, 96,5% do tempo total de atraso dos veículos, quando comparado com a solução da BHTrans. Portanto, assim como no bairro Floresta (experimento *E6*), o aumento na demanda de veículos na região da Savassi também resulta em um tempo de atraso ainda maior utilizando o plano semafórico da BHTrans para o controle de tráfego da região.

Figura 31 – Valores dos Tempos de Verde Devido às Oscilações de Tráfego - Savassi

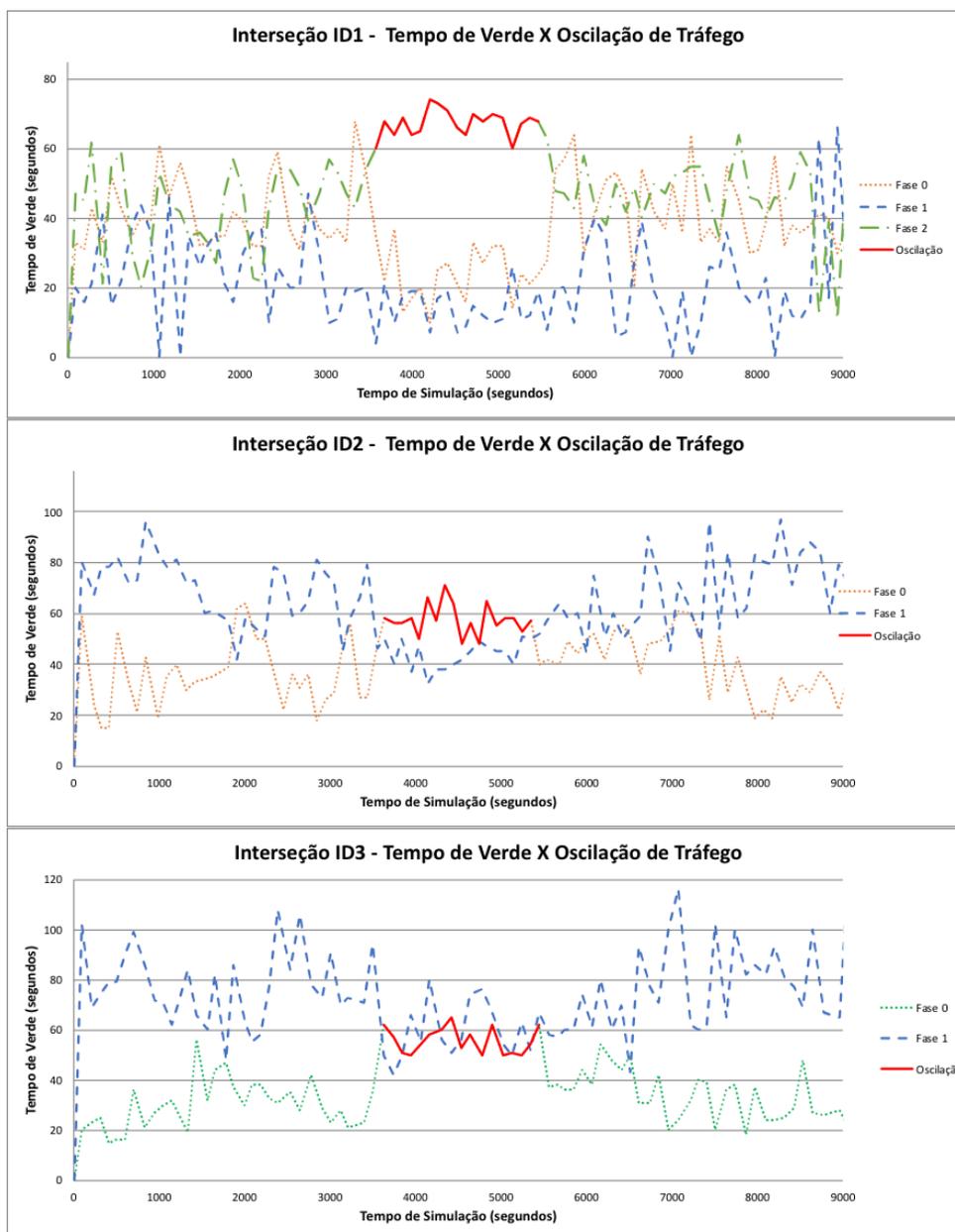
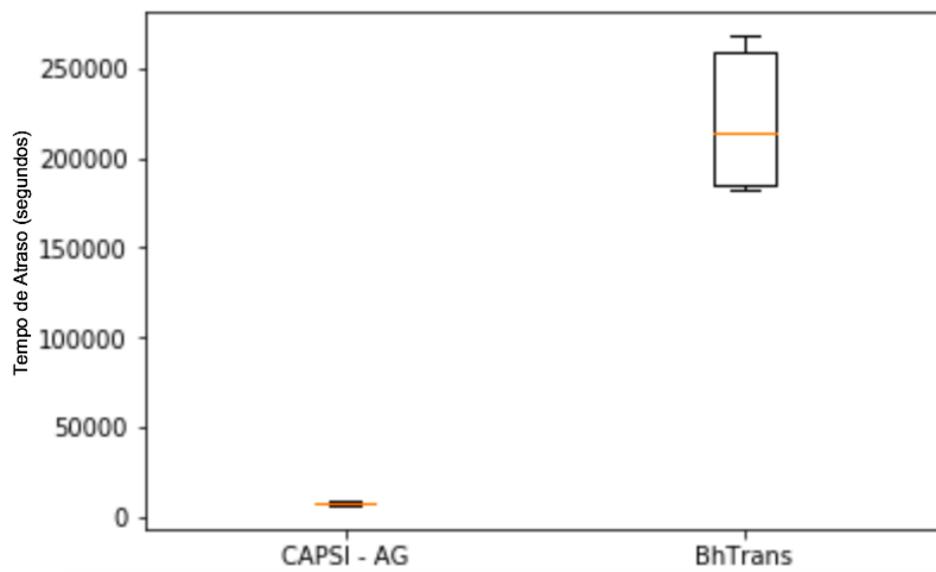


Figura 32 – Diagrama *box plot* de comparação entre as soluções dado um aumento na demanda - Savassi.



Capítulo 6

Discussões Finais

Este capítulo apresenta as discussões finais desta tese, os resultados obtidos a partir dos experimentos, mostrando a aplicabilidade da proposta apresentada, e as considerações finais de pesquisa.

6.1 Discussão sobre os Resultados

Esta tese apresentou uma nova proposta de controle de tráfego ativo, denominada CAPSI, que utiliza técnicas de IC para otimizar os parâmetros do controle semafórico de interseções, em tempo real, de acordo com a demanda obtida a cada intervalo de tempo de ciclo de semáforos.

O trabalho mostrou a viabilidade da proposta a partir de um estudo de caso real. Primeiramente, foi realizada a calibração dos parâmetros comportamentais do modelo de simulação microscópica, a fim de aproximar os experimentos das condições reais da região utilizada no estudo de caso. Logo após, um experimento com as funções de atraso mais utilizadas na literatura foi realizado e os resultados mostraram que o modelo para calcular o tempo de atraso proposto por Akcelik apresenta uma melhor estimativa para o indicador e, portanto, foi o modelo utilizado como medida de desempenho nessa tese.

O modelo CAPSI, independente de simulação para avaliar a qualidade das soluções, proposto por este trabalho, foi implementado e associado ao uso de técnicas de IC para otimizar os parâmetros semafóricos (tempo de verde, tempo de ciclo, sequência da fases e defasagem) de redes de interseções do bairro Floresta e da região da Savassi, ambos em Belo Horizonte. Os resultados mostraram que o modelo CAPSI, na otimização de todos esses parâmetros, apresenta menores valores de tempo de atraso do que utilizando um número menor de parâmetros no processo de otimização para ambas as regiões.

Foram realizados dois experimentos para a comparação entre a eficiência do AG e o

uso de outra técnica de IC, o algoritmo DE, no problema de otimização com o uso do CAPSI, na região da Floresta e na Savassi. O simulador AIMSUN foi utilizado para realizar os experimentos e testes estatísticos para avaliar os resultados, a fim de encontrar qual técnica é mais eficiente na otimização do plano de controle semafórico das interseções. Os resultados preliminares mostraram que o AG encontrou a melhor solução para o problema, ou seja, encontrou o plano semafórico que obteve o menor valor de tempo médio de atraso nas duas redes de tráfego utilizadas nos experimentos.

Os resultados obtidos com a aplicação do modelo CAPSI e dos algoritmos de otimização (AG e DE), para as duas regiões, foram comparados com os resultados obtidos utilizando-se o atual plano semafórico da BHTrans. O objetivo, naqueles experimentos, foi avaliar se o modelo proposto por esta tese otimiza as condições de tráfego da região, produzindo resultados melhores do que a solução utilizada atualmente pela BHTrans, mostrando a relevância deste trabalho para a sociedade e para o local em que foi feito o estudo de caso. Os resultados mostraram que o AG foi capaz reduzir o tempo de atraso médio total das duas redes de tráfego em estudo, quando comparado ao plano de controle atual utilizado pela BHTrans. Na vida real, isso significa menos tempo gasto no trânsito, promovendo um fluxo de tráfego mais rápido.

Além disso, foi observado, a partir de experimentos, que o aumento na demanda de veículos resulta em um tempo de atraso maior utilizando o plano semafórico da BHTrans para o controle de tráfego das duas regiões. A análise destes resultados demonstra que o modelo CAPSI pode ser implementado e associado a ferramentas de IC no processo de otimização do plano semafórico, apresentando melhores resultados de tempo de atraso.

A fim de expandir a utilização do modelo, pretende-se como trabalhos futuros:

- Adicionar novas medidas de desempenho de controle para redes de tráfego ao modelo CAPSI, como por exemplo a minimização do tempo médio de viagem e da emissão de poluentes;
- Testar o modelo com outras técnicas de IC, para explorar diferentes opções no processo de otimização do CAPSI, como por exemplo, o algoritmo de colônia de formigas (ACO). Alguns trabalhos abordam estas técnicas para tratar diferentes problemas de controle do plano semafórico de interseções, como pode ser visto em (??), (??), (??), (??), (??).
- Expandir o modelo para considerar outras variáveis de projeto, como por exemplo, a indicação do direito de passagem nos semáforos para veículos de emergência ao perceber a aproximação desses veículos em interseções semafóricas;
- Estudar a possibilidade do desenvolvimento de um modelo preditivo para o controle de semáforos, em tempo real;
- Adicionar o semáforo para pedestre no processo de otimização do modelo CAPSI.

6.2 Contribuições Esperadas

A partir do desenvolvimento desta tese foi possível observar que várias abordagens, com o uso de diferentes métodos e técnicas de IC, foram propostas para otimização do controle semafórico de interseções, tanto em interseções isoladas ou em rede quanto com o uso de diferentes medidas de desempenho e variáveis de decisão ou projeto.

Espera-se que o desenvolvimento desse trabalho possa auxiliar a suprir algumas limitações apresentadas na literatura, com o desenvolvimento um modelo de controle ativo de tráfego que otimize os principais parâmetros do controle semafórico, contribuindo, assim, para as pesquisas científicas em Sistemas Inteligentes de Transporte e na definição de estratégias para melhorar a mobilidade urbana.

Assim, este trabalho tem como contribuição para o meio acadêmico a proposição e implementação de um modelo inovador, que associa técnicas de ITS, como o controle ativo de tráfego, a métodos de IC, como os algoritmos evolucionários, na otimização do principais parâmetros do controle semafórico. Para tal, esse modelo, denominado CAPSI, simula a realimentação em tempo real do sistema de controle em interseções em rede, atendendo ao objetivo de minimizar o tempo de atraso dos veículos nesta rede.

Algumas publicações são frutos desse trabalho, como pode ser observado abaixo. Além disso, um artigo foi recentemente aceito para publicação na revista *Transport Research Procedia* - *qualis* B2, outro foi submetido para publicação na revista *Transport Reviews* - *qualis* A2 e há previsão de submissão de mais dois artigos em revistas em breve e um artigo em congresso.

- Artigos publicados em revistas:, (??), (??) e (??);
- Trabalhos completos publicados em anais de congressos: (??), (??) (??), (??).

No contexto tecnológico, esta pesquisa contribuiu com a criação de um modelo de fácil aplicação prática, pois o mesmo não depende da simulação para avaliar as soluções do problema, o que é uma vantagem deste trabalho, já que isto é um dos grandes problemas nas abordagens anteriores pois torna o processo de busca lento e de difícil adaptação e utilização no mundo real.

E, finalmente, a contribuição no âmbito socioeconômico e ambiental pode ser observada a partir dos resultados obtidos com a execução dos experimentos, pois os mesmos comprovam a eficácia do modelo no auxílio ao controle da temporização semafórica de interseções, gerando melhores configurações de planos semafóricos que minimizam o tempo médio de atraso dos veículos em redes de interseções, o que pode resultar numa maior fluidez de veículos e, conseqüentemente na redução do congestionamento e todas as conseqüências proporcionadas por ele na vida das pessoas. Um controle de semáforos eficiente pode

otimizar a infraestrutura viária como um todo, evitando a construção de uma infraestrutura pesada na região (como viadutos, por exemplo) e contribuir com a diminuição de emissão de poluentes na atmosfera.