

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE INFORMÁTICA E
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETRÔNICA

LUCIANO URGAL PANDO
STEFAN CAMPANA FUCHS

**SIMULAÇÃO E OTIMIZAÇÃO DA PROGRAMAÇÃO
SEMAFÓRICA DE UMA REGIÃO DE CURITIBA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA

2015

LUCIANO URGAL PANDO
STEFAN CAMPANA FUCHS

**SIMULAÇÃO E OTIMIZAÇÃO DA PROGRAMAÇÃO
SEMAFÓRICA DE UMA REGIÃO DE CURITIBA**

Trabalho de Conclusão dos Cursos de Bacharelado em Sistemas de Informação e de Engenharia de Computação apresentado ao Departamento Acadêmico de Informática e Departamento Acadêmico de Eletrônica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná como requisito parcial para obtenção dos títulos de “Bacharel em Sistemas de Informação” e “Engenheiro de Computação”.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Lüders

Co-orientadora: Prof^a. Dr^a. Keiko Verônica Ono
Fonseca

Co-orientadora: Prof^a. Dr^a. Myriam Regattieri
Delgado

CURITIBA

2015

AGRADECIMENTOS

Agradecemos à SETRAN, URBS e Prefeitura de Curitiba por nos disponibilizar dados reais de tráfego para uso neste trabalho¹. Especificamente, agradecemos também ao Pedro Darci da Silva Junior, Edimilson Merlin e Solange Arasaki da SETRAN, Júlio Panício da URBS e Rosane Fante Garcia Kupka da Prefeitura de Curitiba. Todos foram essenciais para o cumprimento deste trabalho.

Agradecemos também aos orientadores desse trabalho, que nos auxiliaram e orientaram durante todo o andamento do trabalho, não apenas do começo ao fim, como também antes mesmo deste ser iniciado – uma vez que a conexão já existente com a SETRAN foi fruto de trabalho anterior destes, e se fez fundamental.

¹O acesso aos dados reais do tráfego desta região está amparado pelo Termo de Entendimento 21158 de 12/11/2013 entre Instituições Brasileiras e Suecas para "Promover o Desenvolvimento Urbano Sustentável em Curitiba" e respectiva Portaria 0639/2014 da UTFPR designando seus representantes institucionais.

RESUMO

PANDO, Luciano U.; FUCHS, Stefan C.. SIMULAÇÃO E OTIMIZAÇÃO DA PROGRAMAÇÃO SEMAFÓRICA DE UMA REGIÃO DE CURITIBA. 94 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Departamento Acadêmico de Informática e Departamento Acadêmico de Eletrônica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2015.

O controle de temporização de semáforos em Curitiba é realizado atualmente pelo Centro de Controle Operacional do município. A cidade é dividida em 33 diferentes regiões semaforicas, cada uma com uma tabela de planos específica. No Centro de Controle, muitos aspectos dos planos de programação semaforica são determinados manualmente, tendo muita carga de experiência de engenheiros e técnicos. Um sistema de computação, capaz de processar os dados de sensores de tráfego disponíveis e propor, por exemplo, alternativas às programações semaforicas atuais, pode ser de grande auxílio aos operadores do centro de controle. Tendo isso em vista, uma proposta de otimização dos planos semaforicos foi estudada e analisada para uma região específica de Curitiba (no bairro Rebouças). Este projeto tem como objetivo aplicar uma estratégia de otimização com simulação para o ajuste dos planos semaforicos, a partir de dados reais coletados das vias da referida região da cidade. Para isso, são utilizadas ferramentas tecnológicas já existentes (simuladores, bibliotecas de otimização, entre outros), além de algoritmos da literatura, adaptando-os às necessidades e situações reais do tráfego. Um modelo de simulação, utilizando o *software* SUMO, foi criado a partir dos dados cedidos pela SETRAN. A otimização das programações semaforicas foi implementada a partir do algoritmo de Otimização por Enxame de Partículas. Em diversos testes, verificou-se que foi possível obter melhorias em relação ao plano de temporização atual, em situações específicas de tráfego, segundo critérios de atraso médio, tempo de viagem e *throughput*.

Palavras-chave: Controle semaforico; Otimização com simulação; Simulação de tráfego urbano; Geração de rotas; Metaheurística; Otimização por enxame de partículas.

ABSTRACT

PANDO, Luciano U.; FUCHS, Stefan C.. SIMULATION AND OPTIMIZATION OF THE TRAFFIC SIGNAL PLAN OF A REGION OF CURITIBA. 94 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Departamento Acadêmico de Informática e Departamento Acadêmico de Eletrônica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2015.

The traffic light control in Curitiba is currently held by the Municipal Operational Control Center. The city is divided into 33 different semaphoric regions, each with one specific timing table. In the Control Center, many aspects of traffic signal plans are determined manually, with a heavy load of engineers' and technicians' experience. A computer system capable of processing the traffic sensors data available and to propose, for example, alternatives to current traffic signal plans, might be of great assistance to the control center operators. With this in view, an optimization proposal of traffic signal plans was studied and analyzed for a specific region of Curitiba (in Rebouças neighborhood). This project aims to develop a strategy of optimization with simulation for adjustment of traffic signal plans, from real data collected from the roads of that city region. For this, existing technological tools are used (simulators, optimization libraries, among others), as well as algorithms from the literature, adapting them to real needs and situations of the traffic. A realistic simulation model using the SUMO software was created from the data yielded by SETRAN. The traffic signal plan optimization was developed from the Particle Swarm Optimization algorithm. In various tests, improvements were observed over the current timing plan for specific traffic situations, in terms of the average delay, travel time and throughput metrics.

Keywords: Traffic light control; Simulation optimization; Traffic simulation; Route generation; Metaheuristic; Particle swarm optimization.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1	– Exemplo de um cruzamento de 4 fases (ou estágios).	17
FIGURA 2	– Movimento de uma partícula devido às três componentes da velocidade.	23
FIGURA 3	– Região semafórica de Curitiba (SA-14) considerada.	28
FIGURA 4	– Câmera Citylog.	29
FIGURA 5	– Fragmento de um arquivo de dados de tráfego, recebido da SETRAN.	30
FIGURA 6	– Exemplo de aproximação de cruzamento.	35
FIGURA 7	– Diagrama geral do sistema de otimização semafórica baseado no PSO, e sua relação com o SUMO.	43
FIGURA 8	– Distribuição do fluxo de veículos, em veículos/hora, nos diversos cruzamentos da região SA-14 no horário das 8h às 9h da manhã (média geral do mês de Novembro/2014).	48
FIGURA 9	– Intensidade e ocupação de tráfego no sensor 173, Rua 24 de Maio.	50
FIGURA 10	– Intensidade e ocupação de tráfego no sensor 175, Rua Westphalen.	51
FIGURA 11	– Intensidade e ocupação de tráfego no sensor 176, Rua Chile.	52
FIGURA 12	– Intensidade e ocupação de tráfego no sensor 180, Rua Alferes Poli.	53
FIGURA 13	– Intensidade e ocupação de tráfego no sensor 319, Av. Pres. Kennedy.	54
FIGURA 14	– Intensidade e ocupação de tráfego no sensor 532, Rua Lamenha Lins.	55
FIGURA 15	– Intensidade e ocupação de tráfego no sensor 534, Rua Brigadeiro Franco.	56
FIGURA 16	– Intensidade e ocupação de tráfego no sensor 534, Rua Piauí.	57
FIGURA 17	– Intensidade e ocupação de tráfego no sensor 661, Rua Cons. Dantas.	58
FIGURA 18	– Adequação de distribuição ao histograma de 173, Rua 24 de Maio.	60
FIGURA 19	– Adequação de distribuição ao histograma de 175, Rua Westphalen.	60
FIGURA 20	– Adequação de distribuição ao histograma de 176, Rua Chile.	61
FIGURA 21	– Adequação de distribuição ao histograma de 180, Rua Alferes Poli.	61
FIGURA 22	– Adequação de distribuição ao histograma de 319, Av. Pres. Kennedy.	61
FIGURA 23	– Adequação de distribuição ao histograma de 532, Rua Lamenha Lins.	62
FIGURA 24	– Adequação de distribuição ao histograma de 534, Rua Brigadeiro Franco.	62
FIGURA 25	– Adequação de distribuição ao histograma de 534, Rua Piauí.	63
FIGURA 26	– Adequação de distribuição ao histograma de 661, Rua Cons. Dantas.	63
FIGURA 27	– Visão da simulação (com conjunto de rotas da Tabela 6) na Rua Alferes Poli e Av. Pres. Kennedy para temporização da SETRAN.	72
FIGURA 28	– Visão da simulação (com conjunto de rotas da Tabela 6) na região da Rua Chile com a Rua Des. Westphalen para temporização da SETRAN.	73
FIGURA 29	– Visão da simulação (com conjunto de rotas da Tabela 6) na Rua Alferes Poli e Av. Pres. Kennedy para o melhor resultado da Tabela 8.	79
FIGURA 30	– Visão da simulação (com conjunto de rotas da Tabela 6) na região da Rua Chile com a Rua Des. Westphalen para o melhor resultado da Tabela 8.	80

FIGURA 31 – Estado final das filas (com rotas arbitrárias) na Rua Alferes Poli e Av. Pres. Kennedy mantendo inalterada a temporização da SETRAN. ...	81
FIGURA 32 – Estado final das filas (com rotas arbitrárias) na Rua Chile mantendo inalterada a temporização da SETRAN.	82
FIGURA 33 – Estado final das filas (com rotas arbitrárias) na Rua Alferes Poli e Av. Pres. Kennedy para o melhor resultado da Tabela 12.	86
FIGURA 34 – Estado final das filas (com rotas arbitrárias) na Rua Chile para o melhor resultado da Tabela 12.	87

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 –	Inferência da importância de conversões na região SA-14.	31
QUADRO 2 –	Resumo das adequações das distribuições nos histogramas.	64

LISTA DE TABELAS

TABELA 1	– Rotas inferidas na análise exploratória.	32
TABELA 2	– Aproximações de cruzamentos e as rotas que passam por elas.	36
TABELA 3	– Importância das ruas para cálculo das demandas em cada rota.	65
TABELA 4	– Taxa de conversões inferidas em cada cruzamento.	66
TABELA 5	– Rotas inferidas na análise exploratória, e os respectivos fluxos gerados por otimização.	68
TABELA 6	– Comparação do fluxo de veículos em cada aproximação, entre a simulação (conjunto de rotas da Tabela 5) e os dados reais de tráfego.	70
TABELA 7	– Parâmetros utilizados nos testes de otimização com conjunto de rotas e intensidade de tráfego identificados.	74
TABELA 8	– Dez melhores resultados dos testes de otimização, para conjunto de rotas da Tabela 5.	76
TABELA 9	– Plano semafórico da SETRAN de 7h a 9h, segunda a sexta. (<i>tempoCiclo</i> = 90 s).	77
TABELA 10	– Plano semafórico da melhor solução encontrada (<i>tempoCiclo</i> = 72,70 s).	78
TABELA 11	– Parâmetros utilizados nos testes de otimização com rotas arbitrárias.	83
TABELA 12	– Dez melhores resultados nos testes de otimização com rotas arbitrárias.	85

LISTA DE SIGLAS

SETRAN	Secretaria Municipal de Trânsito de Curitiba
URBS	Urbanização de Curitiba S/A
IPPUC	Instituto de Pesquisa e Planejamento Urbano de Curitiba
TIC	Tecnologias de Informação e Comunicação
PSO	<i>Particle Swarm Optimization</i> (Otimização por Enxame de Partículas)
SUMO	<i>Simulation of Urban MObility</i>

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 MOTIVAÇÃO E JUSTIFICATIVA	13
1.1.1 Aspectos ambientais	14
1.2 OBJETIVO GERAL	14
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
1.4 ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO	15
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1 CONTROLADORES SEMAFÓRICOS	16
2.2 SIMULAÇÃO DE TRÁFEGO	18
2.2.1 Softwares de simulação de tráfego	19
2.3 MÉTRICAS DE DESEMPENHO DE TRÁFEGO	20
2.4 ALGORITMO DE OTIMIZAÇÃO	21
2.4.1 Otimização por Nuvem de Partículas (PSO)	21
2.5 OTIMIZAÇÃO SEMAFÓRICA	24
2.6 CONCLUSÃO	26
3 METODOLOGIA	27
3.1 COLETA DE DADOS	28
3.2 FLUXO E ROTA DE VEÍCULOS	30
3.3 OTIMIZAÇÃO SEMAFÓRICA	37
3.3.1 Restrições para as soluções	38
3.3.2 Inicialização do Enxame	39
3.3.3 Movimento das partículas	40
3.3.4 Reparação das partículas	40
3.3.5 Mutação das partículas	41
3.3.6 Cálculo do fitness	42
3.4 CONCLUSÃO	44
4 RESULTADOS	45
4.1 ANÁLISE EXPLORATÓRIA DOS DADOS	45
4.1.1 Variação do tráfego no intervalo de pico da manhã	49
4.1.2 Identificação das distribuições de probabilidade do tráfego de chegada	59
4.1.3 Fluxo de veículos das rotas	64
4.2 SIMULAÇÃO DA PROGRAMAÇÃO SEMAFÓRICA ATUAL COM ROTAS E INTENSIDADE DE TRÁFEGO IDENTIFICADOS	69
4.3 OTIMIZAÇÃO SEMAFÓRICA	71
4.3.1 Simulação com rotas e intensidade de tráfego identificados	71
4.3.2 Simulação com outras rotas e intensidade de tráfego	80
4.3.3 Tempo de processamento	86
4.3.4 Implementação das soluções nos controladores	88
4.4 CONCLUSÃO SOBRE O CAPÍTULO	88
5 CONCLUSÃO	89
REFERÊNCIAS	92

1 INTRODUÇÃO

A maioria das grandes metrópoles sofre com problemas relacionados à mobilidade urbana. À medida em que o número de pessoas vivendo nas proximidades das cidades aumenta, a demanda por meios de transporte também aumenta proporcionalmente – gerando diversos problemas de tráfego, como lentidão e engarrafamentos. Os prejuízos causados pelo trânsito às cidades e à população como um todo são expressivos (por exemplo, mais gastos com combustível, poluição atmosférica e sonora, desperdício de tempo, entre outros) (LOMAX, 2009).

De forma especial, pode-se observar que a cidade de Curitiba vem sofrendo cada vez mais com estes problemas. Ela vem, no período recente, apresentando um grande aumento no número de automóveis em circulação (em média 7% de aumento por ano, chegando a um número total de 1.350.462 veículos ao final de 2013) (POVO, 2014), o que acarreta em problemas de tráfego cada vez piores.

Os semáforos têm um papel significativo em todo o cenário de trânsito nas ruas, sendo eles agentes importantes para controlar o fluxo de veículos e pessoas em cada cruzamento (e na rede de tráfego como um todo). Dessa forma, um bom ajuste das redes semaforicas é fundamental para que haja fluidez no tráfego.

Este projeto tem o seu foco voltado ao desenvolvimento de um sistema de simulação e otimização semaforica, de uma região específica de Curitiba, localizada no bairro Rebouças. O acesso aos dados reais do tráfego desta região está amparado pelo Termo de Entendimento 21158 de 12/11/2013 entre Instituições Brasileiras e Suecas para “Promover o Desenvolvimento Urbano Sustentável em Curitiba”, e respectiva Portaria 0639/2014 da UTFPR designando seus representantes institucionais.

Para este objetivo, um simulador de tráfego baseado no *software* SUMO (CENTER, 2014) é extensivamente utilizado, de forma a modelar situações de trânsito próximas à realidade. O algoritmo de Otimização por Enxame de Partículas (PSO - do inglês *Particle Swarm optimization*) é utilizado tanto para efetuar a modelagem da simulação quanto

para realizar as otimizações de temporizações semafóricas – tendo em vista a considerável complexidade dos problemas tratados.

1.1 MOTIVAÇÃO E JUSTIFICATIVA

O controle de temporização de semáforos em Curitiba é realizado atualmente pelo Sistema Integrado de Monitoração (SIM) instalado na URBS. Este centro de controle possui acesso a diversas câmeras, instaladas nos principais cruzamentos da cidade, interligadas em um sistema de comunicação por fibra óptica. A cidade é dividida em 33 diferentes regiões semafóricas¹, que possuem programações de temporização independentes, acionadas automaticamente de acordo com o período do dia – por exemplo, horários de pico da manhã e da noite. Os principais semáforos estão ligados ao sistema central, e podem ser reconfigurados remotamente.

Através do contato com a SETRAN, verificou-se que diversos aspectos dos planos de programação semafórica são determinados manualmente, tendo muita carga de experiência de engenheiros e técnicos. Normalmente, estudos de demanda de tráfego são realizados pelos órgãos de planejamento da cidade (por exemplo, a própria SETRAN, a URBS ou o IPPUC), e os planos semafóricos são criados de acordo com os dados estatísticos levantados. Verificou-se que, com a adição de novas tecnologias de informação e comunicação (TIC) no sistema semafórico – por exemplo, laços indutivos, radares, sensores e câmeras – um grande volume de dados se tornou disponível. Assim, um sistema de computação, capaz de processar os dados disponíveis e propor, por exemplo, alternativas às programações semafóricas atuais, pode ser de grande auxílio aos operadores do centro de controle.

Tendo estes aspectos em vista, houve a motivação de criar um sistema de otimização de planos semafóricos, para uma região específica de Curitiba – no bairro Rebouças – que possui diversos sensores de medição de tráfego instalados. Dados de sensores podem ser utilizados para criar um modelo de simulação, e este por sua vez possibilita o desenvolvimento de um *software* para otimização das programações semafóricas, avaliando o seu desempenho na rede de tráfego simulada.

¹Uma região semafórica é um agrupamento de cruzamentos que participam de um mesmo plano semafórico, possuindo também um mesmo tempo de ciclo (vide seção 2.1 para explicações sobre o tempo de ciclo).

1.1.1 ASPECTOS AMBIENTAIS

É de amplo conhecimento que o uso de veículos a combustão gera diretamente impactos ao meio ambiente. O mais proeminente impacto, sem dúvida, é a poluição atmosférica gerada pela queima de combustíveis (especialmente os não-renováveis). A curto prazo pode-se perceber os danos à qualidade do ar respirado diariamente pelas pessoas. A médio e a longo prazo, os efeitos são também proeminentes: chuva ácida e aumento do efeito estufa são dois exemplos relevantes neste aspecto.

Os principais poluentes gerados pela locomoção de veículos a combustão, segundo (STUTZER, 2014) e (SUMO, 2014a) são:

- CO₂ (dióxido de carbono);
- CO (monóxido de carbono);
- NO_x (óxidos de nitrogênio);
- SO_x (óxidos de enxofre);
- HC (hidrocarbonetos);
- Materiais particulados.

Segundo (TOMFORDE et al., 2010), o número de paradas no tráfego e o atraso causado por congestionamentos são fatores que influenciam muito na quantidade de poluentes gerados pelos veículos. A otimização e coordenação de semáforos é uma ferramenta importante para melhorar o desempenho de redes de tráfego. Um ganho de desempenho, ou seja, menos congestionamentos e paradas desnecessárias, pode significar uma redução das emissões de poluentes no meio ambiente.

1.2 OBJETIVO GERAL

Este projeto tem como objetivo desenvolver um modelo de simulação e uma estratégia de ajuste dos planos semafóricos a partir de dados reais coletados das vias de uma região específica da cidade de Curitiba, através do uso de ferramentas tecnológicas já existentes (simuladores, bibliotecas de otimização, classificadores de dados em relação a distribuições teóricas, entre outros), adaptando às necessidades e situações reais do tráfego da referida região semafórica.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Como objetivos específicos, tem-se:

- Delimitar uma região semafórica adequada para criação do modelo de simulação;
- Modelar o tráfego de chegada dos veículos na região semafórica através de distribuições teóricas de probabilidade;
- Inferir (via análise especialista) as diferentes rotas de entrada e saída dos veículos que trafegam na região semafórica, e alocar a quantidade de veículos (via otimização por metaheurística) em cada rota inferida;
- Desenvolver um modelo de simulação do tráfego da região usando um *software* adequado;
- Implementar um algoritmo de otimização baseado na metaheurística do PSO para o ajuste dos planos semafóricos, em uma abordagem de otimização com simulação.
- Avaliar os planos semafóricos otimizados segundo métricas específicas (tempo de viagem, atraso médio e *throughput*).

1.4 ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO

Este trabalho está organizado da seguinte maneira: O Capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica dos temas abordados neste trabalho. O Capítulo 3 detalha a metodologia adotada. O Capítulo 4 apresenta os resultados obtidos pelo modelo de simulação em conjunto com a aplicação do algoritmo de otimização. A conclusão do trabalho é apresentada no Capítulo 5.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CONTROLADORES SEMAFÓRICOS

Existem diversos tipos de controladores semafóricos em uso atualmente ao redor do mundo. Dentre eles, estão o de tempo fixo, os atuados e os adaptáveis ao tráfego (FHWA, 2008). O tipo de controlador semafórico mais simples e comum é o de tempo fixo – sendo este também o tipo mais utilizado na cidade de Curitiba, segundo a SETRAN.

Os controladores de tempo fixo utilizam sequências fixas de fases (ou estágios), que representam cada movimento possível de veículos em determinado cruzamento. A Figura 1 exemplifica o conceito de fases apresentando um cruzamento de duas avenidas de mão dupla, contendo 4 fases para diferenciar os diversos movimentos possíveis. Vale ressaltar que adicionalmente tem-se também tempos de transição entre cada fase (chamados também de interfases), que constituem-se do tempo de amarelo e bloqueio total (*all-red*)¹. O bloqueio total refere-se ao estado em que todos os semáforos estão em vermelho, de forma que o cruzamento possa ser transposto e liberado em segurança pelos veículos em movimento. A duração de uma sequência completa de fases – considerando também os tempos de transição – é denominada de *tempo de ciclo*.

Outro parâmetro importante que um controlador semafórico utiliza é o tempo de defasagem, ou *offset*. O *offset* é o momento de início do ciclo em relação a uma referência de tempo fixa (baseada em um relógio central). O seu uso torna-se especialmente importante para realizar a sincronização de diversos cruzamentos, criando progressões semafóricas (também conhecidas como ondas verdes)².

Nos controladores semafóricos de tempo fixo, os tempos de cada fase (e conse-

¹Segundo a SETRAN, na maior parte dos cruzamentos da região semafórica tratada neste trabalho o tempo de amarelo é de 4 segundos e o tempo de bloqueio é de 1 segundo, salvo exceções onde o cruzamento seja maior e requira maior tempo para transposição total deste. O tempo de bloqueio necessário depende principalmente do tamanho do cruzamento e da velocidade da via. Em certos casos, pode depender também de fatores adicionais (como por exemplo, faixas de pedestres).

²Elas consistem da sincronização do tempo de verde de uma série de semáforos de forma que os veículos possam mover-se continuamente passando por diversos cruzamentos.

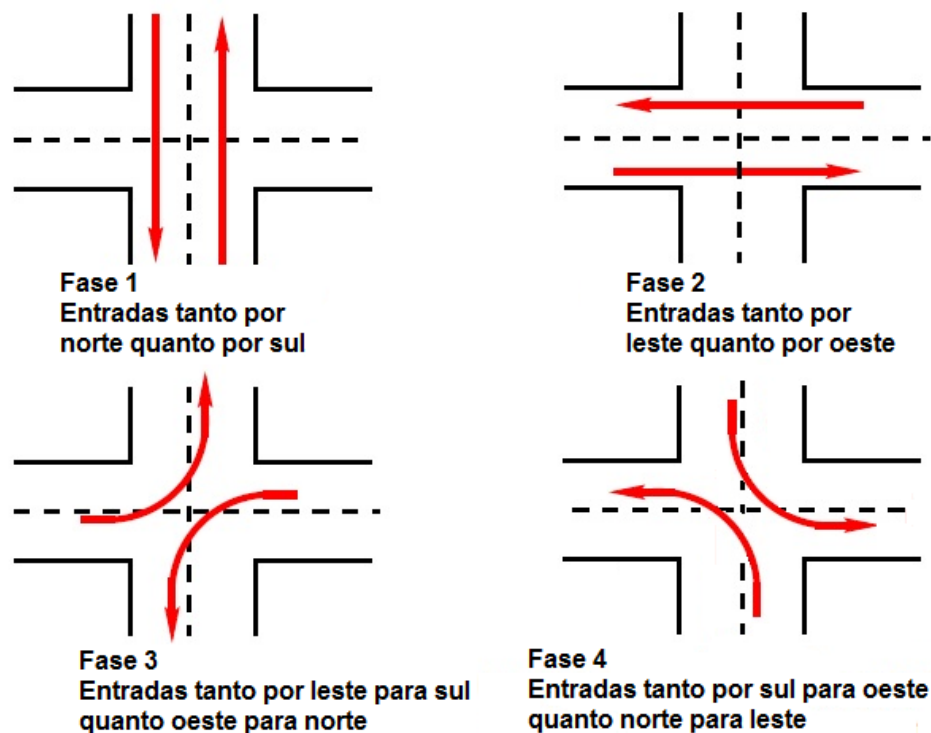


Figura 1: Exemplo de um cruzamento de 4 fases (ou estágios).

Fonte: Adaptado de (AL-NASSER; MAHMOUD, 2012)

quentemente o tempo de ciclo) são mantidos constantes por determinados períodos de tempo. As programações dos controladores podem ser otimizadas segundo dados estatísticos, e mudanças de programação podem ser feitas automaticamente em horários pré-determinados – por exemplo, horários de pico da manhã ou da noite. Também, há a possibilidade de efetuar alterações manuais caso verifiquem-se variações fora do padrão no cenário de trânsito.

Sumarizando, para um controlador semaforico de tempo fixo, os parâmetros que podem ser ajustados em determinado plano semaforico (em um período de horário específico) são (FHWA, 2008):

- Tempo de ciclo;
- Tempo de cada fase;
- Sequência de fases; ³
- *Offset*.

³A alteração das sequências de fases não é tratada neste trabalho

2.2 SIMULAÇÃO DE TRÁFEGO

Existem duas principais categorias relacionadas ao assunto da simulação de tráfego (NOORI, 2013): microsimação e macrosimação. Na primeira, o comportamento individual dos motoristas é levado em consideração, enquanto que na segunda apenas os fluxos estatísticos de tráfego são considerados. Adicionalmente, tem-se também a mesosimação, que é uma mesclagem das duas categorias. Para este trabalho, a microsimação mostra-se mais adequada, tendo-se em vista que se deseja simular e verificar o desempenho de redes de tráfego relativamente pequenas (porém detalhadas), e o comportamento de cada veículo é relevante.

O uso de simulação mostra-se bastante adequado a este trabalho de otimização semafórica, uma vez que o teste de novos planos de temporização não é simples de ser realizado na prática, podendo gerar inúmeros efeitos indesejados – especialmente aos usuários das vias. Além disso, os resultados (métricas numéricas de desempenho) decorrentes de cada teste são relativamente difíceis de serem obtidos e avaliados. Tendo-se um modelo de simulação, o teste de um plano semafórico torna-se muito mais simples, e os resultados estatísticos podem ser obtidos a partir de variáveis da simulação. Isso possibilita testes de novas programações de semáforos, obtidas pelo uso de algoritmos de otimização (como por exemplo o PSO, utilizado neste trabalho).

Para que as simulações reflitam adequadamente a realidade, é preciso estudar o sistema real por um tempo mínimo, de forma que as informações coletadas sejam representativas. Sobre esse assunto, Banks et al. (2013) apresenta o exemplo de uma agência bancária: em certos dias da semana ela pode ser mais visitada, e em outros menos – então seria preciso ao menos uma semana de observações. Por outro lado, certos dias do mês possuem mais demanda – então, pode ser necessário aumentar o tempo de observação para pelo menos um mês. A determinação do tempo de observação é algo importante, e pode ser um problema razoavelmente complexo (KELTON et al., 2002).

Ainda assim, após a obtenção dos dados e criação do modelo de simulação, é preciso realizar alguma forma de validação deste, a fim de certificar que o comportamento da simulação está próximo o bastante da realidade. Só então pode-se ter certeza de que as medidas estatísticas obtidas são confiáveis. Em sistemas estocásticos, é necessário realizar diversas simulações e medições, uma vez que para as mesmas entradas o sistema pode ter comportamentos diferentes.

A seguir, apresentam-se os principais softwares de simulação pesquisados, além

do escolhido para este trabalho.

2.2.1 SOFTWARES DE SIMULAÇÃO DE TRÁFEGO

Sobre softwares de simulação de tráfego, um artigo bastante relevante é Noori (2013). Ele apresenta um problema relacionado a tráfego, e uma análise de diversos simuladores existentes é realizada. No artigo, um mapa real de uma cidade é utilizado (retirado do serviço Open Street Map (COMMUNITY, 2015)), e as informações quanto ao trânsito são obtidas a partir de pesquisas de campo ou sensores de tráfego. Alguns exemplos de *software* livre para simulação de tráfego pesquisados neste artigo são: SUMO, OmNet++, VEINS, VanetMobiSim, CORSIM, CityMob, VISSIM, STRAW, PARAMICS, FreeSim e Netstream. Na prática, Noori (2013) faz uso do SUMO, um simulador para microsimulação. Adicionalmente, em Prothmann et al. (2008) e Tomforde et al. (2008), o *software* para simulação utilizado é o AIMSUN, uma solução comercial utilizada na prática por engenheiros de tráfego – e que também utiliza microsimulação.

Para este trabalho, levantaram-se os seguintes pontos a serem atendidos pelo *software* de simulação:

- Representação através de mapas digitais, com possibilidade de importação a partir de diferentes ferramentas de software;
- Planos semaforicos implementáveis na realidade;
- Comportamento dos veículos semelhante à realidade, com rotas diversas e distribuições estatísticas de veículos por rotas;
- Possibilidade de obtenção de medições estatísticas que sejam adequadas para avaliar o desempenho do sistema.

Após extensa análise, o *software* de simulação escolhido para este projeto foi o SUMO (CENTER, 2014), que é gratuito e de código aberto. Desenvolvido inicialmente por universidades da Alemanha, e posteriormente tendo contribuições da comunidade de *software* livre, o SUMO apresenta-se atualmente com muitos recursos. Ele tem a possibilidade de importação de mapas do Open Street Map (base de mapas gratuita e livre), o que é importante para a ágil criação de um modelo de simulação. É possível obter um bom nível de realismo nas simulações, havendo a possibilidade de configurar e personalizar cada aspecto delas. Nisso inclui-se a estrutura completa de ruas (com a configuração de cada faixa), além da personalização detalhada de cada veículo e do

comportamento dos motoristas. Uma análise detalhada do SUMO é feita em Krajzewicz et al. (2002).

Outro recurso deste *software*, embora não seja o foco deste trabalho, é a possibilidade de obter informações a respeito do consumo de combustível e dos poluentes gerados pelos veículos, além do ruído sonoro produzido. Isso permite que os aspectos ambientais sejam levados em conta pelos usuários do programa de simulação. Os modelos matemáticos utilizados para a estimativa da quantidade de poluentes são baseados em padrões europeus de fatores de emissão (SUMO, 2014b).

2.3 MÉTRICAS DE DESEMPENHO DE TRÁFEGO

Neste trabalho, as seguintes métricas são consideradas para medir o desempenho do tráfego nas simulações: O atraso médio (que mede o tempo adicional necessário para os veículos atravessarem a região semafórica além do que ocorreria numa situação ideal, em que os veículos trafegariam em velocidade máxima durante todo o trajeto), e o *throughput*, ou taxa de veículos servidos (ou seja, que completaram suas viagens), medida em veículos por hora (FHWA, 2008).

O atraso médio, em especial, é importante para mensurar o tempo dispendido pelos veículos por conta de baixa velocidade, paradas, filas e congestionamentos.

Já a métrica do *throughput* reflete a capacidade que o sistema semafórico tem para servir veículos. Para uma dada demanda (constante) de entrada de veículos na região, deve-se buscar, de forma geral, aumentar o *throughput*, ou seja, a taxa de saída de veículos da região. Quando o valor é reduzido por uma mudança de temporização semafórica, é muito provável que mais congestionamentos estejam ocorrendo. Em contrapartida, um aumento do valor indica que o sistema semafórico consegue suprir melhor a demanda a que foi submetido.

A equação (2.1) apresenta o cálculo do tempo de atraso para um veículo individual i . O atraso médio é a média simples do tempo de atraso de todos veículos da simulação (FHWA, 2008).

$$tempoTotalAtraso_i = tempoEfetivoViagem_i - tempoMinimoViagemTeorico_i \quad (2.1)$$

Onde:

- $tempoEfetivoViagem_i$ é o tempo efetivamente gasto pelo veículo i na viagem;
- $tempoMinimoViagemTeorico_i$ é o tempo mínimo (teórico) que um veículo i gastaria para fazer a mesma viagem. Isso representa uma situação em que o veículo ande sempre no limite de velocidade da via, sem nenhuma parada no meio do caminho. O cálculo é feito pela equação:

$$tempoMinimoViagemTeorico_i = \frac{distanciaPercorrida_i}{limiteVelocidadeVia} \quad (2.2)$$

No caso de vias com limites diferentes de velocidade serem consideradas – por exemplo, vias arteriais com 60 Km/h e vias locais com 40 Km/h – o cálculo do atraso deve ser feito para cada uma delas separadamente.

Já o *throughput*, medido em veículos por unidade de tempo, é obtido a partir da equação (2.3).

$$throughput = \frac{veiculosServidos}{tempoSimulacao} \quad (2.3)$$

2.4 ALGORITMO DE OTIMIZAÇÃO

Tendo em vista que o problema da otimização de planos de uma rede semafórica possui, em geral, um grande espaço de busca, o uso de algoritmos bioinspirados (CASTRO; ZUBEN, 2005) mostra-se bastante atrativo para resolvê-lo. Esse tipo de algoritmo caracteriza-se por frequentemente ter a capacidade de tratar problemas complexos de forma aproximada, retornando soluções boas e em tempo aceitável. Alguns exemplos de algoritmos estudados amplamente na literatura são os algoritmos genéticos, PSO (*particle swarm optimization*, ou otimização por enxame de partículas) e ACO (*ant colony optimization*, ou otimização por colônia de formigas).

Em especial, o algoritmo do PSO mostra-se interessante para este trabalho, pois possui um histórico de extensa pesquisa científica (com vários resultados bem-sucedidos) (POLI, 2007), além do fato de a equipe possuir ampla experiência prévia com este algoritmo. Na seção seguinte, uma explicação mais detalhada será feita sobre ele.

2.4.1 OTIMIZAÇÃO POR NUVEM DE PARTÍCULAS (PSO)

O PSO (do inglês, *Particle Swarm Optimization*) é uma técnica desenvolvida por James Kennedy e Russell Eberhart (KENNEDY; EBERHART, 1995). É inspirado no

comportamento de aves em bandos, nos quais as soluções para um determinado problema de otimização, chamadas partículas, “voam” (como aves) através de um espaço de busca multidimensional. Tal como os algoritmos genéticos, o PSO pode ser classificado como um paradigma bioinspirado. O algoritmo ajusta trajetórias de uma população de “partículas” utilizando informações sobre o melhor desempenho de cada partícula e o melhor desempenho de seus vizinhos (vide Kennedy e Eberhart (1997) e Kennedy e Eberhart (1995) para mais detalhes).

Considere uma partícula $\mathbf{p}^t = (p_1^t, p_2^t, \dots, p_z^t)$ posicionada no espaço de busca \mathbf{R}^z no tempo discreto da iteração t . A partícula \mathbf{p}^t é movimentada por um vetor de velocidade $\mathbf{v}^{t+1} = (v_1^{t+1}, \dots, v_z^{t+1})$ de acordo com (2.4).

$$\mathbf{p}^{t+1} = \mathbf{p}^t + \mathbf{v}^{t+1}. \quad (2.4)$$

Usualmente, a atualização do vetor velocidade é realizada para cada elemento j com base em três componentes conforme definido em (2.5).

$$v_j^{t+1} = w \cdot v_j^t + (c_1 r_1) \cdot v_{j(cogn)}^t + (c_2 r_2) \cdot v_{j(social)}^t, \quad (2.5)$$

onde v_j^t corresponde à j -ésima componente inercial (velocidade atual), $v_{j(cogn)}^t = (best_j - p_j^t)$ corresponde à j -ésima componente cognitiva com $best_j$ definido como o j -ésimo elemento da melhor posição alcançada até o momento pela partícula, $v_{j(social)}^t = (best_{j(global)} - p_j^t)$ corresponde à j -ésima componente social com $best_{j(global)}$ definido como o j -ésimo elemento da melhor posição alcançada até o momento pelo enxame (ou por um subconjunto de partículas definido por uma estrutura de vizinhança específica). Os coeficientes w , c_1 e c_2 são associados às componentes inercial, cognitiva e social da velocidade, respectivamente. Eles definem o quanto a partícula confia em seu movimento anterior, na sua própria história e no conjunto de partículas, respectivamente. Os termos r_1 e r_2 são números aleatórios com distribuição uniforme no intervalo $[0,1]$.

A Figura 2 apresenta visualmente a ação das três componentes de velocidade no movimento de uma partícula \mathbf{p} genérica.

O algoritmo PSO inicia com um enxame aleatório, ou seja, a posição e a velocidade de cada partícula são geradas aleatoriamente, e são atualizadas a cada iteração ($best_j$ é atualizado para cada partícula e $best_{j(global)}$ para todo o enxame ou um subconjunto dependendo da estrutura de vizinhança adotada). Quando um máximo de T iterações é alcançado, $best_{j(global)}$ representa a melhor solução encontrada pelo enxame. O algoritmo

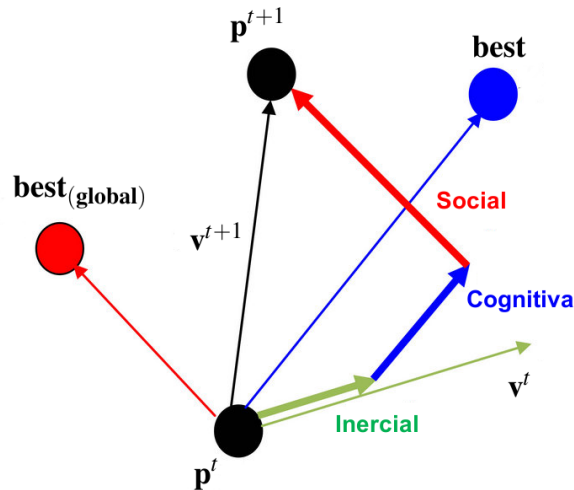


Figura 2: Movimento de uma partícula devido às três componentes da velocidade.

Fonte: Adaptado de (EL-SHORBAGY, 2013).

1 apresenta um pseudo-código do PSO, que sumariza o exposto anteriormente.

Algoritmo 1 Algoritmo do PSO

- 1: Inicializa o enxame com S partículas aleatórias
 - 2: Avalia o fitness de cada partícula
 - 3: Atualiza o **best**_{global} com o melhor fitness
 - 4: $t=1$
 - 5: **while** $t \leq T$ **do**
 - 6: **for** Cada partícula $\mathbf{p}^t = (p_1^t, p_2^t, \dots, p_N^t)$ **do**
 - 7: Calcula e aplica velocidade na partícula \mathbf{p}^t
 - 8: //Neste ponto, a partícula \mathbf{p}^t passa a ser \mathbf{p}^{t+1}
 - 9: Atualiza o fitness da partícula \mathbf{p}^{t+1}
 - 10: Atualiza a melhor posição da partícula (Melhor entre **best** e \mathbf{p}^{t+1})
 - 11: Atualiza a melhor posição global (Melhor entre **best**_{global} e **best**)
 - 12: **end for**
 - 13: $t = t + 1$
 - 14: **end while**
-

Apesar de um amplo espectro de aplicações práticas, o PSO apresenta algumas desvantagens: dificuldade de escapar de ótimos locais; a taxa de convergência diminui consideravelmente nas etapas finais do processo evolutivo; ao atingir uma solução próxima do ótimo, o algoritmo tende a estacionar, dificultando um ajuste fino no final da busca. Várias tentativas têm sido feitas para mitigar este problema. Entre elas, muitas abordagens buscam melhorar o desempenho do PSO ajustando o peso de inércia (w), por exemplo:

- Otimização de enxame de partículas fuzzy adaptativo (SHI; EBERHART, 2001);

- Diminuição linear do peso (SHI; EBERHART, 1998);
- Aumento do peso da inércia (ZHENG et al., 2003);
- Peso de inércia aleatório (EBERHART; SHI, 2001) (ZHANG et al., 2004).

Uma variação comumente utilizada é o decréscimo do coeficiente inercial (w) ao longo das iterações do algoritmo (SHI; EBERHART, 1998). Este decréscimo pode ser descrito por diversas funções matemáticas, sendo a mais simples delas o decréscimo linear. O objetivo de diminuir o fator inercial ao longo do tempo é principalmente de fazer com que as partículas gradualmente reduzam o seu espaço de busca e potencialmente encontrem ótimos (locais ou não) que estejam na sua vizinhança.

Outra modificação que pode ser feita no PSO é a utilização de um operador de mutação (STACEY et al., 2003). Ele constitui-se, geralmente, de uma função que atribui valores aleatórios a parâmetros de determinada partícula. A partícula e os parâmetros a serem mutados são escolhidos de acordo com valores de probabilidade. O operador de mutação pode ser útil para manter a variabilidade no enxame, evitando que as partículas fiquem estagnadas em ótimos locais.

2.5 OTIMIZAÇÃO SEMAFÓRICA

Em Göçke et al. (2015), um projeto de otimização com simulação, para uma rotatória semaforizada na cidade de Izmir, Turquia, é apresentado. Dados reais de tráfego são utilizados para criar o modelo de simulação. O trabalho utiliza o PSO para criar planos semafóricos otimizados para as situações de tráfego reais, de forma a minimizar o tempo de viagem e o atraso médio e aumentar o *throughput*. O simulador utilizado é o VISSIM (*software* comercial, baseado em microsimulação). Foi possível obter, no melhor caso, melhorias de 55,9% no atraso médio e 9,3% no *throughput* através do uso da otimização. A principal diferença do trabalho citado para este trabalho é a sua escala reduzida – apenas 1 rotatória com 5 aproximações. Também, uma análise mais detalhada de distribuições de chegada não é feita, sendo sempre utilizada a distribuição de Poisson, cujo valor de média é igual à media dos dados reais, independentemente do caso.

Em Garcia-Nieto et al. (2013), de forma similar ao trabalho anteriormente citado, o algoritmo do PSO é utilizado para otimizar planos semafóricos de duas regiões de duas cidades: uma região em Bahía Blanca na Argentina (estilo americano de *layout*), e outra em Málaga na Espanha (estilo europeu), foram analisadas para criar modelos de

microsimulação no *software* SUMO. Um dos objetivos foi fazer com que o algoritmo fosse capaz de otimizar programações semaforicas em ambos os tipos de cidades. No caso da cidade de Málaga, dados reais de tráfego foram utilizados, porém de forma simplificada – apenas para determinar a média de carros que circulam na região. Já na cidade de Bahía Blanca, dados reais não estavam disponíveis, sendo então valores parecidos com os de Málaga utilizados. Comparando-se com as programações semaforicas já em uso na prática, a otimização foi capaz de melhorar os quesitos de tempo de viagem em 75% e de *throughput* em 31,66%. O trabalho citado tem o foco em desenvolver um sistema genérico de otimização semaforica. Por isso, não faz uma análise mais detalhada sobre o conjunto de rotas típicas e suas respectivas demandas – sendo essa uma diferença importante para este projeto. Também, uma análise de distribuições de probabilidade de chegada de veículos não é feita, o que compromete o realismo das simulações.

Dong et al. (2010) apresentam um algoritmo PSO com *simulated annealing* (Sa-PSO) para otimizar planos semaforicos. Considerando uma rede simulada de tráfego de 9 cruzamentos (ambiente não realístico com disposição em *grid*), o algoritmo foi capaz de obter, no melhor caso, 41% de melhoria no atraso médio e 39% no número de paradas em relação a um plano semaforico pré-estabelecido. O trabalho citado não simula uma rede de tráfego realística, sendo essa uma diferença importante para este projeto.

Teo et al. (2010) utilizam um algoritmo genético para otimizar temporizações em um único cruzamento em “T” semaforizado. O sistema desenvolvido recebe como entrada o tamanho das filas nas aproximações, e dá como saída os tempos de verde otimizados para o cruzamento. O desempenho das soluções é avaliado por simulação. O escopo do trabalho citado é reduzido (apenas 1 cruzamento de um ambiente não realístico) – sendo essa a principal diferença para este projeto.

Em Sun et al. (2003), um algoritmo genético multi-objetivo é utilizado para a otimização de planos semaforicos. Tanto modelos determinísticos quanto estocásticos de tráfego são definidos e tratados no artigo. Aproximações matemáticas das fronteiras de Pareto são estabelecidas, de forma a avaliar os *trade-offs* dos objetivos de atraso médio e número de paradas. Os ambientes de simulação utilizados não são realísticos, tendo apenas como objetivo desenvolver e testar o algoritmo genérico de otimização semaforica.

Abushehab et al. (2014) expõem abordagens tanto com o PSO quanto com algoritmo genético para o problema da temporização semaforica. Simulações com o *software* SUMO, para uma rede de tráfego com 13 cruzamentos, foram utilizadas para atestar a qualidade das soluções geradas. Ajustes em ambos os algoritmos foram realizados para

obter os melhores resultados em termos de tempo de viagem, sendo no final tanto o algoritmo genético quanto o PSO vantajosos para a otimização. Dados reais de tráfego não foram utilizados para gerar o modelo de simulação.

Em relação a todos os trabalhos citados, este projeto tem a diferença de ser aplicado especificamente para as necessidades de Curitiba, na região semaforizada abordada. Esta região é consideravelmente maior em relação às abordadas nos outros trabalhos⁴, tendo 26 cruzamentos ao total – 18 semaforizados e 8 não semaforizados. Também, as rotas típicas da região são levantadas e distribuições de chegada são analisadas detalhadamente. Com relação à otimização semaforizada, nenhum dos artigos utiliza a abordagem de inicializar uma parte da população do algoritmo de otimização com uma programação pré-definida (seção 3.3.2). Também, nenhum dos artigos que aborda o PSO faz uso de mutação nas partículas (seção 3.3.5), sendo este portanto outro ponto de inovação neste trabalho.

2.6 CONCLUSÃO

Este capítulo apresentou a fundamentação teórica deste trabalho, e fez uma análise dos trabalhos correlatos já presentes na literatura. Os principais pontos a respeito dos controladores semaforizados e seu funcionamento foram explicitados. Também, informações sobre o assunto de simulação de tráfego – e os principais *softwares* atualmente disponíveis – foram discutidas. As métricas de desempenho de tráfego (atraso médio, tempo de viagem e *throughput*) utilizadas neste trabalho também foram explicitadas. Uma revisão sobre algoritmos de otimização, mais especificamente o PSO, foi realizada. Por fim, os principais trabalhos correlatos foram apresentados, sendo o escopo de cada um comparado com o deste projeto.

⁴Com exceção de Garcia-Nieto et al. (2013), que abordam regiões de até 73 cruzamentos.

3 METODOLOGIA

O trabalho foi dividido inicialmente em duas frentes de desenvolvimento. A primeira envolve a coleta de dados do sistema real e a criação do modelo de simulação. Uma região específica da cidade de Curitiba, que dispõe de sensoriamento de tráfego, foi utilizada para a criação do modelo.

A Figura 3 apresenta esta região (denominada SA-14, destacada no mapa). Os quadrados em cinza representam semáforos e sensores de monitoramento nos cruzamentos. No total, tem-se 26 cruzamentos – 18 semaforizados e 8 não semaforizados.

A região localiza-se dentro do bairro Rebouças, mais precisamente em $25^{\circ}27'10''S$; $49^{\circ}16'00''W$. As principais vias são:

- Rua Chile;
- Rua Conselheiro Dantas;
- Av. Presidente Kennedy;
- Rua Piauí;
- Rua Brigadeiro Franco;
- Rua Lamenha Lins;
- Rua Nunes Machado;
- Rua 24 de Maio;
- Rua Alferes Poli;
- Rua Dr. Pamphilo D'Assunção;
- Rua Desembargador Westphalen;
- Av. Marechal Floriano Peixoto.

cruzamentos também existem sensores de monitoramento de fluxo de veículos em cada uma das faixas, chamados de *CityLogs*, que têm a aparência da Figura 4. Estes sensores são responsáveis por obter as taxas de intensidade do fluxo de tráfego, em quantidade de veículos por unidade de tempo, e de ocupação, medida em porcentagem (a partir da proporção em que a região considerada pelos sensores fica ocupada). Tudo isso é realizado através de captura e processamento de imagens, com base em laços virtuais de medição.



Figura 4: Câmera Citylog.

Fonte: SETRAN

O período de agregação dos dados dos *CityLogs* é configurável, ou seja, é possível obter informações resumidas tanto de hora em hora quanto de minuto em minuto, por exemplo. A partir da cooperação com a SETRAN, dados destes sensores – referentes a um mês inteiro, agregados de minuto em minuto – foram disponibilizados para serem tratados e utilizados no trabalho. Os dados foram recebidos tanto em planilha quanto em arquivos HTML. Cada arquivo de dados recebido corresponde a um dos sensores. Um fragmento de um dos arquivos recebidos é apresentado na Figura 5. As unidades estão em porcentagem para a ocupação e, embora os dados sejam obtidos de minuto em minuto, o fluxo de veículos (marcado como “Intensidad” na figura) é extrapolado para um valor de veículos por hora¹. Os campos marcados com -1 indicam que não há dados disponíveis.

Como um exemplo, pode-se ver a última linha da tabela da Figura 5. Tem-se um fluxo de 120 veículos por hora, o que significa que 2 veículos passaram pelo laço virtual do sensor no minuto de medição. Também, uma ocupação de 30% está indicada, o que significa que em apenas 18 dos 60 segundos de medição algum veículo estava dentro do laço virtual do sensor.

Uma dificuldade encontrada foi a não disponibilização de dados para determinados horários – como vê-se na Figura 5 a ausência dos horários 00:03:00, 00:05:00, 00:07:00 e 00:10:00 para o dia 01/10/2014.

¹Ou seja, um valor de 60 veículos por hora indica que dentro do minuto de medição 1 veículo passou pelo sensor.

Data	Ocupação	Intensidad	Longitude	Class1	Class2	Class3	Velocidade
01/10/2014 00:01:00	2	60	-1	-1	-1	-1	-1
01/10/2014 00:02:00	2	60	-1	-1	-1	-1	-1
01/10/2014 00:04:00	2	60	-1	-1	-1	-1	-1
01/10/2014 00:06:00	2	60	-1	-1	-1	-1	-1
01/10/2014 00:08:00	17	180	-1	-1	-1	-1	-1
01/10/2014 00:09:00	32	180	-1	-1	-1	-1	-1
01/10/2014 00:11:00	30	120	-1	-1	-1	-1	-1

Figura 5: Fragmento de um arquivo de dados de tráfego, recebido da SETRAN.

Fonte: SETRAN

Para estudo dos dados, certas decisões específicas foram tomadas, de modo a filtrar os dados e direcionar de forma objetiva o trabalho:

- Utilizar somente dados do horário de pico da manhã (de segunda a sexta, das 7h às 9h);
- Descartar eventuais registros de horários em que um dos sensores não tenha valores registrados;
- Analisar detalhadamente os cruzamentos da borda da região – que são vias de entrada para a mesma – quanto à sua distribuição estatística de fluxo de veículos;
- Não fazer distinção entre os diferentes dias úteis da semana, pois uma análise prévia concluiu que há comportamento estatisticamente semelhante entre eles;
- Inferir taxas de conversão de veículos a partir dos dados de intensidade² de tráfego de cada cruzamento – é importante notar que os dados recebidos originalmente não possuem informações quanto às taxas de conversão.

3.2 FLUXO E ROTA DE VEÍCULOS

O simulador SUMO é orientado a rotas e fluxos relacionados a essas rotas. Então, a tarefa de repassar informações reais para o simulador se resume a levantar um conjunto

²Também chamado de **fluxo**, medido em veículos por unidade de tempo.

de rotas, e, em seguida, determinar a quantidade de veículos por hora em cada uma dessas rotas, de forma que haja uma boa adequação dos fluxos médios à realidade em cada um dos cruzamentos. Uma etapa preliminar à estimação dos veículos por rotas, que neste trabalho foi feita por meio de otimização, envolve a definição de quantas e quais rotas serão consideradas.

Fez-se uma análise das principais áreas de interesse ao redor da região SA-14. O Quadro 1 mostra uma análise realizada sobre as conversões³ mais importantes, levando em conta as referidas áreas. Essas heurísticas foram consideradas na definição do conjunto de rotas que atravessam a região. Primeiramente, os caminhos que atravessam a região, sem nenhuma conversão, foram todos considerados. A seguir, o próximo passo foi determinar as rotas mais importantes que possuem uma conversão. A partir disso, foi possível estabelecer um conjunto de 39 rotas importantes no total, que representam os caminhos diretos e os com apenas uma conversão a serem consideradas no processo de otimização de rotas.

Quadro 1: Inferência da importância de conversões na região SA-14.

Para De	Xaxim	Água verde	J. Botânico	Centro
Xaxim	x	C	C	x
Água verde	x	x	x	C
J. Botânico	C	x	x	C
Centro	x	C	C	x

Legenda:

C = Conversão esperada

x = Conversão pouco expressiva / Sem conversão⁴

Com estes conhecimentos heurísticos, houve a construção do conjunto de rotas utilizado neste trabalho. O conjunto de rotas é mostrado na Tabela 1.

³Uma conversão é uma manobra em determinado cruzamento, onde o veículo sai de uma via e entra em outra – virando para esquerda ou para a direita.

⁴As rotas em linha reta caem nessa categoria, mesmo que sejam bastante expressivas na prática – como por exemplo as rotas do Xaxim ao Centro.

Tabela 1: Rotas inferidas na análise exploratória.

Rota nº	Rua inicial	Cruzamento conversão	Rua final
1	24 de Maio	-	24 de Maio
2		173	Chile
3		663	Cons. Dantas
4		179	Kennedy Leste
5		179	Kennedy Oeste
6	Alferes poli	-	Alferes poli
7		664	Cons. Dantas
8		180	Kennedy Leste
9		180	Kennedy Oeste
10	Brigadeiro franco	-	Brigadeiro franco
11		319	Kennedy Leste
12	Chile	-	Chile
13		174	Alferes poli
14		176	Mal. Floriano Norte
15		176	Mal. Floriano Sul
16		175/178	Kennedy Oeste (via Westphalen)
17	Cons. Dantas	-	Cons. Dantas
18		664	Alferes poli
19		665	Westphalen
20	Kennedy Leste	-	Kennedy Leste
21		180	Alferes poli
22		533	Lamenha Lins
23		319 (via retorno)	Brig. Franco
24	Kennedy Oeste	-	Kennedy Oeste
25	Lamenha Lins	-	Lamenha Lins
26		532	Chile
27		662	Cons. Dantas
28		533	Kennedy Leste
29		533	Kennedy Oeste
30	Mal. Floriano Norte	-	Mal. Floriano Norte
31	Mal. Floriano Sul	-	Mal. Floriano Sul
32	P. Assunção Sul	-	P. Assunção Sul
33		280/278	Kennedy Oeste
34	Piaui	-	Piaui
35		534	Brigadeiro franco
36	Westphalen	-	Westphalen
37		275	Chile
38		665	Cons. Dantas
39		278	Kennedy Oeste

A seguir, o PSO foi utilizado para obter o fluxo de veículos em cada rota. Assim como será visto no caso do problema de otimização de temporizações semafóricas, o problema das rotas abordado possui um grande espaço de busca, o que torna o uso de metaheurísticas atrativo. Portanto, utilizou-se o algoritmo PSO descrito na seção 2.4.1⁵.

É importante notar que embora o alvo da otimização seja o número de veículos por rota, a relação dessas variáveis de decisão com a equação de fitness não se dá de forma tão direta. Por isso foram criados os elementos de *simFluxo* e *simConversão*.

- *simFluxo*: Medida de similaridade entre os fluxos da solução candidata e dos dados reais;
- *simConversão*: Medida de similaridade entre as taxas de conversão da solução candidata e dos dados reais;

Em suma, o problema a ser resolvido pelo PSO consiste em encontrar uma divisão de veículos por rota, ou seja, um vetor de inteiros que represente a quantidade de veículos que passam em cada cruzamento, seguindo uma rota específica, a fim de maximizar tanto a métrica *simFluxo* quanto *simConversão*.

Cada partícula do PSO é codificada como um vetor de 39 valores inteiros, sendo cada valor a quantidade de veículos correspondente a uma rota – do conjunto de 39 rotas previamente definidas na Tabela 1. Assim, a partícula é codificada como: $\mathbf{p}^t = (p_1^t, \dots, p_k^t, \dots, p_{39}^t)$, onde p_k^t indica a quantidade de veículos que utilizam a rota k na t -ésima iteração do PSO.

A função objetivo (*fitness*) do PSO para cálculo de demandas nas rotas foi definida segundo as equações (3.1), (3.2) e (3.3), para problema de maximização:

$$simFluxo = \sum_{i=fluxo}^{TFluxo} \frac{\alpha_i}{RF_i} \quad (3.1)$$

$$simConversao = \sum_{j=conversao}^{TConversao} \frac{\beta_j}{RC_j} \quad (3.2)$$

$$fitness = simFluxo + simConversao \quad (3.3)$$

Sendo:

⁵A discretização foi utilizada pois a quantidade de veículos por rota é sempre um valor inteiro.

- α_i : Peso variante para objetos de simFluxo;
- β_j : Peso para simConversão;
- RF_i : Razão dos valores de fluxo, calculado pela equação⁶:

$$RF_i = \begin{cases} F_{x_i}/F_{y_i}, & \text{se } F_{x_i} \geq F_{y_i} \\ F_{y_i}/F_{x_i}, & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

onde:

- F_{x_i} : valor de fluxo i da solução candidata;
- F_{y_i} : valor de fluxo i dos dados reais.

- RC_j : Razão dos valores de conversão, calculado pela equação⁷:

$$RC_j = \begin{cases} T_{x_j}/T_{y_j}, & \text{se } T_{x_j} \geq T_{y_j} \\ T_{y_j}/T_{x_j}, & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

, onde:

- T_{x_j} : valor de conversão j da solução candidata;
- T_{y_j} : valor de conversão j inferida.

- $TFluxo = 39$, o número de elementos de fluxo na região SA-14;
- $TConversao = 19$, o número de elementos de conversão inferidos para a região SA-14.

Para que exista um elemento de avaliação de fluxo, devem apenas existir sensores em uma aproximação de cruzamento. Para que haja um elemento de conversão, é preciso que uma rota realize conversão em um cruzamento⁸.

Para definição do valor de F_{x_i} , de cada um dos objetos de simFluxo, é feita a soma das quantidades de veículos do conjunto de rotas que passam pela aproximação de cruzamento analisada. Esse conjunto de rotas para cada fluxo ($Rota_{FLX_i}$) está definido na Tabela 2. A partir dos dados presentes nesta tabela, é possível calcular o valor F_{x_i} dos objetos de simFluxo. O funcionamento pode ser resumido na fórmula $F_{x_i} = \sum_{k=1}^{39} (v_k \cdot p_k^t)$ onde $v_k = 1$ se $k \in Rota_{FLX_i}$ e 0 caso contrário, e p_k^t é a quantidade de veículos da rota k , codificada na partícula na iteração t . A equação indica que, no cálculo do *fitness* da partícula, serão consideradas no elemento do fluxo i , apenas as rotas que passam por

⁶A equação é utilizada para que RF seja sempre um valor acima de 1, a fim de que $\frac{\alpha_i}{RF_i} \leq \alpha_i$. Dessa forma, α_i será sempre o limite superior da primeira parcela do *fitness*.

⁷A equação é utilizada para que RC seja sempre um valor acima de 1, a fim de que $\frac{\beta_j}{RC_j} \leq \beta_j$. Dessa forma, β_j será sempre o limite superior da segunda parcela do *fitness*.

⁸Não confundir elementos de simFluxo com rotas (ambos os conjuntos têm dimensão 39).

aquele cruzamento. A definição de α_i é apresentada na seção 4.1.3, assim como os valores de Fy_i , obtidos através de processamento dos dados.

Um dos maiores desafios desta primeira etapa do trabalho diz respeito às conversões nas vias. Os sensores *CityLog* não efetuam medida das taxas de conversão nos cruzamentos; também, um estudo ou pesquisa à parte que leve em conta taxas de conversão não foi encontrado. Portanto, para resolver o problema foram agregados conhecimentos heurísticos sobre a região considerada:

- A maior parte das conversões tende a ser em ruas de grande movimento;
- Existem certo número de rotas típicas que são conhecidas a partir da existência de áreas ou pontos de interesse.

Para definição do valor de T_{x_j} , dada uma aproximação de cruzamento que possui ao menos uma rota que faz conversão, será feita a divisão do número de veículos que vieram por essa aproximação e converteram no cruzamento, pelo número de veículos totais da aproximação.

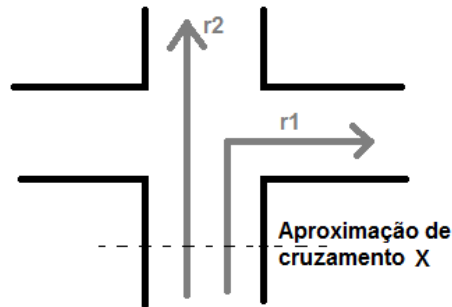


Figura 6: Exemplo de aproximação de cruzamento.

Dado um exemplo (Figura 6) de um conjunto de rotas $r2$ que segue reto em um cruzamento, e um conjunto de rotas $r1$ que realiza uma conversão no mesmo cruzamento, T_{x_j} (onde j é o índice para a conversão à direita no cruzamento) será definido pela Equação (3.4):

$$T_{x_j} = \frac{\sum_{i=rotas_{r1}}(veiculos_i)}{\sum_{i=rotas_{r1}}(veiculos_i) + \sum_{k=rotas_{r2}}(veiculos_k)} \quad (3.4)$$

Tabela 2: Aproximações de cruzamentos e as rotas que passam por elas.

Aprox. n ^o	Cruzam. chegada	Rua de chegada	Rotas ($Rota_{FLX_i}$) da Tabela 1
1	173	24 de maio	{1, 2, 3, 4, 5}
2		Chile	{12, 37}
3	174	Alferes Poli	{6, 18, 21}
4		Chile	{12, 13, 37}
5	175	Chile	{12, 13, 16}
6		Westphalen	{36, 37, 38, 39}
7	176	Chile	{12, 15, 14, 13, 16}
8	177	Cons. Dantas	{17, 27, 3, 7, 38}
9		Kennedy Leste	{20, 11, 28, 4, 8}
10		Mal. Floriano Sul	{31, 15}
11	178	Kennedy Leste	{20, 11, 28, 4, 8}
12		Kennedy Oeste	{24}
13		Westphalen	{36, 19, 39, 16}
14	179	24 de maio	{1, 4, 5}
15		Kennedy Leste	{20, 21, 11, 28}
16		Kennedy Oeste	{24, 9, 33, 39, 16}
17	180	Alferes Poli	{6, 8, 9, 7}
18		Kennedy Leste	{20, 21, 11, 28, 4}
19		Kennedy Oeste	{24, 33, 39, 16}
20	319	Kennedy Leste	{20, 22, 21, 23}
21		Kennedy Oeste	{24, 29, 5, 9, 33, 39, 16}
22	325	Brig. Franco	{10, 35, 23}
23		Chile	{12, 26, 2, 37}
24	532	Chile	{12, 2, 37}
25		Lamenha lins	{25, 26, 27, 28, 29}
26	533	Kennedy Leste	{20, 22, 21, 11}
27		Kennedy Oeste	{24, 5, 9, 33, 39, 16}
28	534	Brig. Franco	{10, 11}
29		Piaui	{34, 35}
30	661	Brig. Franco	{10, 35, 23}
31		Cons. Dantas	{17, 18, 19}
32	662	Cons. Dantas	{17, 18, 19}
33		Lamenha lins	{25, 27, 28, 29}
34	663	24 de maio	{1, 3, 4, 5}
35		Cons. Dantas	{17, 18, 19, 27}
36	664	Alferes Poli	{6, 21, 7}
37		Cons. Dantas	{17, 18, 19, 27, 3}
38	665	Cons. Dantas	{17, 19, 27, 3, 7}
39		Westphalen	{36, 38, 39, 16}

Para maior detalhamento dos dados de conversão, será necessário inferir fatores para as ruas, assim como uma equação para usar esses fatores de forma a ter a taxa inferida de conversão (T_{y_j}). Esse processo está detalhado na seção 4.1.3, assim como os resultados das estimativas.

De forma a manter as soluções geradas pelo algoritmo mais próximas à realidade, estebeceu-se a restrição de que os fluxos com entradas de veículos na região deverão ter 100% de adequação. Ou seja, a soma de todas as rotas que começam por uma entrada deverá ser obrigatoriamente igual ao número de veículos registrados no ambiente real. Para implementar esta restrição, criou-se uma função de normalização para ajustar as quantidades de veículos nas rotas, de forma que os fluxos de entrada tenham exatamente o valor real esperado – mantendo-se sempre, porém, as proporções entre as rotas.

Adicionalmente, tomou-se a decisão de criar uma variável de folga para cada rota, para acomodar variações dos fluxos ao longo do tempo. A variável de folga permite maior flexibilidade nas soluções, para os casos em que não há conservação dos fluxos de entrada. Criou-se então uma rota adicional (“rotas de folga”, que têm término antes da rota original) para cada rota existente. Todas as rotas de folga fazem parte da solução. Para representar uma rota de folga na partícula, 2 valores inteiros são necessários. O primeiro é a quantidade de veículos para cada rota (assim como uma rota comum), e o segundo é a quantidade de cruzamentos (da rota original) que a rota de folga irá passar. Tendo-se então 39 rotas normais (e portanto mais 39 rotas de folga, cada uma com dois valores associados), totaliza-se 117 valores inteiros por partícula. A representação da partícula, na t -ésima iteração do PSO, fica então como $\mathbf{p}^t = (p_1^t, \dots, p_k^t, \dots, p_{117}^t)$, em que os 39 primeiros valores são a quantidade de veículos que utilizam cada rota normal, os 39 seguintes são a quantidade de veículos que utilizam cada rota de folga, e os 39 últimos k valores indicam quantas quadras cada trajeto de rota de folga (com índice $k - 39$) irá seguir de sua rota original (com índice $k - 39 * 2$).

3.3 OTIMIZAÇÃO SEMAFÓRICA

Esta seção apresenta o algoritmo de otimização de planos semaforicos que foi desenvolvido neste trabalho. Como base, partiu-se do algoritmo do PSO contínuo⁹ (descrito na seção 2.4.1).

⁹Neste trabalho, o PSO foi implementado e utilizado em 2 casos distintos – portanto não confundir – para objetivos diferentes: a atribuição de valores de fluxos a rotas e a otimização de planos semaforicos. A seção anterior abordou o primeiro caso, e esta seção aborda o segundo.

Cada partícula do PSO representa uma solução factível para o problema tratado. No caso do problema da otimização semafórica deste trabalho, uma solução factível seria um plano de temporização – para uma região semafórica inteira – que possa ser utilizado em uma simulação. Um plano de temporização semafórica de uma região é caracterizado por:

- Tempo de ciclo, sendo este igual para todos os cruzamentos da região;
- Tempos de cada fase (para cada cruzamento), sendo que cada um desses tempos é composto por:
 - Tempo de verde;
 - Tempos de transição (amarelo e vermelho) após o término do tempo de verde¹⁰;
- Tempos de defasagem (*offset*), que configuram o início do ciclo em cada cruzamento.

As informações detalhadas sobre cada um destes fatores enumerados foram apresentadas na Seção 2.1. Especificamente para o problema tratado neste trabalho, a partícula contém 1 valor de tempo de ciclo (que é igual para todos os cruzamentos da região), 18 valores de *offset* (um para cada cruzamento semaforizado), e 39 tempos de verde (um valor para cada fase em cada cruzamento semaforizado)¹¹. Isso totaliza $z = 58$ valores reais representados em cada partícula.

3.3.1 RESTRIÇÕES PARA AS SOLUÇÕES

Deve-se notar que existem aspectos relevantes para que uma solução de temporização semafórica seja factível. De forma mais importante, observam-se as seguinte restrições:

- Em cada cruzamento, por definição, a soma dos tempos das fases (considerando também os tempos de transição) deve ser sempre igual ao tempo de ciclo;
- O tempo de defasagem deve ser maior ou igual a 0 e menor do que o tempo de ciclo.

Mais especificamente para o algoritmo de otimização, há certas restrições que são especificadas antes da execução, para que somente soluções dentro de um padrão específico sejam geradas. Assim, definiram-se limites (mínimo e máximo) para:

¹⁰Vale ressaltar que os tempos de transição permanecem sempre fixos, conforme informado pela SE-TRAN. Portanto, os valores não são codificados na partícula do PSO.

¹¹Há 15 cruzamentos com 2 fases e 3 cruzamentos com 3 fases (553, 180 e 177 no mapa da Figura 3) na região considerada, o que totaliza $15 \times 2 + 3 \times 3 = 39$ fases.

- O tempo de ciclo;
- Os tempos de cada fase;
- Os tempos de defasagem (*offset*).

3.3.2 INICIALIZAÇÃO DO ENXAME

O conjunto inicial de soluções para o PSO é gerado de forma híbrida, uma parte sendo aleatória e outra parte sendo carregada a partir de um plano de temporização pré-definido por alguma heurística. Isso mostra-se interessante especialmente para que haja a possibilidade de inserir experiência humana no algoritmo. Por exemplo, progressões semaforicas (ondas verdes) podem ser configuradas manualmente conforme se verifique que são interessantes à região semaforica tratada. O algoritmo de otimização, dessa forma, pode ter um início não puramente aleatório, mas sim com alguma direção de experiência humana (o que tem o potencial de melhorar o início e a convergência do algoritmo). A proporção de partículas aleatórias e de pré-definidas na população inicial é configurada por um parâmetro de entrada do algoritmo (*percentToRandomize*).

No caso deste trabalho, o plano de temporização da SETRAN do período das 7h às 9h da manhã, de segunda a sexta, foi utilizado para gerar a segunda parte das partículas (geradas por heurística), considerando-se que seriam programações já utilizadas e testadas na prática. Nos testes (capítulo 4), verificou-se que na maioria dos casos o ótimo global inicial (**best_{global}**) era uma partícula gerada por uma das programações pré-definidas – o que fortalece a tese de que o uso de heurísticas na criação de partículas traria um início melhor ao algoritmo. No decorrer das iterações do PSO, percebeu-se em testes que a movimentação das partículas regida pela equação tradicional do PSO consegue encontrar soluções melhores facilmente, mostrando espaço para aperfeiçoamentos na programação usada tradicionalmente.

Um ponto a ressaltar é que, para todas as partículas (incluindo as geradas aleatoriamente), a ordem das fases permanece igual desde o início até o final da otimização. Neste trabalho, as ordens de fases definidas pela SETRAN foram utilizadas. Deve-se notar ainda, de forma importante, que todas as partículas geradas devem satisfazer às restrições definidas previamente (subseção 3.3.1).

3.3.3 MOVIMENTO DAS PARTÍCULAS

Uma partícula move-se de acordo com a equação geral da velocidade do PSO (equação 2.5), que engloba as componentes social, cognitiva e inercial (seguindo o modelo de decaimento linear citado na seção 2.4.1). No caso da otimização semaforica, varia-se (“move-se”) o tempo de ciclo, os tempos de verde e os tempos de *offset*. Os tempos de transição (amarelo e vermelho) permanecem sempre fixos desde o início – conforme formato do cruzamento e velocidade da via – e portanto não precisam ser representados nas partículas.

Ao final do movimento de cada partícula deve-se observar, porém, que não é garantida a factibilidade da solução. Podem sempre existir parâmetros que não satisfazem às restrições apresentadas na subseção 3.3.1. Portanto, deve-se seguir o processo de reparação apresentado na subseção 3.3.4 para que a solução se torne adequada para uso na prática.

3.3.4 REPARAÇÃO DAS PARTÍCULAS

Considerando-se os problemas apresentados na subseção 3.3.3 sobre a factibilidade das soluções, um processo de normalização foi desenvolvido para adequar as soluções para uso prático. Para isso, toma-se como base as restrições da subseção 3.3.1.

Primeiramente, o tempo de ciclo é ajustado de acordo com a equação (3.5).¹²

$$tempoCiclo \leftarrow \begin{cases} tempoCicloMin, & \text{se } tempoCiclo < tempoCicloMin \\ tempoCicloMax, & \text{se } tempoCiclo > tempoCicloMax \end{cases} \quad (3.5)$$

Os tempos de offset são então ajustados de acordo com o tempo de ciclo. Considera-se o offset como um valor cíclico, utiliza-se a equação 3.6, que calcula o módulo do offset pelo ciclo. Define-se neste caso o módulo como sendo sempre um valor positivo e cíclico, sendo que quando o offset é negativo ou maior ou igual ao ciclo, é como se tivesse feito uma volta dentro do próprio ciclo. Por exemplo: $mod(-1, 10) = 9$, $mod(-2, 10) = 8$, $mod(10, 10) = 0$, $mod(11, 10) = 1$ e $mod(1, 10) = 1$.

$$offset \leftarrow mod(offset, ciclo) \quad (3.6)$$

¹²Os limites são especificados como parâmetros de entrada para o algoritmo. Vide Tabelas 7 e 11 para exemplos de valores utilizados.

O próximo passo é normalizar os tempos de fases. Primeiramente, deve-se colocar os tempos dentro dos limites permitidos¹³, segundo a equação (3.7), que é aplicada para cada fase de cada cruzamento.

$$tempoFase \leftarrow \begin{cases} tempoFaseMin, & \text{se } tempoFase < tempoFaseMin \\ tempoFaseMax, & \text{se } tempoFase > tempoFaseMax \end{cases} \quad (3.7)$$

Ainda segundo a especificação das restrições, a soma dos tempos de fases deve ser sempre igual ao tempo ciclo (para cada cruzamento). Caso essa condição não se verifique em determinado cruzamento, os tempos de verde devem ser ajustados (diminuídos ou aumentados) proporcionalmente para que a soma se torne adequada. A equação (3.8) apresenta o cálculo da razão (r) pela qual cada tempo de verde deve ser multiplicado para que a soma (tempos de verde + tempos de transição) seja igual ao tempo de ciclo.

$$r = \frac{tempoCiclo - \sum_{transicao} fases}{\sum_{verde} fases} \quad (3.8)$$

O ajuste de cada tempo de verde então é executado pela equação (3.9):

$$tempoFaseVerde \leftarrow r \cdot tempoFaseVerde \quad (3.9)$$

Quando a soma das fases já for igual ao tempo de ciclo, a razão r será igual a 1, e dessa forma naturalmente nenhum ajuste será feito.

3.3.5 MUTAÇÃO DAS PARTÍCULAS

Tendo-se o objetivo de obter maior variabilidade do enxame, expandindo com isso o espaço de busca, o operador de mutação foi introduzido. Este operador realiza pequenas perturbações em determinadas partículas, de acordo com parâmetros de probabilidade (*particleMutationProbabilty* e *parameterMutationProbabilty*). O primeiro parâmetro é utilizado para escolher se determinada partícula sofrerá mutação, e o segundo é utilizado para escolher se determinada característica (dentro de uma partícula que foi escolhida) será mutada. Cada característica selecionada para mutação é então reinicializada de forma aleatória, de maneira igual à utilizada na inicialização da população.

¹³Assim como no tempo de ciclo, os limites dos tempos de fases são especificados como parâmetros de entrada para o algoritmo. Vide Tabelas 7 e 11 para exemplos de valores utilizados.

3.3.6 CÁLCULO DO FITNESS

O *fitness* (medida de desempenho) de cada partícula é determinado através de simulações com o simulador SUMO. Tendo-se uma programação semafórica, que constitui a partícula, cujo desempenho deseja ser testado em determinada condição de tráfego, uma simulação deve ser executada e os resultados decorrentes verificados. O processo de avaliação do fitness ocorre conforme enumerado abaixo:

1. Salvar programação semafórica da partícula em um arquivo de temporização semafórica do SUMO (formato XML);
2. Executar N_s simulações com a programação semafórica salva. Os resultados de cada simulação são gerados em arquivos XML, sendo o mais relevante o arquivo *tripinfo*, que contém informações detalhadas de cada viagem completada por cada veículo da simulação. A partir dos resultados, calcula-se o fitness de cada simulação conforme a métrica de desempenho considerada;
3. Tirar a média dos resultados de fitness das N_s simulações.

As N_s simulações são executadas tendo em vista que os resultados de uma simulação para outra podem variar, considerando-se que o SUMO utiliza fatores aleatórios no comportamento dos motoristas (KRAJZEWICZ et al., 2002). O arquivo de temporização semafórica do SUMO tem um formato XML específico, sendo definido na documentação em (SUMO, 2014c). O arquivo de saída *tripinfo* contém informações detalhadas sobre cada viagem realizada pelos veículos da simulação, dentre elas a duração da viagem e a distância percorrida. Mais detalhes sobre este arquivo estão disponíveis na documentação do SUMO em (SUMO, 2014d).

A Figura 7 apresenta um diagrama que ilustra o funcionamento geral do sistema de otimização semafórica baseado no PSO, e sua relação com o simulador SUMO.

Para que o ambiente da simulação tenha tempo de entrar em estado de regime (o que significa, em outras palavras, ter um número de veículos expressivo rodando), um tempo de preparação (*warmup*) foi introduzido. Ele constitui-se de um tempo inicial em que a simulação é executada sem fazer cálculos estatísticos – pois considera-se que nesse período o sistema ainda está em fase de transição.

A métrica de desempenho utilizada como *fitness* neste trabalho é o atraso médio. Esta métrica representa o tempo dispendido pelos veículos ao andarem abaixo da velocidade máxima permitida (o detalhamento foi feito na seção 2.3).

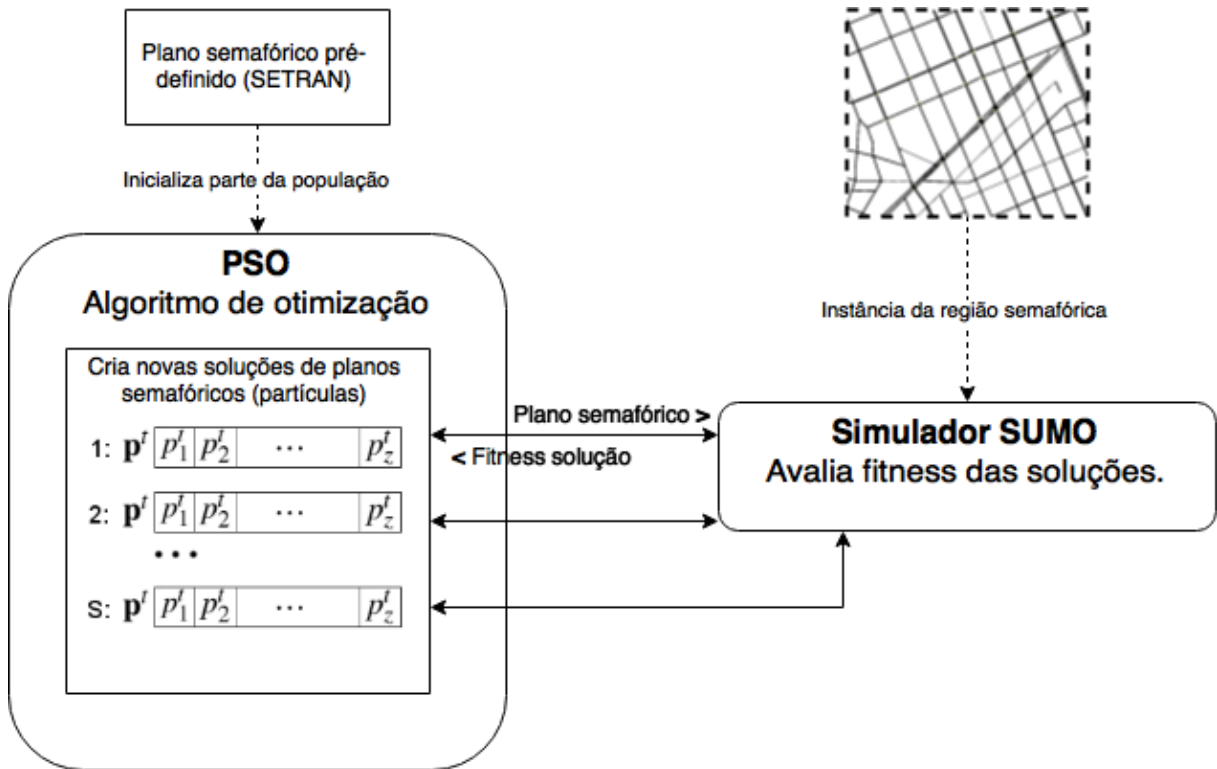


Figura 7: Diagrama geral do sistema de otimização semafórica baseado no PSO, e sua relação com o SUMO.

Outras métricas levadas em conta são o tempo de viagem e o *throughput* (também explicados na seção 2.3). Essas métricas não são utilizadas diretamente como *fitness* (em conjunto com o atraso médio), pois a otimização multi-objetivo, neste caso, traria complexidades adicionais que estão fora do escopo deste trabalho. Os valores são observados, porém, de forma manual para atestar melhor a qualidade de cada solução gerada pelo otimizador.

Adicionalmente, a análise manual pode considerar outros fatores estatísticos além da média, como por exemplo o desvio padrão, máximo e mínimo, entre outros, tendo como objetivo analisar melhor o comportamento do sistema. Em especial, pode ser interessante levar em conta o ponto de vista dos motoristas (que possuem experiência e senso de justiça próprios). A média simples geralmente representa bem o comportamento global do sistema, porém tem limitações em considerar variações locais menores. Ela pode não representar, por exemplo, cenários que haja injustiça na distribuição de tempo de verde do ponto de vista dos motoristas (como por exemplo, uma via receber muito pouco tempo de verde em relação às outras) – mesmo que o sistema tenha tido melhorias globais. Também é importante valorizar a observação visual dos resultados, pois inúmeros *insights* podem ser obtidos através disto.

3.4 CONCLUSÃO

Este capítulo apresentou o procedimento adotado neste trabalho para criar um modelo de simulação no *software* SUMO e desenvolver um sistema de otimização semafórica para a região SA-14. O procedimento de coleta e processamento de dados reais de tráfego foi apresentado. Foi tomada a decisão de analisar detalhadamente cada cruzamento de entrada de veículos na região, com geração de gráficos e média móvel e histogramas, tendo o objetivo de encontrar distribuições de probabilidade que melhor se encaixem em cada caso. Isso foi realizado para aumentar o nível de realismo das simulações.

Informações a respeito do funcionamento do modelo de rotas do SUMO foram apresentadas. Também, mostrou-se como o conjunto de rotas mais importantes da região SA-14 foi identificado – heurísticamente a partir do conhecimento de áreas de interesse. Tendo em vista ainda a não disponibilidade de dados reais de taxas de conversão, estas foram inferidas a partir da importância de cada via e das faixas de conversão.

Apresentou-se que os dados reais de demanda de tráfego, as taxas de conversão e o conjunto de rotas inferidos são utilizados como entrada para o algoritmo do PSO, desenvolvido para determinar bons valores de demanda para cada rota – de forma que a simulação se torne mais próxima quanto possível da realidade.

Posteriormente, apresentou-se informações a respeito do sistema de otimização semafórica, desenvolvido com o algoritmo do PSO. A codificação das partículas, restrições, inicialização do enxame, movimentação, reparação e mutação das partículas no algoritmo do PSO adaptado para otimização semafórica foram discutidas. Por fim, apresentou-se que o sistema de otimização utiliza as simulações com o SUMO para avaliar o desempenho de cada solução gerada, em termos da métrica de atraso médio.

4 RESULTADOS

Esse capítulo traz os resultados do sistema proposto neste trabalho, que envolve um modelo de otimização com simulação para ajuste do plano semaforico para uma região específica da cidade de Curitiba. O capítulo está dividido em duas seções principais: Na seção 4.1 é realizada uma análise exploratória dos dados recebidos da SETRAN (cerca de 270MB de registros), incluindo o processo de otimização para alocação de veículos por rota; já a seção 4.3 traz os resultados da otimização de planos semaforicos da região estudada.

4.1 ANÁLISE EXPLORATÓRIA DOS DADOS

A seção 3.1 apresentou o modo como os dados de tráfego foram recebidos da SETRAN. Esta seção descreve como estes dados foram tratados de forma a se obter informação relevante para o processo de otimização com simulação que é o objetivo maior deste trabalho. Devido à grande diversidade de dados de entrada e de gráficos que poderiam ser gerados, tomou-se a decisão de criar um software em Java para realizar as análises de forma mais rápida e automatizada, ao gerar gráficos de média móvel e histogramas de variáveis de interesse. Para todas as tarefas desta seção, foram utilizados dados de tráfego dos dias úteis de Novembro de 2014. Os principais resultados obtidos nesta fase exploratória são:

- Esquema de comportamento geral do trânsito em toda a região (dias úteis, médias para um mês, pico da manhã);
- Gráficos de média móvel para os cruzamentos de entrada da região, de intensidade e ocupação, para o pico da manhã;
- Histogramas para os cruzamentos de entrada da região, de intensidade, para pequenos intervalos de horários;

Uma análise em planilha de como o trânsito se comporta globalmente na região estudada pode ser visualizada na Figura 8. Essa análise foi realizada utilizando médias dos dados de tráfego dos dias úteis, com período de uma hora de integração de dados, para o horário das 8h às 9h da manhã. A planilha representa o mapa da região SA-14 de forma simplificada, sendo que as ruas estão dispostas aproximadamente da mesma forma que no mapa orientado com o norte para cima¹. Os quadrados em cinza indicam os sensores *CityLog* em cada cruzamento (cada número representa o índice do sensor de acordo com o mapa da Figura 3, e um ‘X’ indica que não há sensor). Os números em cores indicam a medição de veículos por hora durante os tempos de verde (cada valor representa uma média geral do mês). É interessante observar, em especial, que a porta de entrada com maior volume de veículos é o controlador 176, da Rua Chile no cruzamento com a Av. Marechal Floriano Peixoto, com 1980 veículos por hora. É importante citar que esta análise foi realizada para perceber os pontos de maior tráfego.

Adicionalmente, é importante ressaltar que na data de análise (Novembro/2014), dados dos sensores 663 (aproximações 24 de Maio e Cons. Dantas) e 179 (aproximação 24 de Maio) não foram recebidos da SETRAN – ou continham falhas – por conta de problemas ou realocações de sensores nessa época. Então, para estes três casos específicos, inferências de valores foram feitas a partir dos dados de Julho/2014, quando estes sensores estavam funcionando corretamente. As proporções entre os fluxos de Julho/2014 foi mantida para essas 3 aproximações, porém dimensionando os valores para cima para corresponderem a um fluxo médio mais elevado em Novembro/2014.

Também, as aproximações 176 e 177 da Av. Marechal Floriano não possuíam sensores instalados no momento da obtenção dos dados. Portanto, o número de aproximações semaforizadas que possuem dados de tráfego é de 37 das 39 que existem no total.

Um aspecto relevante também a ressaltar é que os sensores *Citylog* podem efetuar erros nas medições – como por exemplo, quando um veículo ocupa 2 faixas simultaneamente, o sensor interpreta como se fossem 2 veículos passando. Em outros casos, dois ou mais veículos podem ser detectados como um só, caso estejam muito próximos um do outro. Na Figura 8, alguns casos aparecem mais proeminentes, como por exemplo o cruzamento 319 na Rua Brigadeiro Franco. Ali há fluxo muito grande de veículos (2361 veículos/h), sem que haja veículos suficientes na entrada. Também, o cruzamento 175 na Rua Chile, há uma diminuição muito grande do número de veículos (948 veículos/h) em relação ao cruzamento anterior (1980 veículos/h). Outro caso proeminente é o cruzamento

¹As flechas indicam a direção de tráfego de cada rua. As cores estão em uma escala de acordo com a intensidade do fluxo de veículos: verde menor, laranja intermediário e vermelho maior.

177 na Av. Pres. Kennedy, onde há um aumento muito grande no fluxo (1794 veículos/h), desproporcional em relação à quantidade de veículos que chegam do cruzamento anterior (888 veículos/h).

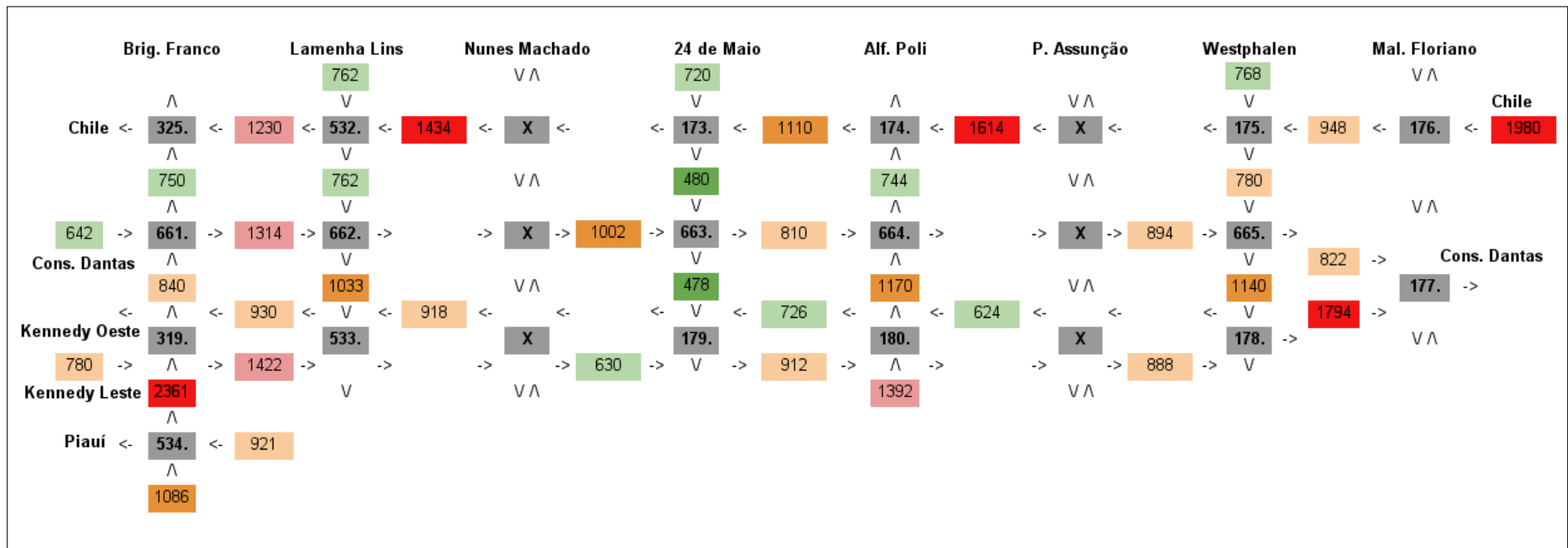


Figura 8: Distribuição do fluxo de veículos, em veículos/hora, nos diversos cruzamentos da região SA-14 no horário das 8h às 9h da manhã (média geral do mês de Novembro/2014).

Pode-se notar que a região não é totalmente coberta de sensores, sendo que as ruas menos movimentadas – que não possuem semáforos nos cruzamentos – não possuem monitoramento. Deve-se observar que os seguintes cruzamentos controlados por semáforos constituem-se em entradas de veículos para a região:

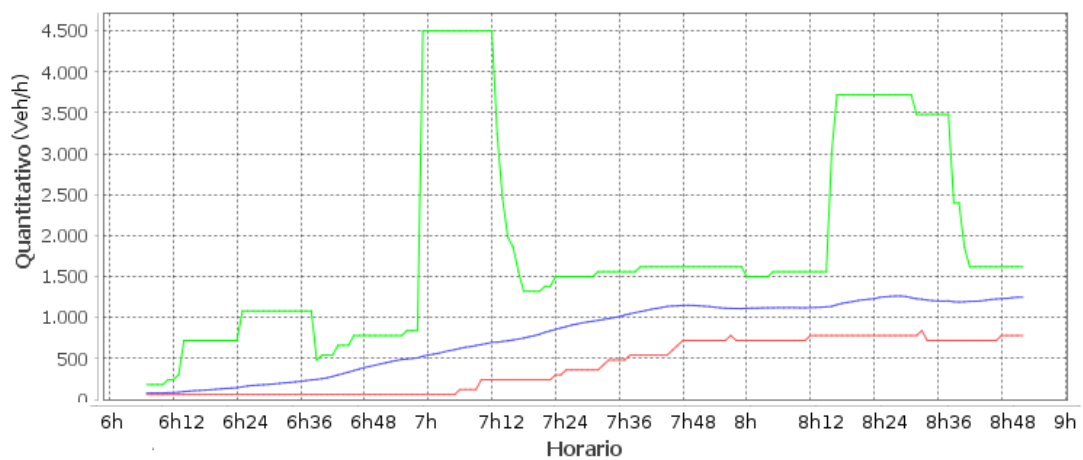
- 173, Rua 24 de Maio, sentido sul;
- 175, Rua Desembargador Westphalen, sentido sul;
- 176, Rua Chile, sentido oeste;
- 180, Rua Alferes Poli, sentido norte;
- 319, Avenida Presidente Kennedy, sentido leste;
- 532, Rua Lamenha Lins, sentido sul;
- 534, Rua Brigadeiro Franco, sentido norte;
- 534, Rua Piaui, sentido oeste;
- 661, Rua Conselheiro Dantas, sentido leste.

Uma análise estatística detalhada nesses pontos de entrada foi feita, com o objetivo de caracterizar estatisticamente o fluxo de veículos que entra na região, de forma que a simulação das rotas de veículos se torne mais realista. Assim como para a análise realizada em planilha, os dados utilizados para geração destes gráficos são dos dias úteis do período de um mês, ficando a diferença pelo fato de que agora o intervalo de tempo é de minuto em minuto, e não de hora em hora. Sem este intervalo menor, não seria possível perceber variações em mais curto espaço de tempo ao longo do período estudado, e nem mesmo encontrar as distribuições teóricas de entrada. É importante ressaltar que tanto para as médias móveis quanto para os histogramas, há variações nas quantidades de amostras devido ao fato de que existem vários dados ausentes para determinados sensores em determinados horários, e para cada horário de aproximação de cruzamento, só são levados em consideração os horários em que há dados presentes de todos os sensores da aproximação para tal horário.

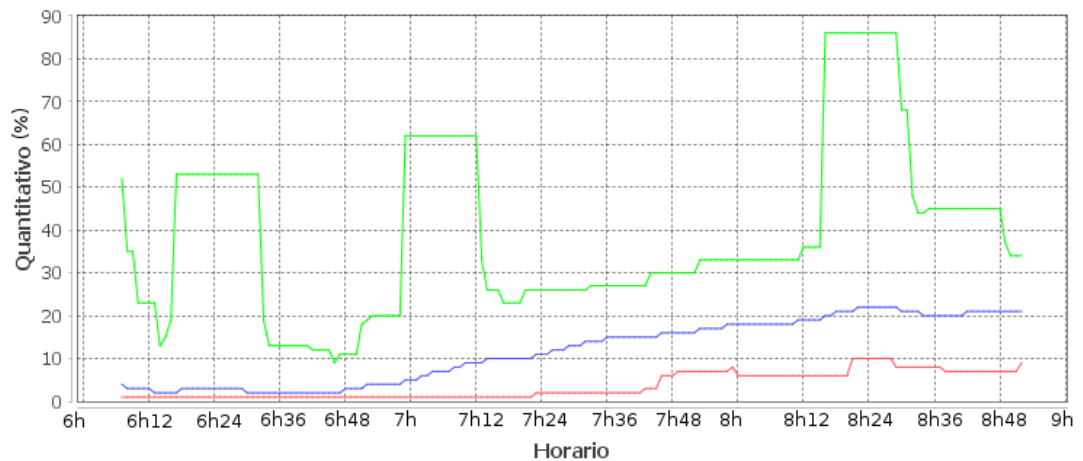
4.1.1 VARIAÇÃO DO TRÁFEGO NO INTERVALO DE PICO DA MANHÃ

Para observar a variação do tráfego de veículos ao longo do tempo nas entradas da região semaforizada, os gráficos das figuras seguintes foram gerados com média móvel (janela

de tamanho 15), baseando-se nos dados dos dias úteis de Novembro/2014. Sobre cada um dos gráficos é feita uma análise específica. É importante citar que a taxa de ocupação e a intensidade² do tráfego são dados correlacionados, de tal forma que a tendência é a ocupação seguir aumentando conforme a intensidade cresce, mas que a partir de certo ponto, se a ocupação se tornar muito alta, em geral ocorre uma saturação da via. Quando isso ocorre, mesmo que a ocupação se mantenha ou até diminua um pouco, a tendência é a intensidade cair, pois a saturação da via leva a velocidades mais baixas, diminuindo a capacidade máxima da via na prática.



(a) Intensidade



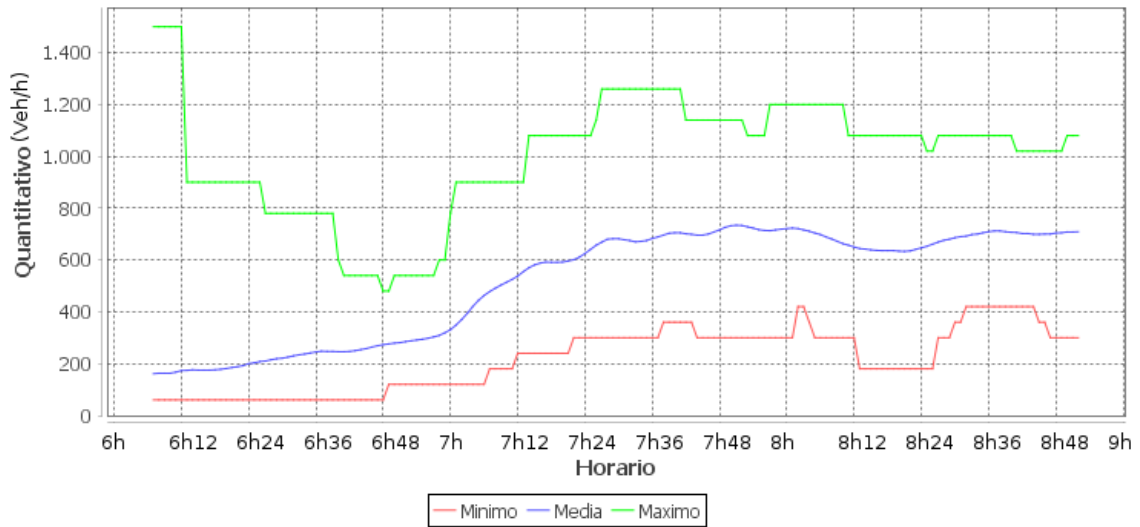
(b) Ocupação

Figura 9: Intensidade e ocupação de tráfego no sensor 173, Rua 24 de Maio.

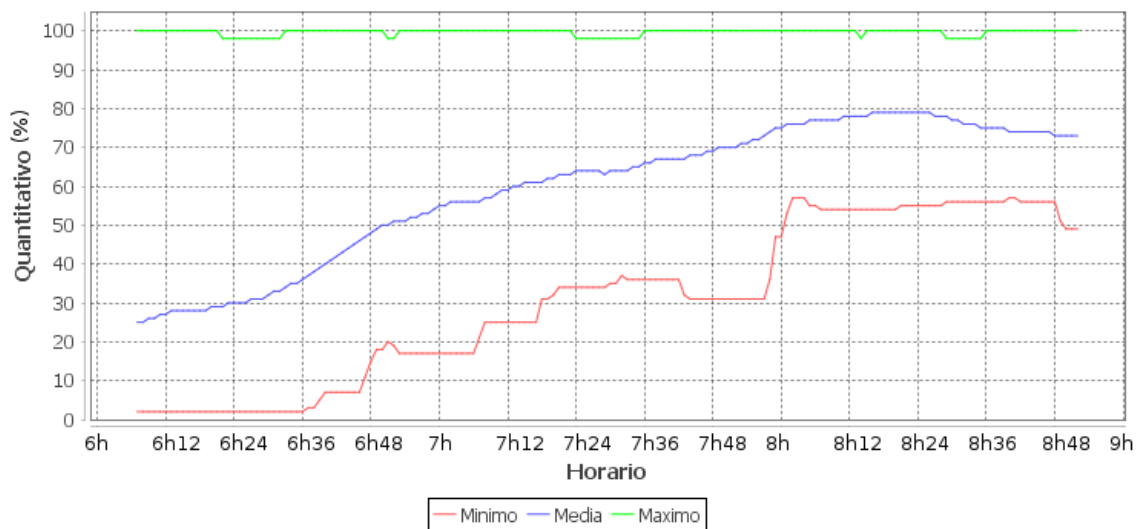
No sensor 173, Rua 24 de Maio (Figura 9 (a) e (b)), a ocupação cresce acompanhando a intensidade, indicando fluidez do tráfego. Tráfego crescente até 8h, quando

²Medida em veículos por hora (“veh/h” nos gráficos).

começa a diminuir.



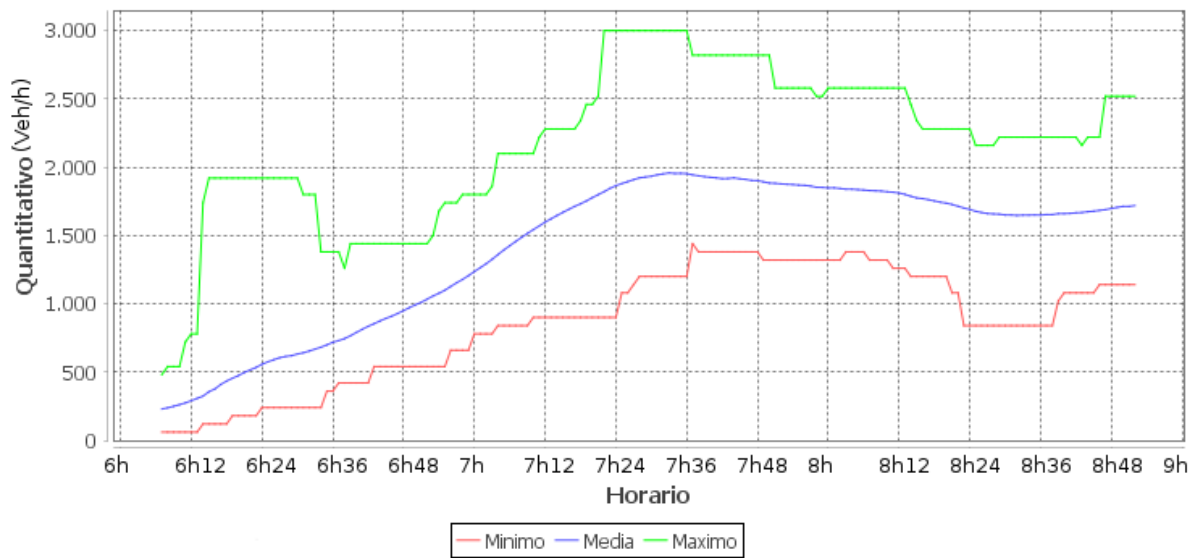
(a) Intensidade



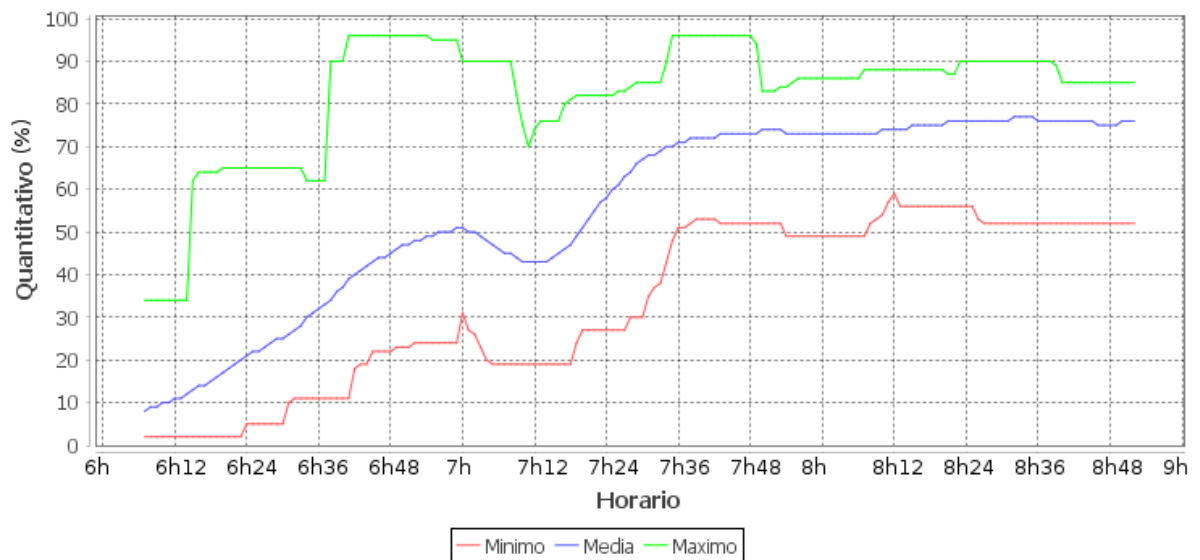
(b) Ocupação

Figura 10: Intensidade e ocupação de tráfego no sensor 175, Rua Westphalen.

Já para o sensor 175, Rua Westphalen (Figura 10 (a) e (b)), há saturação visível a partir de 8h. Ocupação cresce rapidamente até 8h30, quando começa a diminuir. No entanto, a intensidade do tráfego cresce rapidamente somente até 7h30, crescendo pouco até o pico das 8h. Após isso, a intensidade diminui, apesar da ocupação continuar crescendo. A situação começa a melhorar às 8h24, até aparente princípio de normalização em 8h30.



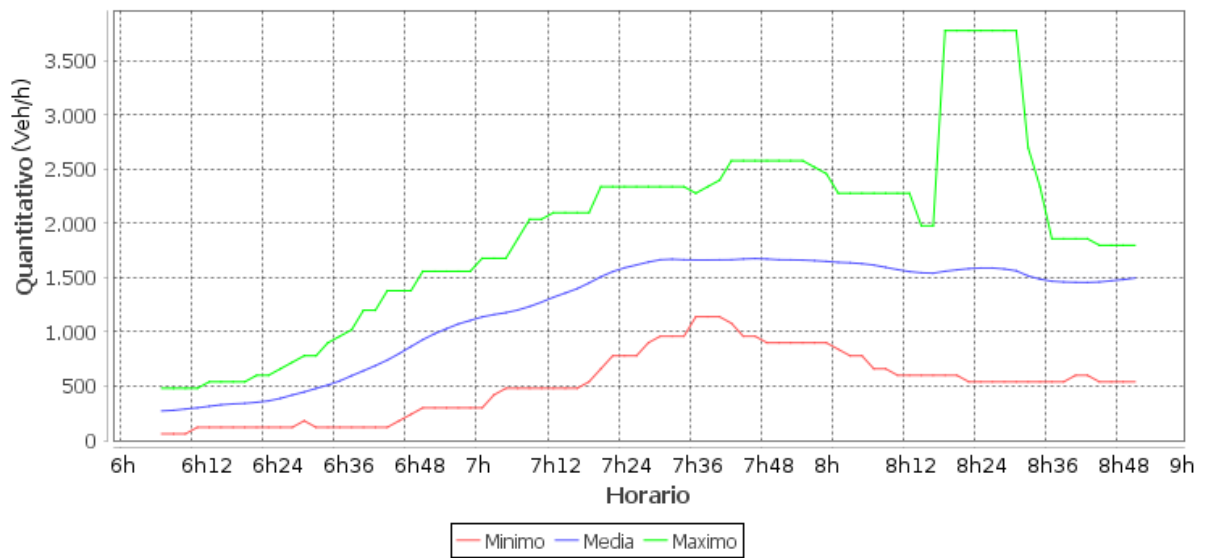
(a) Intensidade



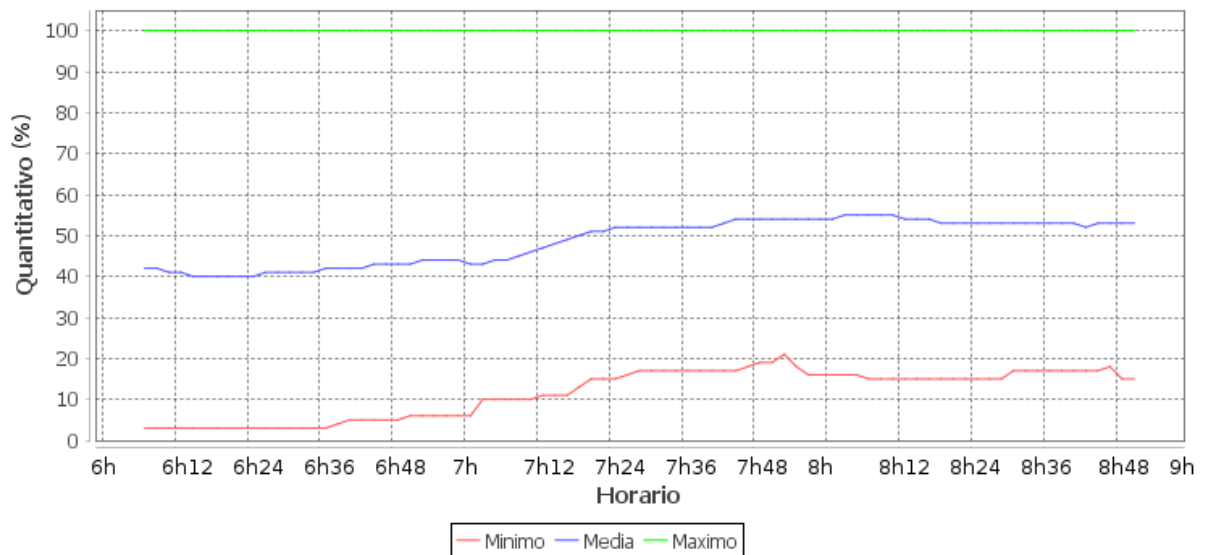
(b) Ocupação

Figura 11: Intensidade e ocupação de tráfego no sensor 176, Rua Chile.

Para o sensor 176, Rua Chile (Figura 11 (a) e (b)), ocorre um comportamento atípico entre 7h e 7h15. A quantidade de veículos aumenta, mas a ocupação cai, subindo rapidamente entre 7h15 e 7h36. O efeito observado entre 7h e 7h15 parece ser um reflexo da mudança de programação no horário das 7h, que trouxe considerável melhoria na fluidez do tráfego. Nos demais horários, o comportamento parece padrão, com maior intensidade levando a maior ocupação, com exceção do horário a partir de 7h40, em que a quantidade de carros diminui, mas a ocupação ($\sim 75\%$) tem tendência de leve crescimento. Este último comportamento é um indício de saturação da via.



(a) Intensidade



(b) Ocupação

Figura 12: Intensidade e ocupação de tráfego no sensor 180, Rua Alferes Poli.

No sensor 180, Rua Alferes Poli (Figura 12 (a) e (b)), intensidade aumenta rapidamente até 7h30, quando fica praticamente estável. A ocupação aumenta lentamente entre 7 e 8h, em torno do nível dos 50%, mas com picos frequentes em 100%. Esse comportamento indica um princípio de saturação na via, embora a intensidade de tráfego não aparente sofrer prejuízo.

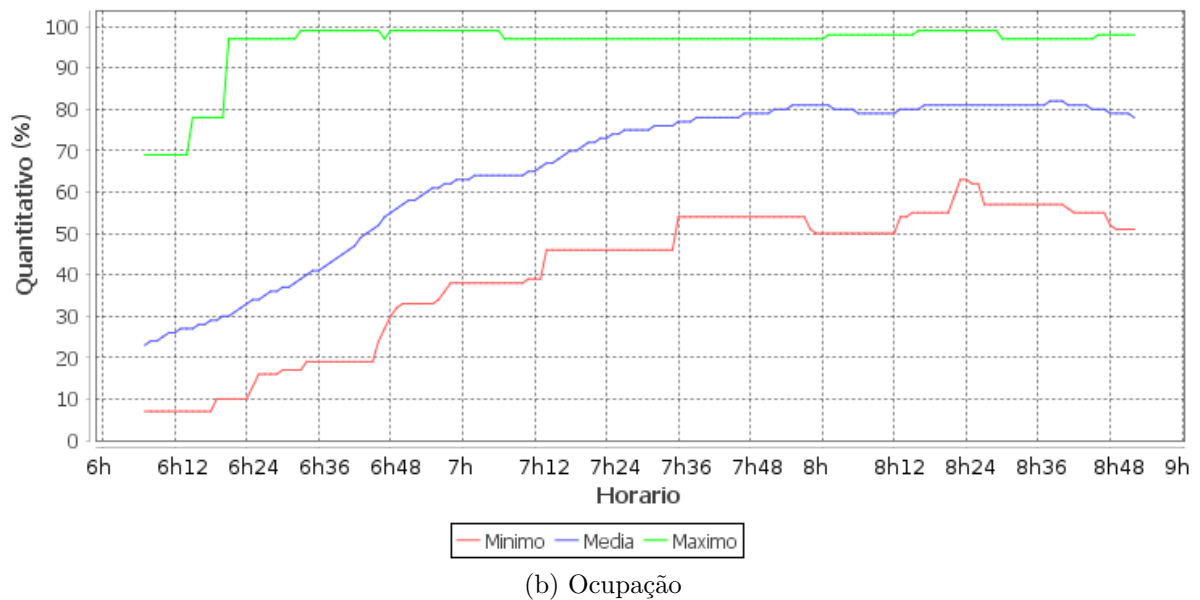
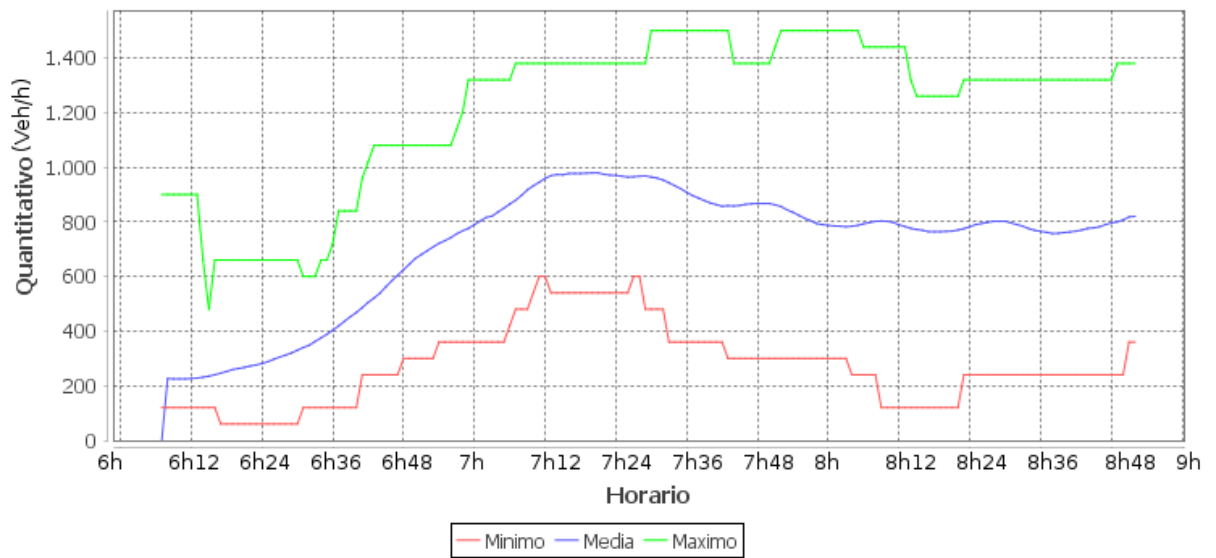
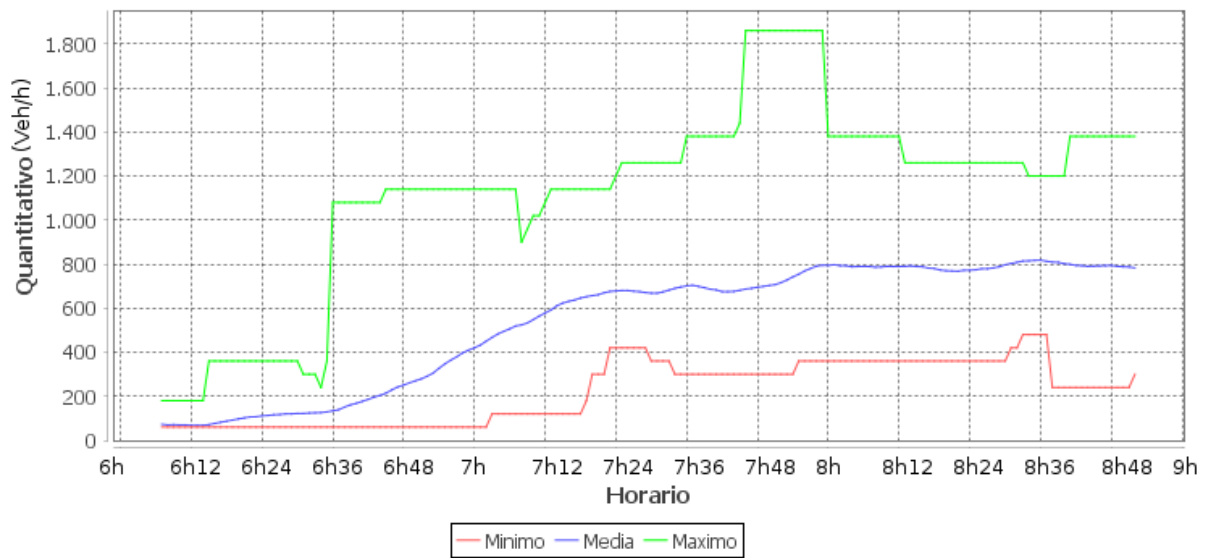
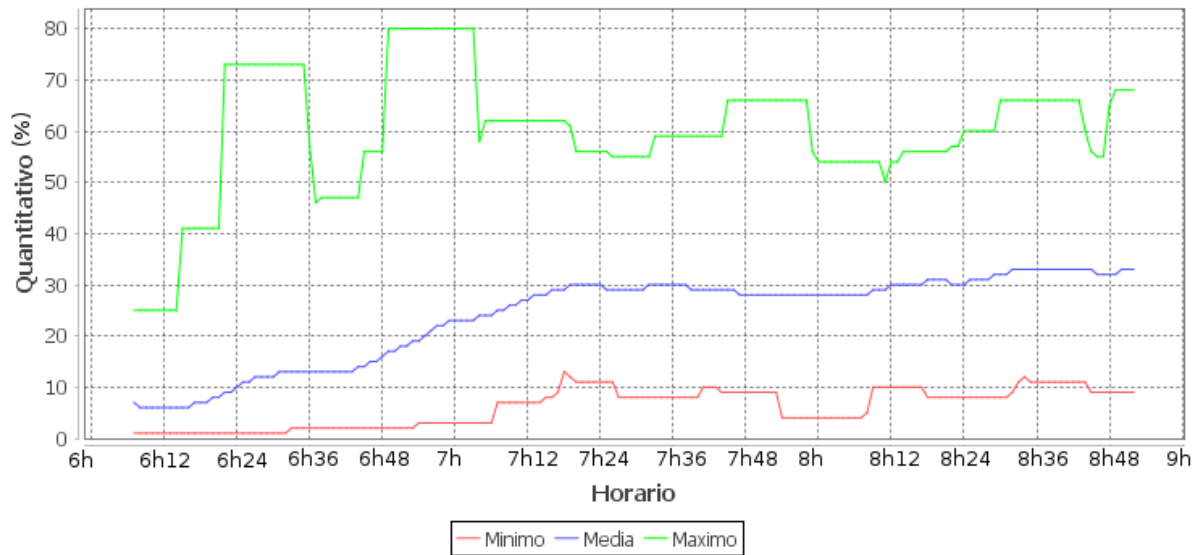


Figura 13: Intensidade e ocupação de tráfego no sensor 319, Av. Pres. Kennedy.

No sensor 319, Av. Pres. Kennedy (Figura 13 (a) e (b)), a intensidade cresce até 7h12, ficando estável até 7h24, sofrendo diminuição logo em seguida. No entanto a ocupação segue uma curva que lembra uma exponencial crescente com limite superior em torno dos 80%, atingindo esse limite por volta de 7h48. Existe saturação em 319, começando a partir de 7h12. Além disso, é possível perceber pelos altos picos de ocupação que o tempo de verde passa por minutos de fluxo intenso, a partir das 6h24.



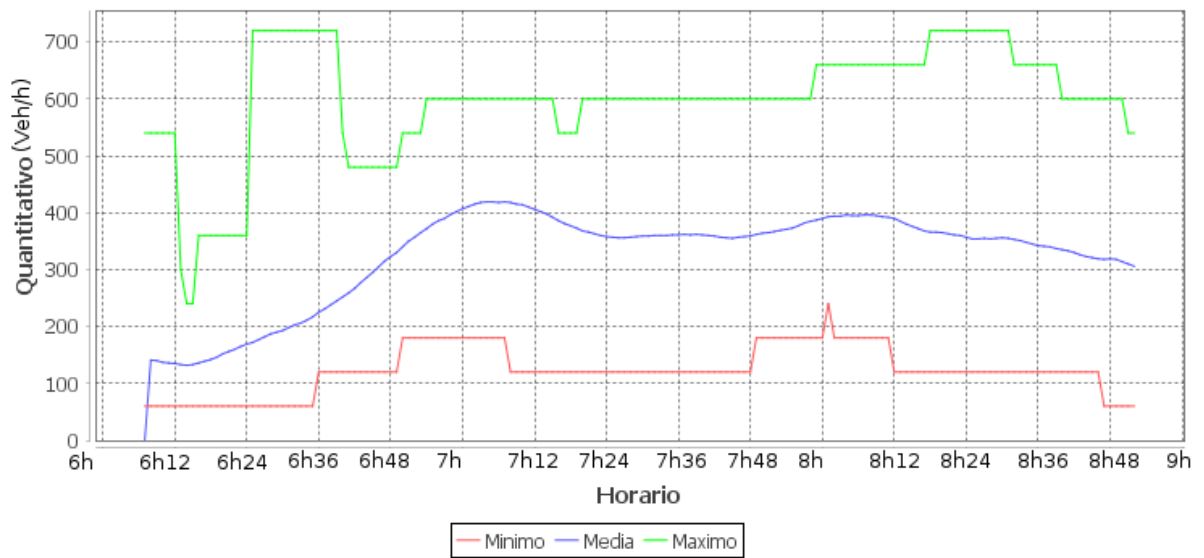
(a) Intensidade



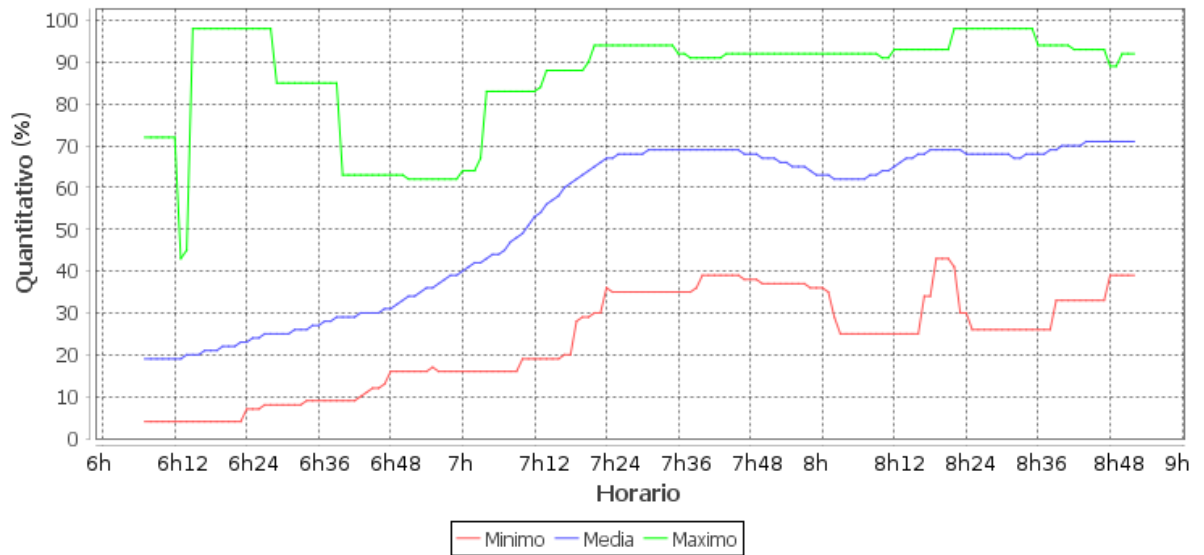
(b) Ocupação

Figura 14: Intensidade e ocupação de tráfego no sensor 532, Rua Lamenha Lins.

No sensor 532, Rua Lamenha Lins (Figura 14 (a) e (b)), a ocupação segue crescendo desde 6h48 até 8h16, onde chega em torno dos 50%. Intensidade segue aproximadamente a mesma tendência, com aparente pequeno problema no horário entre 7h42 e 7h54, em que a intensidade diminui, apesar da ocupação continuar crescendo.



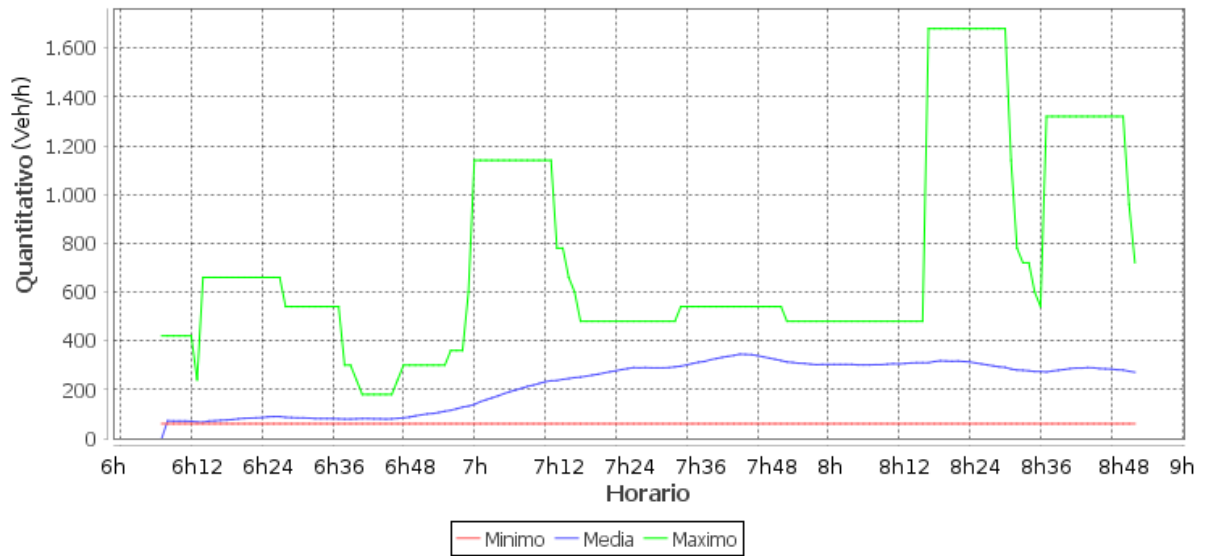
(a) Intensidade



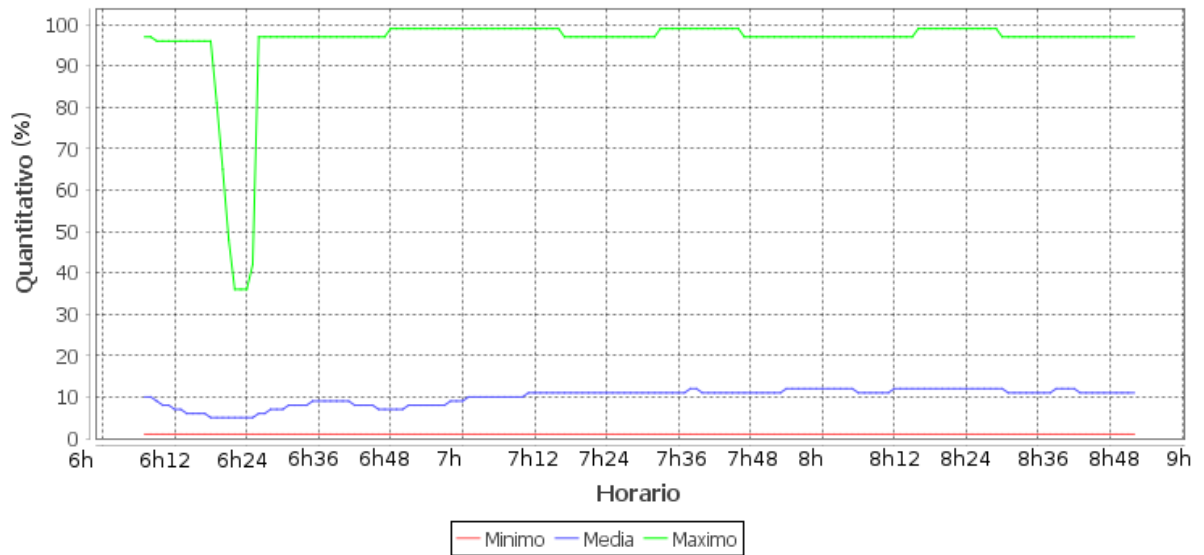
(b) Ocupação

Figura 15: Intensidade e ocupação de tráfego no sensor 534, Rua Brigadeiro Franco.

No sensor 534, Rua Brigadeiro Franco (Figura 15 (a) e (b)), evidente saturação. Ocupação cresce rapidamente até 7h24, quando se mantém estável até 7h50 com 70%. Depois diminui um pouco, até voltar a aumentar ao nível anterior em 8h18. A intensidade cresce somente até 7h06, diminuindo até chegar em um nível estável em 7h24. Ocorre alguma melhoria somente após 7h54, com tráfego diminuindo após 8h18, embora a ocupação não dê sinal de redução.



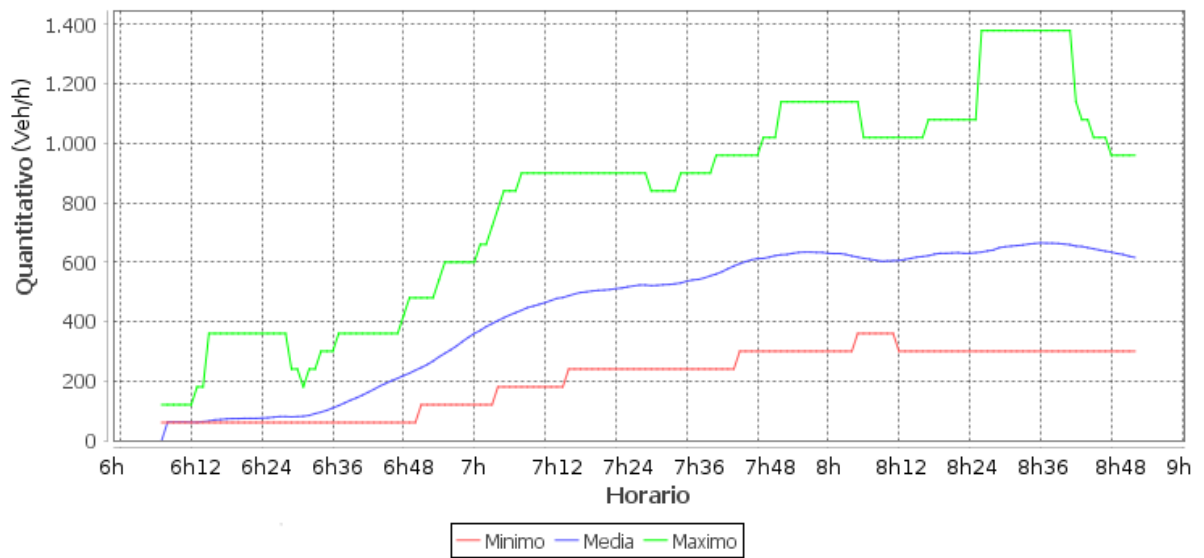
(a) Intensidade



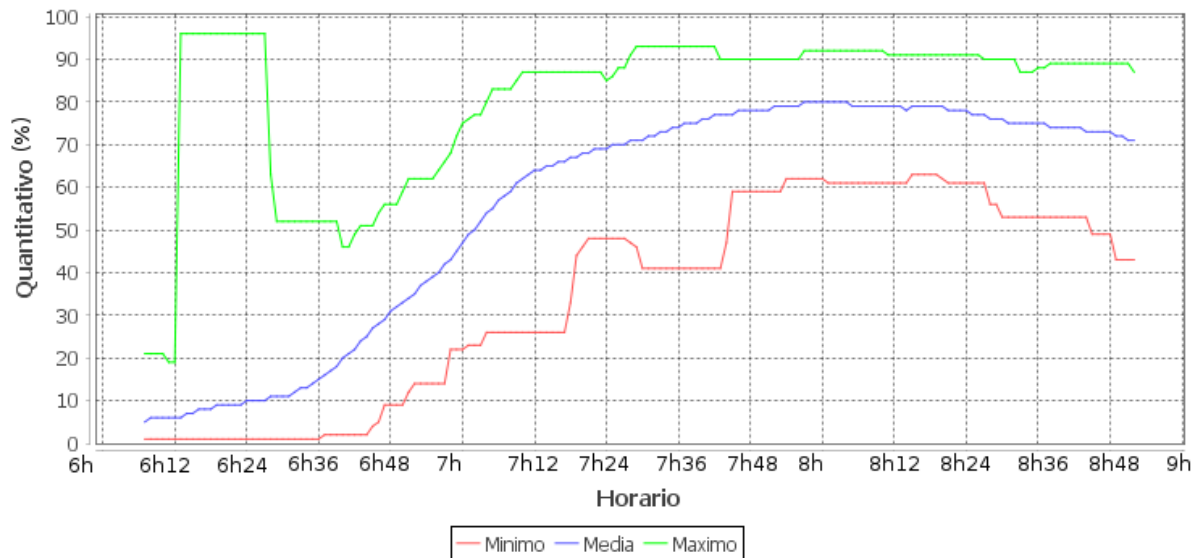
(b) Ocupação

Figura 16: Intensidade e ocupação de tráfego no sensor 534, Rua Piauú.

No sensor 534, Rua Piauú (Figura 16 (a) e (b)), é possível notar que a média de ocupação permanece bem baixa e constante, embora haja picos de ocupação em 95%. Isso indica que o tempo de verde está com tráfego intenso de veículos em determinados minutos. A intensidade cresce até 7h48, com leve tendência de redução após este horário.



(a) Intensidade



(b) Ocupação

Figura 17: Intensidade e ocupação de tráfego no sensor 661, Rua Cons. Dantas.

No sensor 661, Rua Cons. Dantas (Figura 17 (a) e (b)), comportamento típico. Intensidade e ocupação crescem lado a lado, o que indica que o tráfego flui sem problemas, apesar da ocupação aproximada de 70%.

A partir do estudo destes gráficos, é possível concluir que no geral, o volume de trânsito cresce até as 8h, começando a diminuir lentamente logo em seguida, até que comece um crescimento para o pico do almoço. Os casos com comportamento diferenciado ocorrem em 176, 319, 180 e 534 Brigadeiro, em que há aparente saturação da via. É possível perceber também que em determinados períodos, a média permanece aproximadamente constante, enquanto que em outros, há rápido crescimento, o que faz com que

estes últimos necessitem de intervalos de observação menores para melhor compreensão. Quanto a ocupação, em condições normais, costuma aumentar conforme a intensidade do tráfego aumenta, sendo o a excessão o caso em que a taxa de ocupação se torna tão alta, que a saturação ocorre e a intensidade diminui, embora a ocupação continue alta.

4.1.2 IDENTIFICAÇÃO DAS DISTRIBUIÇÕES DE PROBABILIDADE DO TRÁFEGO DE CHEGADA

Os histogramas de fluxos de veículos foram criados com um intervalo entre classes de 1 veículo por minuto, a partir de dados dos dias úteis do mês de Novembro/2014, nos intervalos de maior intensidade pela manhã – geralmente entre 7h55 e 8h, de acordo com os gráficos de média móvel. O período foi escolhido principalmente com o objetivo de caracterizar uma situação de pico de intensidade de tráfego. Também, buscou-se preferencialmente utilizar períodos em que há pouca variação da média, o que permite criar histogramas mais confiáveis e com menor ruído.

Para a simulação, assume-se que a mesma distribuição de fluxo ocorrerá durante o tempo todo. Para obter as distribuições teóricas de probabilidade, os dados foram submetidos à ferramenta de análise de entrada do *software* Arena (ARENA, 2015), que permite fazer análises com as distribuições Beta, Erlang, Gamma, LogNormal, Normal, Poisson, Triangular e Weibull.

Esta ferramenta utiliza como critério de qualidade do ajuste dos dados à distribuição teórica considerada o erro quadrático médio e o p-value do teste chi-quadrado. Resumidamente, para o teste de chi-quadrado com nível de significância de 5%, p-value < 0,05 indica que existe diferença estatística entre os dados amostrados e o esperado para a distribuição teórica considerada e, portanto, rejeita-se a hipótese de que os dados sejam provenientes da distribuição teórica considerada. Se p-value \geq 0,05, não há evidência estatística que diferencie os dados amostrados do esperado para a distribuição teórica considerada que, portanto, é aceita. Dentre as distribuições teóricas de probabilidade aceitas para os dados amostrados, considera-se aquela de menor erro quadrático médio.

A seguir, apresentam-se os histogramas gerados pelo software, sendo estes ajustados à distribuição de probabilidade com menor erro quadrático médio (representada em cada um por um traço azul). O número de classes dos histogramas é escolhido pelo próprio software. A unidade utilizada é discreta, de veículos por minuto. Entretanto, optou-se por considerar variáveis contínuas para a identificação das distribuições de probabilidade. Posteriormente, será considerada um agregação de intervalos para a geração das amostras

das distribuições para a simulação.

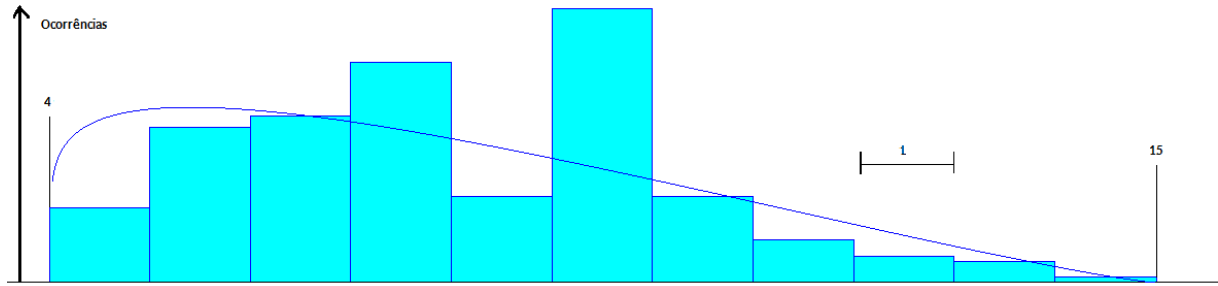


Figura 18: Adequação de distribuição ao histograma de 173, Rua 24 de Maio.

Para 173, Rua 24 de Maio (Figura 18), a distribuição com maior correspondência foi a Beta, com fórmula “ $3,5 + 12 * BETA(1,62;2,84)$ ”, com erro quadrático de 0,006713, e p-value 0,0855. A segunda distribuição que mais se aproximou foi a Weibull, com erro quadrático 0,007035 e p-value 0,0831. Este histograma foi gerado com base em 106 amostras.

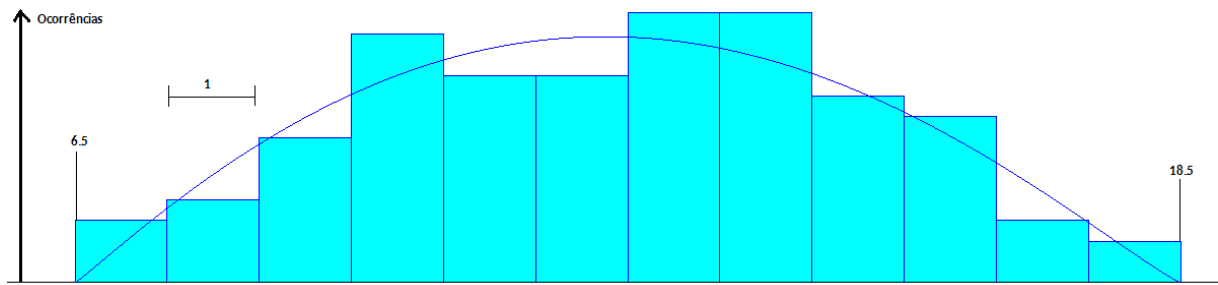


Figura 19: Adequação de distribuição ao histograma de 175, Rua Westphalen.

Para 175, Rua Westphalen (Figura 19), tem-se a distribuição Beta, de fórmula “ $6,5 + 12 * BETA(2,05;2,14)$ ”, com erro quadrático de 0,002586, e p-value $> 0,75$. A segunda distribuição que mais se adequou foi a Normal, com erro quadrático 0,004131 e p-value 0,19. Este histograma foi gerado com 94 amostras.

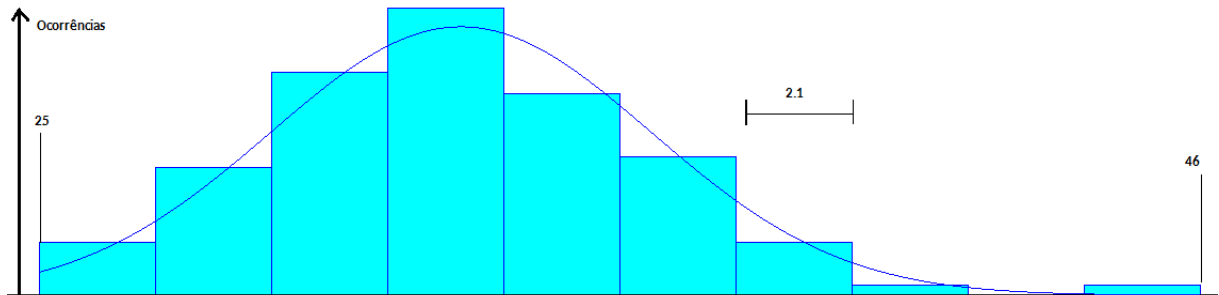


Figura 20: Adequação de distribuição ao histograma de 176, Rua Chile.

Para 176, Rua Chile (Figura 20), a distribuição encontrada foi a Normal, com fórmula “ $NORM(32,5;3,2)$ ”, com erro quadrático de 0,004324, e p-value 0,732. A segunda distribuição que mais se aproximou foi a Weibull, com erro quadrático 0,00501 e p-value 0,696. Este histograma foi gerado com 104 amostras.

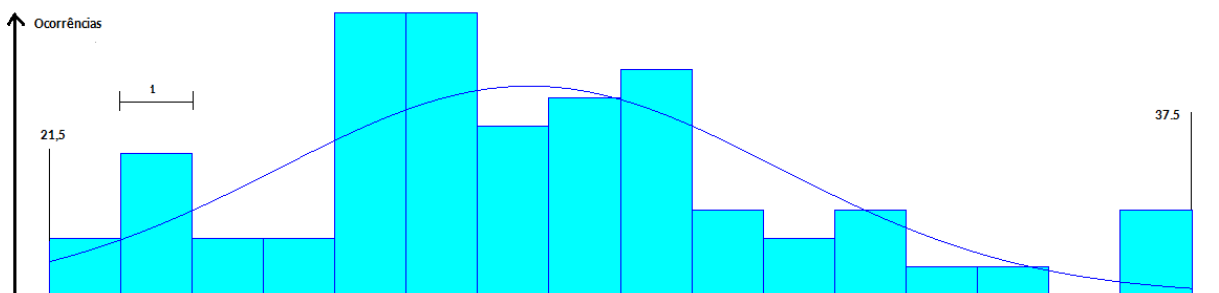


Figura 21: Adequação de distribuição ao histograma de 180, Rua Alferes Poli.

Em 180, Rua Alferes Poli (Figura 21), a distribuição Normal de fórmula “ $NORM(28,2;3,5)$ ” teve erro quadrático 0,01541 e p-value 0,163 sendo a mais adequada, e única dentro dos valores de p-value aceitos. Este histograma foi gerado com 65 amostras.

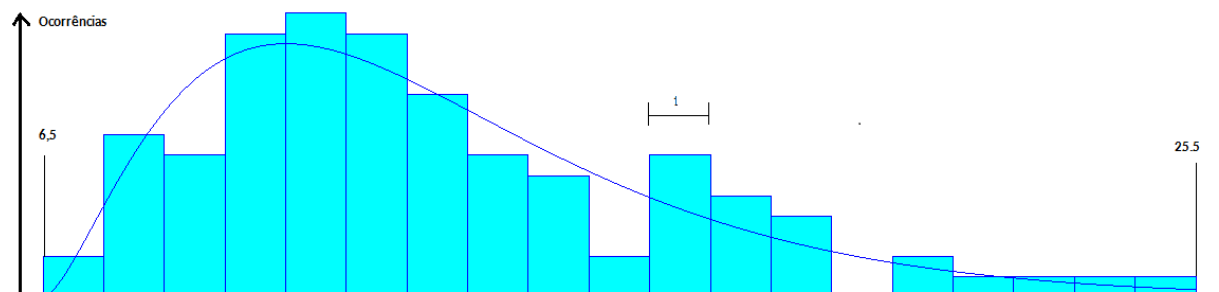


Figura 22: Adequação de distribuição ao histograma de 319, Av. Pres. Kennedy.

Em 319, Av. Pres. Kennedy (Figura 22), a distribuição mais adequada foi a

Gamma, de fórmula “ $6,5 + GAMM(2,5;2,6)$ ”, erro quadrático 0,004798 e p-value 0,0874. A segunda foi a Weibull, com erro quadrático 0,005677 e p-value 0,0746. Este histograma foi gerado com 104 amostras.

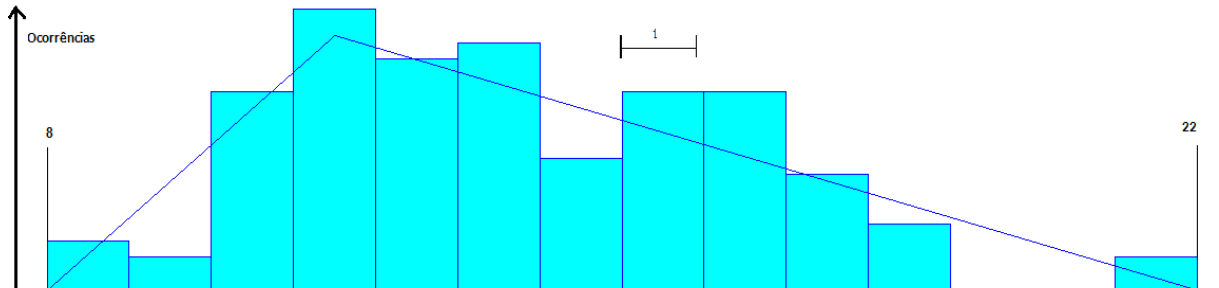


Figura 23: Adequação de distribuição ao histograma de 532, Rua Lamenha Lins.

Para 532, Rua Lamenha Lins (Figura 23), a distribuição encontrada foi a Triangular, com fórmula “ $TRIA(7,5;11;22,5)$ ”, com erro quadrático de 0,01022, e p-value 0,181. A segunda distribuição que mais se aproximou foi a Weibull, com erro quadrático 0,012315 e p-value 0,544. Esse histograma foi gerado com 108 amostras.

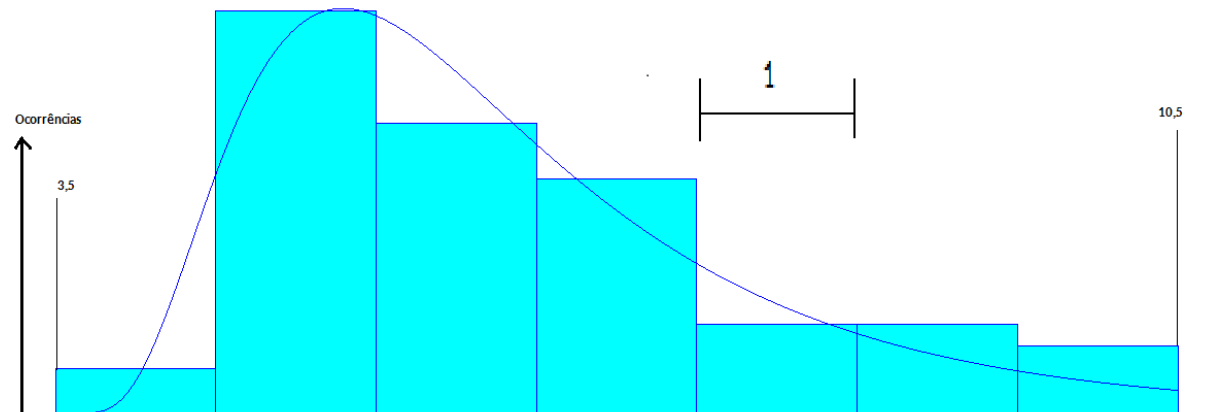


Figura 24: Adequação de distribuição ao histograma de 534, Rua Brigadeiro Franco.

Em 534, Rua Brigadeiro Franco (Figura 24), nenhuma distribuição teve p-value com valor de aceitação. Portanto, uma distribuição experimental para essa entrada será utilizada. Este histograma foi gerado com 106 amostras.

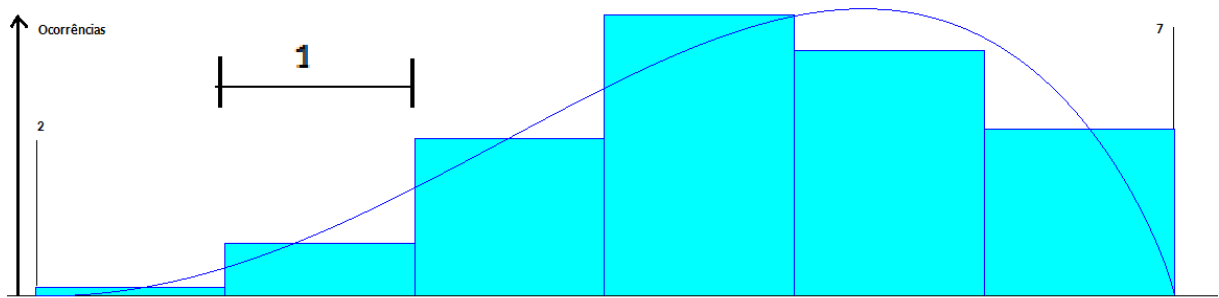


Figura 25: Adequação de distribuição ao histograma de 534, Rua Piauí.

Em 534, Rua Piauí (Figura 25), a distribuição encontrada foi a Beta, com fórmula “ $1,5 + 6 * BETA(3, 19; 1, 82)$ ”, com erro quadrático de 0,002869, e p-value 0,307. A segunda distribuição que mais se aproximou foi a Weibull, com erro quadrático 0,003275 e p-value 0,0862. Esse histograma foi gerado com 108 amostras.

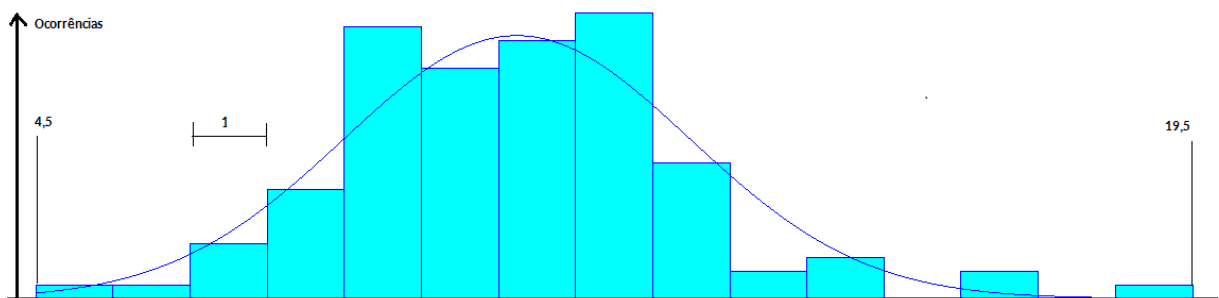


Figura 26: Adequação de distribuição ao histograma de 661, Rua Cons. Dantas.

Assim como no caso de 534, Rua Brigadeiro Franco, em 661 Rua Cons. Dantas (Figura 26) não houve distribuição em que o p-value tivesse o valor mínimo, sendo que a mais próxima disso foi uma distribuição Normal. Uma distribuição experimental para essa entrada também será utilizada. Este histograma foi gerado com 106 amostras.

As informações resumidas podem ser melhor visualizadas no Quadro 2. Com isso, ficam definidas as distribuições de entrada de veículos na região estudada, sendo que estas serão utilizadas na simulação.

	173	175	176	180	319	532	534 Brig.	534 Piauí	661
1° Dist.	3.5 + 12 * BETA(1.62, 2.84)	6.5 + 12 * BETA(2.05, 2.14)	NORM(32.5, 3.2)	NORM(28.2, 3.5)	6.5 + GAMM(2.5, 2.6)	TRIA(7.5, 11, 22.5)	3.5 + LOGN(2.91, 1.8)	1.5 + 6 * BETA(3.19, 1.82)	NORM(10.7, 2.24)
EQ	0.006713	0.002586	0.004324	0.01541	0.004798	0.01022	0.005337	0.002869	0.007506
p-value	0.0855	> 0.75	0.732	0.163	0.0874	0.181	< 0.005	0.307	0.0154
2° Dist.	3.5 + WEIB(4.85, 1.77)	TRIA(6.5, 13, 18.5)	24.5 + WEIB(8.95, 2.65)	TRIA(21.5, 26, 37.5)	6.5 + WEIB(7.31, 1.75)	7.5 + LOGN(6.23, 4.4)	3.5 + GAMM(0.82, 1, 3.5)	1.5 + WEIB(4.23, 3.71)	4.5 + 15 * BETA(4.32, 6)
EQ	0.007035	0.004083	0.00501	0.016258	0.005677	0.011845	0.010667	0.003275	0.008277
p-value	0.0831	0.375	0.696	0.0231	0.0746	0.354	< 0.005	0.0862	0.00559
3° Dist.	3.5 + GAMM(1.78, 2.43)	NORM(12.4, 2.66)	TRIA(24.5, 32, 41.5)	21.5 + WEIB(7.55, 1.97)	6.5 + 19 * BETA(1.58, 2.89)	7.5 + WEIB(6.76, 2.05)	TRIA(3.5, 5.13, 10.5)	NORM(5.32, 1.18)	4.5 + WEIB(6.96, 2.9)
EQ	0.008218	0.004131	0.005639	0.01626	0.008231	0.012315	0.013916	0.003571	0.009404
p-value	0.0175	0.19	0.609	0.015	0.00751	0.544	< 0.005	0.059	< 0.005
4° Dist.	3.5 + ERLA(2.16, 2)	6.5 + WEIB(6.65, 2.34)	24.5 + 17 * BETA(2.81, 3.16)	21.5 + GAMM(2.37, 2.84)	TRIA(6.5, 11, 25.5)	7.5 + GAMM(1.85, 3.23)	3.5 + WEIB(3.26, 1.99)	TRIA(1.5, 5, 7.5)	4.5 + GAMM(0.94, 3, 6.61)
EQ	0.008988	0.004891	0.005946	0.019884	0.010965	0.010632	0.018618	0.031188	0.010363
p-value	< 0.005	0.255	0.542	0.0163	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005
5° Dist.	3.5 + LOGN(4.57, 3.92)	6.5 + GAMM(1.71, 3.45)	24.5 + GAMM(1.82, 4.38)	21.5 + 16 * BETA(1.7, 2.36)	NORM(13, 3.89)	7.5 + ERLA(2, 3)	3.5 + 7 * BETA(1.64, 2.35)	1.5 + GAMM(0.46, 7, 8.18)	TRIA(4.5, 8.2, 19.5)
EQ	0.014153	0.00944	0.009166	0.019037	0.012345	0.010989	0.028947	0.010786	0.034489
p-value	< 0.005	< 0.005	0.247	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005

Quadro 2: Resumo das adequações das distribuições nos histogramas.

4.1.3 FLUXO DE VEÍCULOS DAS ROTAS

Esta seção apresenta as taxas de conversão, inferidas a partir do apresentado na seção 3.1.

Para que simFluxo tenha maior peso que simConversão, foi adotado α variante entre 900 e 1300, e um β fixo de 700, com o objetivo de priorizar as condições dos objetos de simFluxo.

Nas estimativas de taxa de conversão, levou-se em conta a capacidade de cada rua e as faixas de conversão existentes em cada uma.

Para casos em que havia uma conversão em uma aproximação, tendo em mente as regiões de interesse, foi utilizada a Equação (4.1), para estimar as taxas de conversão.

$$T_{xi} = \frac{3 + fatorRua(Conversao) - fatorRua(Inicial)}{20} \quad (4.1)$$

Enquanto que para o cálculo do α variável de cada objeto de simFluxo, a equação (4.2) foi utilizada. Devido ao fato dos fatores das ruas variarem entre 2 e 4 conforme Tabela 3, α assume os valores 900, 1100 e 1300. O objetivo dessa variação é fazer com que vias

mais importantes tenham maior peso no cálculo do fitness.

$$\alpha = 500 + 200 * fatorRua \quad (4.2)$$

Os fatores de cada rua estão enumerados na Tabela 3.

Tabela 3: Importância das ruas para cálculo das demandas em cada rota.

Rua	Importância	Valor (<i>fatorRua</i>)
Chile	Alto	4
Conselheiro Dantas	Médio	3
Kennedy Leste	Alto	4
Kennedy Oeste	Médio	3
Piauí	Médio	3
Brigadeiro Franco	Alto	4
Lamenha Lins	Alto	4
24 de Maio	Alto	4
Alferes Poli	Alto	4
Westphalen	Alto	4
Marechal Floriano Sul	Baixo	2
Marechal Floriano Norte	Baixo	2
João Zaniolo	Baixo	2

A partir destes fatores, e da aplicação da fórmula (4.1), obtiveram-se as inferências das taxas de conversão (Tabela 4).

Uma vez estando definidas as taxas de conversão, os fluxos de referência e o conjunto de rotas, é possível utilizar o algoritmo PSO para encontrar as quantidades de veículos por rota, de forma que a função de *fitness* indique qual o conjunto de valores mais adequado. Os parâmetros utilizados para o PSO foram ajustados por análise experimental, sendo os seguintes determinados como os de melhor desempenho para o problema:

- C1 (coeficiente social) = 0,6;
- C2 (coeficiente cognitivo) = 0,45;
- W (coeficiente inercial) inicial = 0,9;
- W (coeficiente inercial) final = 0,4;
- S (tamanho do enxame) = 80000;

Tabela 4: Taxa de conversões inferidas em cada cruzamento.

#	Rua	Cruzamento	Conversão para	Taxa inferida
0	24 de Maio	173	Chile	15%
1		663	Conselheiro Dantas	10%
2		179	Kennedy Leste, Kennedy Oeste	10%
3	Alferes Poli	180	Kennedy Leste, Kennedy Oeste	10%
4		664	Conselheiro Dantas	10%
5	Brigadeiro Franco	319	Kennedy Leste, Kennedy Oeste	10%
6	Chile	176	Mal Floriano Sul, Mal Floriano Norte	5%
7		174	Alferes Poli	15%
8	Conselheiro Dantas	664	Alferes Poli	20%
9		665	Westphalen	20%
10	Kennedy Leste	533	Kennedy Oeste, Lamenha Lins	15%
11		180	Kennedy Oeste, Alferes Poli	15%
12	Lamenha Lins	532	Chile	15%
13		662	Conselheiro Dantas	10%
14		533	Kennedy Leste, Kennedy Oeste	10%
15	Piauí	534	Brigadeiro Franco	20%
16	Westphalen	175	Chile	15%
17		665	Conselheiro Dantas	10%
18		178	Kennedy Leste, Kennedy Oeste	10%

- I (número de iterações) = 1300.

Através do uso destes parâmetros, foi possível obter adequação (*fitness*) de até 88,8%, ao mesmo tempo em que a adequação dos fluxos ficou equilibrada – ou seja, com poucas discrepâncias na adequação individual de um fluxo para outro. A melhor solução encontrada pelo PSO é utilizada para gerar um conjunto de 30 arquivos diferentes, que embora sejam todos baseados nessa mesma solução, possuem sementes diferentes nas distribuições de entrada. Portanto, cada arquivo terá comportamento diferenciado dentro da simulação, gerando uma diversidade que permite obter o intervalo de confiança das medidas de desempenho utilizadas para avaliação das programações semafóricas obtidas pela otimização. Assim como os dados originais identificavam quantos veículos passavam pelas aproximações de cruzamento a cada minuto, amostras das distribuições foram utilizadas para gerar variações nas quantidades de veículos por entrada a cada 300 segundos.

Os resultados detalhados de todas as 39 rotas inferidas (com origem na Tabela 1),

e os respectivos fluxos – gerados pela otimização com PSO – estão expostos na Tabela 5. A tabela mostra tanto o fluxo da rota principal quanto da rota de folga. Para informações sobre o que são as rotas de folga, vide final da seção 3.2.

Tabela 5: Rotas inferidas na análise exploratória, e os respectivos fluxos gerados por otimização.

#	Rua inicial	Cruzamento conversão	Rua final	Fluxo princ. (veh/h)	Fluxo folga (veh/h)
1	24 de Maio	-	24 de Maio	332	56
2		173	Chile	82	18
3		663	Cons. Dantas	48	2
4		179	Kennedy Leste	30	6
5		179	Kennedy Oeste	8	5
6	Alferes poli	-	Alferes poli	520	83
7		664	Cons. Dantas	271	23
8		180	Kennedy Leste	289	38
9		180	Kennedy Oeste	193	6
10	Brigadeiro franco	-	Brigadeiro franco	284	64
11		319	Kennedy Leste	35	2
12	Chile	-	Chile	696	346
13		174	Alferes poli	210	29
14		176	Mal. Floriano Norte	41	0
15		176	Mal. Floriano Sul	54	4
16		175/178	Kennedy Oeste (via Westphalen)	368	50
17	Cons. Dantas	-	Cons. Dantas	305	14
18		664	Alferes poli	130	23
19		665	Westphalen	135	41
20	Kennedy Leste	-	Kennedy Leste	418	35
21		180	Alferes poli	83	10
22		533	Lamenha Lins	83	18
23		319	Brig. Franco (via retorno)	129	17
24	Kennedy Oeste	-	Kennedy Oeste	133	16
25	Lamenha Lins	-	Lamenha Lins	521	66
26		532	Chile	99	9
27		662	Cons. Dantas	59	0
28		533	Kennedy Leste	38	0
29		533	Kennedy Oeste	13	0
30	Mal. Floriano Norte	-	Mal. Floriano Norte	215	24
31	Mal. Floriano Sul	-	Mal. Floriano Sul	54	4
32	P. Assunção Sul	-	P. Assunção Sul	50	7
33		280/278	Kennedy Oeste	64	9
34	Piauí	-	Piauí	229	26
35		534	Brigadeiro franco	61	8
36	Westphalen	-	Westphalen	555	0
37		275	Chile	104	8
38		665	Cons. Dantas	135	0
39		278	Kennedy Oeste	30	1

4.2 SIMULAÇÃO DA PROGRAMAÇÃO SEMAFÓRICA ATUAL COM ROTAS E INTENSIDADE DE TRÁFEGO IDENTIFICADOS

Testes foram realizados com o simulador SUMO, inserindo o conjunto de rotas da Tabela 5. Para este conjunto de rotas, 30 simulações de 1 hora foram executadas, e, a partir disso, média e intervalo de confiança de cada cruzamento (somente nas aproximações que possuem sensores instalados na prática³) foram calculados. A Tabela 6 mostra uma comparação – em termos de fluxo de veículos em cada aproximação de cruzamento – entre os resultados obtidos na simulação e os dados reais de tráfego. Na Tabela citada, “IC” é o intervalo de confiança, para um nível de 95% de confiança considerando 30 amostras.

No geral, somando-se todos os resultados da Tabela 6, a simulação teve erro de $-22,28\%$ no fluxo total em relação aos dados reais. Observando-se mais detalhadamente os dados, é possível notar que 21 dos 37 valores ficaram com erro (absoluto) menor ou igual a 25% em relação à realidade.

Várias aproximações foram feitas para a criação do modelo de simulação, por exemplo: inferência das rotas principais e dos fluxos destas rotas, e aproximação das distribuições teóricas de probabilidade. Além disso, houve alguns problemas de medidas em certos sensores em Novembro/2014, com dados não disponíveis ou com falhas – como foi o caso dos sensores 663 nas Ruas Cons. Dantas e 24 de Maio, e 179 na Rua 24 de Maio. Como já explicitado anteriormente (seção 4.1), para estes casos específicos, os valores de fluxo foram inferidos a partir dos dados de Julho/2014.

A diferença entre a simulação e a realidade pode ser explicada, dessa forma, por esses fatores. Também, outras características como paradas para embarque/desembarque, estacionamento, paradas de ônibus e faixas de pedestres não foram implementadas em sua totalidade. O perfil dos motoristas e dos veículos típicos que trafegam na região também não foram analisados – pois são fatores que ficam fora do escopo do projeto.

³As seguintes aproximações semaforizadas não possuem sensores: 176 Av. Mal. Floriano e 177 Av. Mal. Floriano.

Tabela 6: Comparação do fluxo de veículos em cada aproximação, entre a simulação (conjunto de rotas da Tabela 5) e os dados reais de tráfego.

Cruzamento	Rua	Simulado		Real	Erro
		Média (veh/h)	IC (\pm veh/h)	Média (veh/h)	
173	24 de Maio	576	19	720	-20,00%
	Chile	1168	23	1110	+5,23%
174	Alferes Poli	542	12	744	-27,15%
	Chile	1385	10	1614	-14,19%
175	Chile	1681	4	948	+77,32%
	Westphalen	822	9	768	+7,03%
176	Chile	1803	3	1980	-8,94%
177	Cons. Dantas	606	1	822	-26,28%
	Kennedy Leste	685	1	1794	-61,82%
178	Kennedy Leste	686	3	888	-22,75%
	Westphalen	1170	23	1140	+2,63%
179	Kennedy Leste	424	0	630	-32,70%
	Kennedy Oeste	600	1	726	-17,36%
	24 de Maio	716	2	478	+49,79%
180	Alferes Poli	794	9	1392	-42,96%
	Kennedy Leste	639	6	912	-29,93%
	Kennedy Oeste	604	1	624	-3,21%
319	Kennedy Leste	774	1	780	-0,77%
	Kennedy Oeste	741	2	930	-20,32%
	Brig. Franco	430	4	2361	-81,79%
325	Brig. Franco	569	22	750	-24,13%
	Chile	1020	24	1230	-17,07%
532	Chile	1240	24	1434	-13,53%
	Lamenha Lins	760	0	762	-0,26%
533	Kennedy Leste	662	3	1422	-53,45%
	Kennedy Oeste	739	8	918	-19,50%
	Lamenha Lins	574	3	1033	-44,43%
661	Brig. Franco	522	1	840	-37,86%
	Cons. Dantas	630	3	642	-1,87%
662	Cons. Dantas	621	0	1314	-52,74%
	Lamenha Lins	650	0	762	-14,70%
663	24 de Maio	485	7	480	+1,04%
	Cons. Dantas	665	0	1002	-33,63%
664	Alferes Poli	616	11	1170	-47,35%
	Cons. Dantas	709	2	810	-12,47%
665	Cons. Dantas	715	1	894	-20,02%
	Westphalen	1201	33	780	+53,97%

4.3 OTIMIZAÇÃO SEMAFÓRICA

Esta seção traz os resultados da segunda parte do trabalho: a otimização dos planos semafóricos. Vídeos dos resultados desta parte estão disponíveis em (URGAL; FUCHS, 2015).

4.3.1 SIMULAÇÃO COM ROTAS E INTENSIDADE DE TRÁFEGO IDENTIFICADOS

Um conjunto de testes foi feito com o PSO para otimização semafórica, tendo como objetivo verificar se o algoritmo tem a capacidade de efetuar melhorias no plano de temporização previamente estabelecido da SETRAN para o horário das 7h às 9h, de segunda a sexta. Este plano possui tempo de ciclo de 90 segundos. Segundo a metodologia explicitada na seção 3.3.2, uma parte das partículas do enxame é inicializada com este plano semafórico e outra parte de forma aleatória.

O conjunto de rotas e demandas utilizado para testes é adaptado à realidade da região semafórica SA-14 (a análise das rotas e demandas é feita na seção 4.1, e a Tabela 6 apresenta o conjunto final de rotas). As Figuras 27 e 28 mostram visões gerais da simulação após 1 hora de execução, considerando o plano semafórico da SETRAN. Em geral, o caso mais complicado de congestionamento na simulação se fez presente na Rua Alferes Poli. Neste cruzamento em específico, existe uma fase de conversão à esquerda na Av. Pres. Kennedy, o que diminui tempo de verde das outras aproximações (incluindo da Rua Alferes Poli). O tempo de verde nesta aproximação é de 20s na programação da SETRAN.

Para este caso (programação da SETRAN), as seguintes medidas de desempenho foram obtidas, considerando um intervalo de confiança de 95% obtido com 30 replicações da simulação (de uma hora).

- Atraso médio: $113,23 \pm 0,30$ s
- Tempo médio de viagem: $172,99 \pm 0,49$ s
- *Throughput* médio: $7564,76 \pm 1,62$ veh/h

Os testes do algoritmo de otimização foram realizados utilizando vários conjuntos de parâmetros, como apresentado na Tabela 7. Todas as combinações possíveis de parâmetros (dos valores da tabela citada) foram testadas, gerando um total de 48 testes.

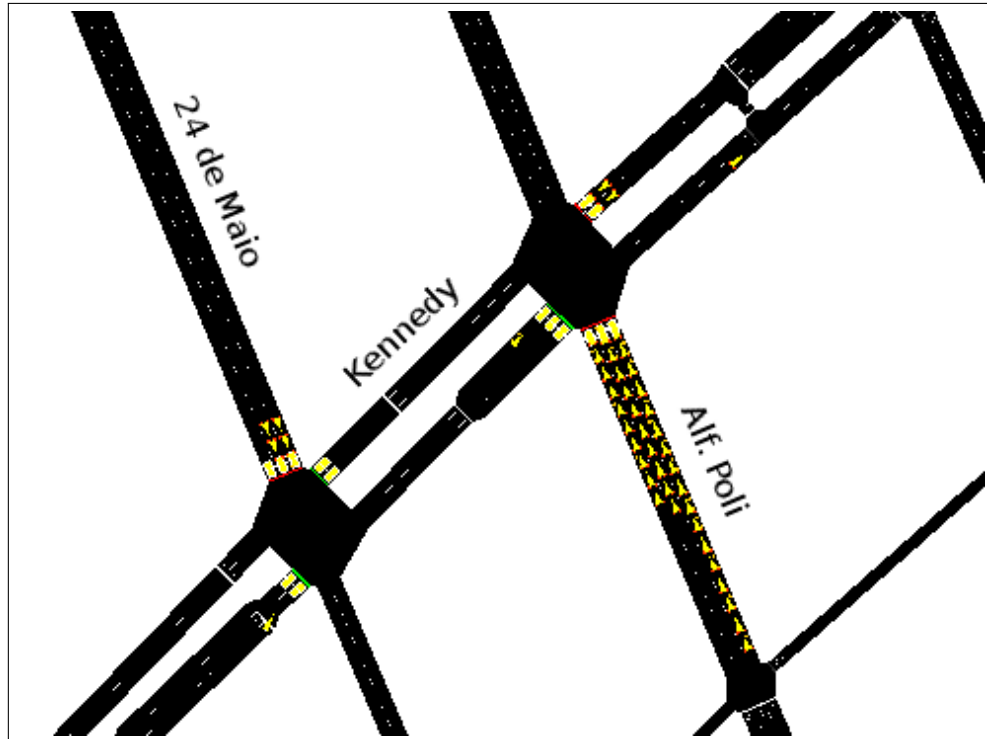


Figura 27: Visão da simulação (com conjunto de rotas da Tabela 6) na Rua Alferes Poli e Av. Pres. Kennedy para temporização da SETRAN.

O objetivo de variar os parâmetros foi tentar extrair o melhor resultado do algoritmo para o problema específico tratado. Apenas uma rodada foi executada com cada combinação de parâmetros. Para que uma análise paramétrica mais robusta seja feita (por exemplo, para ajustar o algoritmo para casos mais genéricos), mais rodadas – em torno de 30 ou mais – idealmente devem ser executadas para ter-se relevância estatística. Isso não foi realizado, porém, por limitações de tempo.



Figura 28: Visão da simulação (com conjunto de rotas da Tabela 6) na região da Rua Chile com a Rua Des. Westphalen para temporização da SETRAN.

Tabela 7: Parâmetros utilizados nos testes de otimização com conjunto de rotas e intensidade de tráfego identificados.

Parâmetro	Valor
Número de partículas (S)	100
Proporção de partículas geradas aleatoriamente (<i>percentToRandomize</i>)	0,95
Número de iterações (T)	20
Coefficiente inercial inicial (ω_i)	{0,4; 0,6; 0,8}
Coefficiente inercial final (ω_f)	0
Coefficiente cognitivo (c_1)	{0,7; 0,75; 0,8 0,85}
Coefficiente social (c_2)	{0,4; 0,6; 0,7; 0,8}
Probabilidade de mutação de partículas (p_{m1})	0,1
Probabilidade de mutação de parâmetros (p_{m2})	0,05
Tempo de preparação (<i>warmup</i>) da simulação	300 s
Número de simulações para avaliação de fitness (N_s)	3
Tempo de ciclo mínimo (<i>tempoCicloMin</i>)	30 s
Tempo de ciclo máximo (<i>tempoCicloMax</i>)	200 s
Tempo de fase mínimo (<i>tempoFaseMin</i>)	5 s
Tempo de fase máximo (<i>tempoFaseMax</i>)	190 s

A Tabela 8 apresenta os dez melhores resultados dos testes. Somente os parâmetros que variaram foram colocados na tabela. Para cada combinação de parâmetros, executou-se 1 rodada do PSO, e para avaliar cada solução final (**best_(global)**), foram realizadas 30 replicações de simulação.

Em termos de porcentagem, as rodadas de otimização conseguiram obter melhorias consideráveis em relação à situação de tráfego inicial. Foi possível obter, no primeiro melhor teste, até 52,38% de melhoria em relação ao atraso médio, 33,69% no tempo de viagem e 9,18% no *throughput*.

O plano original da SETRAN utilizado está exposto na Tabela 9. Já o melhor plano semafórico encontrado pelo PSO (primeiro resultado da Tabela 8) está exposto em detalhes na Tabela 10. Este plano possui tempo de ciclo de 72,70 s. Os tempos de ciclo de todos os outros resultados variaram de 72 a 107s em média.

As Tabelas 9 e 8 indicam apenas o tempo de verde⁴ de cada aproximação, sem considerar os tempos de transição entre cada fase – amarelo (4 segundos) e bloqueio ou *all-red*⁵. Os tempos de transição foram explicados na seção 2.1.

Um aspecto importante a ressaltar é que em certos casos específicos da Tabela 10 – 176 Mal. Floriano, 177 Mal. Floriano e 180 Kennedy Leste – os tempos de verde ficaram pequenos em proporção com os demais. Isto foi verificado na simulação como o melhor a ser feito para otimizar o trânsito como um todo. Porém, na prática podem haver situações em que os tempos não sejam suficientes para acomodar todos os veículos. Por exemplo, na Av. Marechal Floriano, existem os biarticulados – que não foram modelados na simulação – que necessitam de tempo de verde maior⁶ do que o exposto na Tabela 10. Uma solução para isto é mudar o parâmetro *tempoFaseMin* na entrada do algoritmo de otimização de planos semafóricos. O tempo de verde mínimo pode ser aumentado, de forma que o algoritmo gere valores com menos discrepâncias.

⁴Para que os planos semafóricos sejam utilizados na prática, é necessário arredondá-los, como é explicado na seção 4.3.4.

⁵O tempo de bloqueio é de 1 segundo para a todas as aproximações, menos para as aproximações da Rua Cons. Dantas e Av. Kennedy no cruzamento 177 (com a Av. Marechal Floriano); nestes dois casos específicos o tempo de bloqueio é de 3 segundos.

⁶Este fato foi verificado junto à SETRAN, depois de o resultado ter sido obtido.

Tabela 8: Dez melhores resultados dos testes de otimização, para conjunto de rotas da Tabela 5.

Atraso			Tempo de viagem			Throughput			Parâmetros		
Média (s)	IC ⁷ (±s)	Melhoria	Média (s)	IC (±s)	Melhoria	Média (veh/h)	IC (±veh/h)	Melhoria	C ₁	C ₂	ω _i
53,92	0,06	52,38%	114,71	0,06	33,69%	8259,48	2,34	9,18%	0,85	0,4	0,5
57,79	0,01	48,96%	118,62	0,01	31,43%	8259,42	1,46	9,18%	0,75	0,7	0,5
58,37	0,09	48,45%	119,18	0,08	31,10%	8266,54	1,26	9,28%	0,75	0,8	0,4
58,70	0,06	48,16%	119,56	0,06	30,89%	8284,33	2,20	9,51%	0,8	0,4	0,4
60,87	0,14	46,24%	121,71	0,14	29,65%	8275,88	0,90	9,40%	0,7	0,8	0,5
61,14	0,07	46,01%	122,01	0,06	29,47%	8272,02	1,67	9,35%	0,85	0,6	0,5
62,07	0,20	45,18%	122,91	0,21	28,95%	8235,59	3,18	8,87%	0,85	0,4	0,6
62,02	0,08	45,23%	122,84	0,08	28,99%	8264,56	0,22	9,25%	0,8	0,8	0,5
62,07	0,06	45,18%	122,93	0,07	28,94%	8264,79	0,17	9,25%	0,8	0,8	0,4
62,61	0,03	44,71%	123,43	0,03	28,65%	8259,39	0,47	9,18%	0,75	0,6	0,5

⁷“IC” é o intervalo de confiança, para um nível de 95% de confiança considerando 30 amostras.

Tabela 9: Plano semafórico da SETRAN de 7h a 9h, segunda a sexta.
(*tempoCiclo* = 90 s).

Cruzamento	Offset (s)	Rua	Tempo verde (s)
325	62	Chile	46
		Brig. Franco	34
532	46	Chile	52
		Lamenha Lins	28
173	10	Chile	55
		24 de Maio	25
174	26	Chile	55
		Alf. Poli	25
175	3	Chile	43
		Westphalen	37
176	71	Chile	40
		Mal. Floriano	38
661	66	Cons. Dantas	42
		Brig. Franco	38
662	70	Cons. Dantas	44
		Lamenha Lins	36
663	17	Cons. Dantas	38
		24 de Maio	42
664	30	Alf. Poli	33
		Cons. Dantas	47
665	32	Westphalen	25
		Cons. Dantas	55
319	82	Kennedy	56
		Brig. Franco	24
533	7	Kennedy Leste/Oeste	48
		Kennedy Oeste (conv. esquerda)	8
		Lamenha Lins	19
179	17	Kennedy	53
		24 de Maio	27
180	12	Kennedy Leste/Oeste	25
		Kennedy Leste (conv. esquerda)	30
		Alf. Poli	20
178	26	Kennedy	39
		Westphalen	41
177	49	Kennedy	29
		Cons. Dantas	19
		Mal. Floriano	23
534	85	Piauí	40
		Brig. Franco	40

Tabela 10: Plano semaforico da melhor solucao encontrada ($tempoCiclo = 72,70$ s).

Cruzamento	Offset (s)	Rua	Tempo verde (s)
325	19	Chile	27,60
		Brig. Franco	35,10
532	1	Chile	22,37
		Lamenha Lins	40,33
173	62	Chile	22,97
		24 de Maio	39,73
174	55	Chile	34,46
		Alf. Poli	28,24
175	39	Chile	42,40
		Westphalen	20,30
176	25	Chile	51,52
		Mal. Floriano	9,18
661	0	Cons. Dantas	18,18
		Brig. Franco	44,52
662	4	Cons. Dantas	36,70
		Lamenha Lins	26,00
663	21	Cons. Dantas	22,98
		24 de Maio	39,72
664	35	Alf. Poli	38,71
		Cons. Dantas	23,99
665	0	Westphalen	23,36
		Cons. Dantas	39,34
319	11	Kennedy	42,24
		Brig. Franco	20,46
533	16	Kennedy	22,19
		Kennedy Oeste (conv. esquerda)	15,41
		Lamenha Lins	20,09
179	27	Kennedy	25,87
		24 de Maio	36,82
180	28	Kennedy	18,71
		Kennedy Leste (conv. esquerda)	7,25
		Alf. Poli	31,74
178	50	Kennedy	34,75
		Westphalen	27,95
177	1	Kennedy	22,80
		Cons. Dantas	21,52
		Mal. Floriano	9,38
534	36	Piauí	30,92
		Brig. Franco	31,78

As Figuras 29 e 30 correspondem ao primeiro melhor teste. Pode-se notar que, em comparação com a simulação original (Figuras 27 e 28), não há filas tão longas formadas, e o tráfego flui melhor. Foi possível verificar que o algoritmo possui um bom potencial, portanto, para otimizar planos semafóricos nesta condição de tráfego.

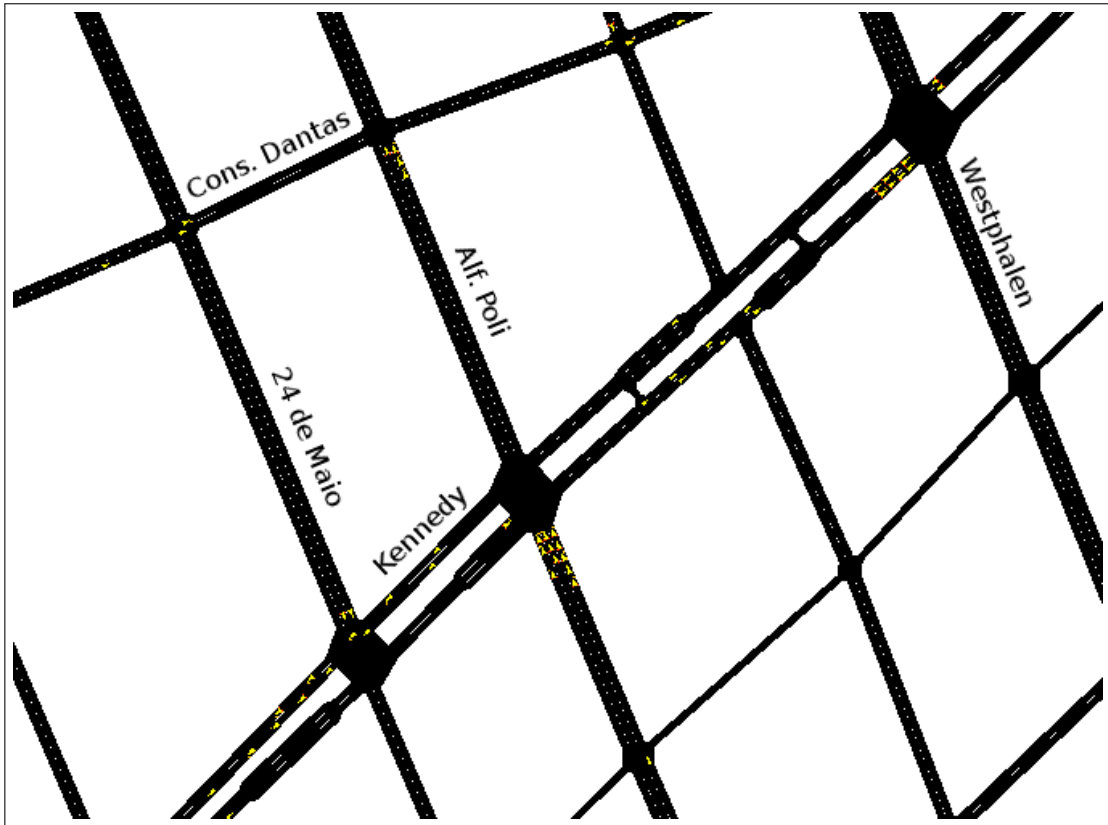


Figura 29: Visão da simulação (com conjunto de rotas da Tabela 6) na Rua Alferes Poli e Av. Pres. Kennedy para o melhor resultado da Tabela 8.

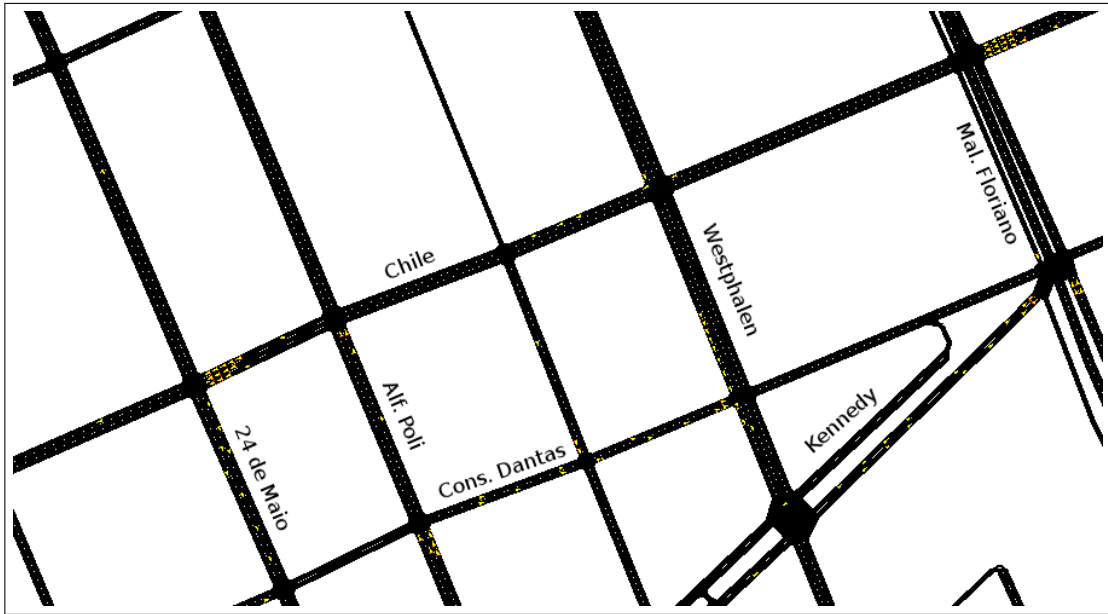


Figura 30: Visão da simulação (com conjunto de rotas da Tabela 6) na região da Rua Chile com a Rua Des. Westphalen para o melhor resultado da Tabela 8.

4.3.2 SIMULAÇÃO COM OUTRAS ROTAS E INTENSIDADE DE TRÁFEGO

Uma rodada de testes foi feita com o PSO para otimização semafórica, tendo como objetivo verificar se o algoritmo tem a capacidade de efetuar melhorias em outras situações de tráfego. Partiu-se, de maneira similar ao teste da seção 4.3.1, do plano da SETRAN para o horário das 7h às 9h, de segunda a sexta. Este plano possui tempo de ciclo de 90 segundos. Segundo a metodologia explicitada na seção 3.3.2, uma parte das partículas do enxame é inicializada com este plano semafórico e outra parte de forma aleatória.

O conjunto de rotas e demandas estabelecido para testes foi concebido manualmente, tendo o propósito de saturar a rede de tráfego nesta programação semafórica específica, gerando com isso desafios maiores para o algoritmo de otimização. As Figuras 31 e 32 mostram visões gerais da simulação após 1 hora de execução, considerando o plano semafórico da SETRAN. Pode-se notar que há diversas situações de congestionamento, com várias filas longas sendo formadas. Para este caso (programação da SETRAN), as seguintes medidas de desempenho foram obtidas, considerando um intervalo de confiança de 95% obtido com 30 replicações da simulação (de uma hora).

- Atraso médio: $162,31 \pm 0,48$ s
- Tempo médio de viagem: $220,10 \pm 0,40$ s
- *Throughput* médio: $10727,83 \pm 2,98$ veh/h

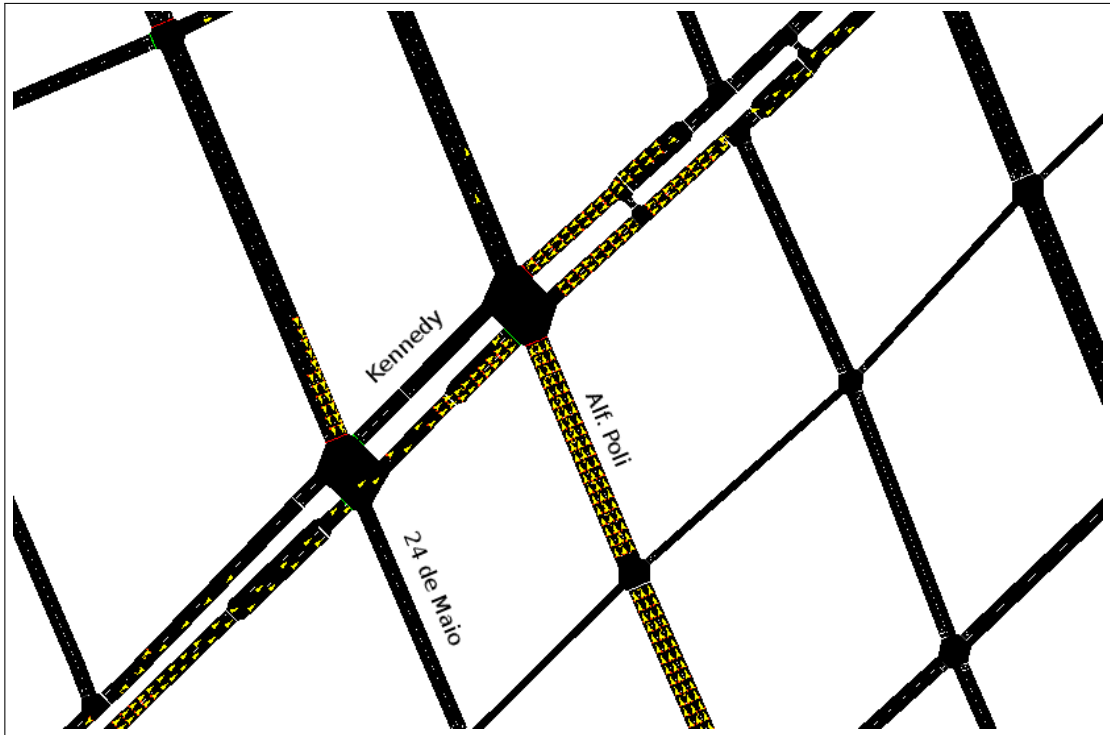


Figura 31: Estado final das filas (com rotas arbitrárias) na Rua Alferes Poli e Av. Pres. Kennedy mantendo inalterada a temporização da SETRAN.

Os testes do algoritmo de otimização foram realizados utilizando vários conjuntos de parâmetros, como apresentado na Tabela 11. Todas as combinações possíveis de parâmetros (dos valores da tabela citada) foram testadas, gerando um total de 81 testes.

Similarmente ao teste da seção 4.3.1, O objetivo de variar os parâmetros foi tentar extrair o melhor resultado do algoritmo para o problema específico tratado. Apenas uma rodada foi executada com cada combinação de parâmetros.

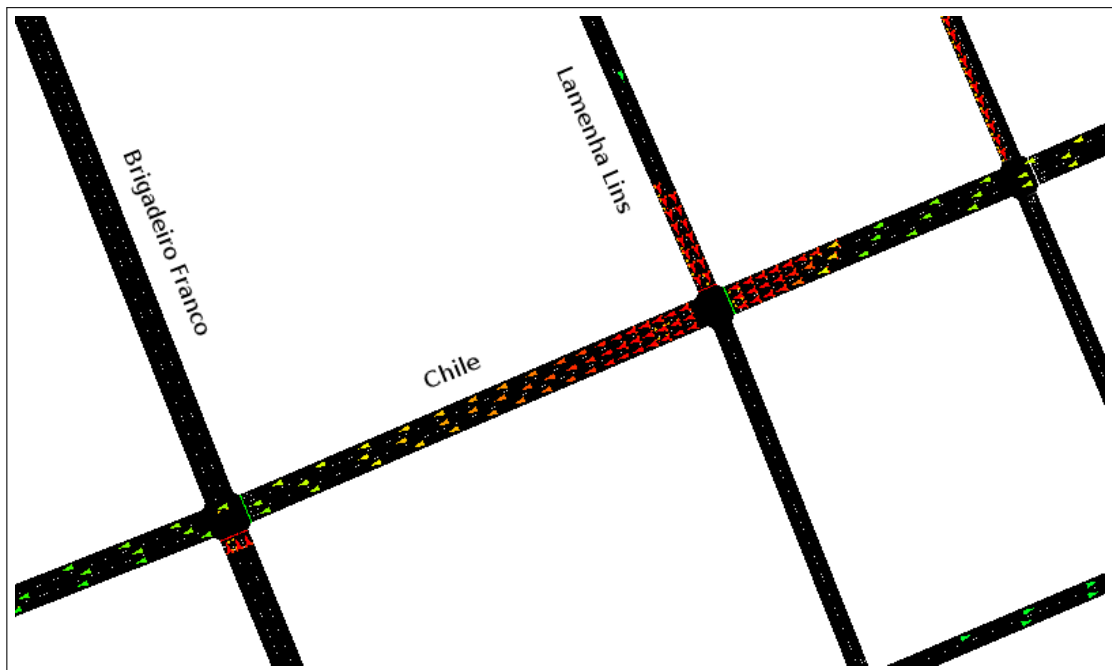


Figura 32: Estado final das filas (com rotas arbitrárias) na Rua Chile mantendo inalterada a temporização da SETRAN.

Tabela 11: Parâmetros utilizados nos testes de otimização com rotas arbitrárias.

Parâmetro	Valor
Número de partículas (S)	100
Proporção de partículas geradas aleatoriamente (<i>percentToRandomize</i>)	0,95
Número de iterações (T)	15
Coefficiente inercial inicial (ω_i)	{0,4; 0,6; 0,8}
Coefficiente inercial final (ω_f)	0
Coefficiente cognitivo (c_1)	{0,4; 0,6; 0,8}
Coefficiente social (c_2)	{0,4; 0,6; 0,8}
Probabilidade de mutação de partículas (p_{m1})	{0,0; 0,05; 0,10}
Probabilidade de mutação de parâmetros (p_{m2})	0,05
Tempo de preparação (<i>warmup</i>) da simulação	300 s
Número de simulações para avaliação de fitness (N_s)	3
Tempo de ciclo mínimo (<i>tempoCicloMin</i>)	30 s
Tempo de ciclo máximo (<i>tempoCicloMax</i>)	200 s
Tempo de fase mínimo (<i>tempoFaseMin</i>)	5 s
Tempo de fase máximo (<i>tempoFaseMax</i>)	190 s

A Tabela 12 apresenta os dez melhores resultados dos testes. Para cada combinação de parâmetros, executou-se 1 rodada do PSO, e para avaliar cada solução final ($\mathbf{best}_{(\text{global})}$), utilizou-se 30 simulações. Somente os parâmetros que variaram foram colocados na tabela.

Em termos de porcentagem, as rodadas de otimização conseguiram obter melhorias consideráveis em relação à situação de tráfego inicial. Foi possível obter, no primeiro melhor teste, até 52,59% de melhoria em relação ao atraso médio, 38,00% no tempo de viagem e 12,47% no *throughput*.

O tempo de ciclo do plano semaforico para o melhor teste foi de 106,98 s. Já o tempo de o ciclo para o pior dos 81 testes foi de 80,2 segundos. De forma geral, percebeu-se que tempos de ciclo maiores geraram melhores resultados. Uma hipótese para isso ter ocorrido é que o volume de tráfego para esse conjunto de testes foi maior, e em geral, quanto maior o volume de tráfego, maior o tempo de ciclo necessário (FHWA, 2008).

Tabela 12: Dez melhores resultados nos testes de otimização com rotas arbitrárias.

Atraso			Tempo de viagem			Throughput			Parâmetros			
Média (s)	IC ⁸ (\pm s)	Melhoria	Média (s)	IC (\pm s)	Melhoria	Média (veh/h)	IC (\pm veh/h)	Melhoria	C_1	C_2	ω_i	p_{m1}
76,95	0,18	52,59%	136,47	0,19	38,00%	12066,10	6,04	12,47%	0,8	0,6	0,6	0,10
77,98	0,12	51,95%	137,53	0,14	37,52%	12092,90	21,50	12,72%	0,8	0,4	0,6	0,10
81,64	0,08	49,70%	140,80	0,09	36,03%	10749,80	0,82	0,20%	0,8	0,4	0,6	0,05
83,64	0,20	48,47%	143,10	0,21	34,99%	12061,40	13,02	12,43%	0,8	0,4	0,4	0,05
84,86	0,16	47,72%	143,91	0,15	34,62%	11144,20	5,39	3,88%	0,6	0,8	0,4	0,00
85,42	0,80	47,37%	144,55	0,81	34,32%	10956,70	10,10	2,13%	0,8	0,8	0,6	0,05
98,41	0,70	39,37%	157,89	0,70	28,26%	11589,60	4,84	8,03%	0,8	0,8	0,4	0,05
99,83	0,07	38,50%	159,38	0,07	27,59%	11752,10	3,59	9,55%	0,8	0,8	0,4	0,10
99,12	0,39	38,93%	158,67	0,39	27,91%	11610,60	15,75	8,23%	0,8	0,4	0,8	0,05
101,60	0,68	37,40%	161,05	0,66	26,83%	11407,20	5,53	6,33%	0,4	0,4	0,8	0,10

⁸“IC” é o intervalo de confiança, para um nível de 95% de confiança considerando 30 amostras.

As Figuras 33 e 34 correspondem ao primeiro melhor teste. Pode-se notar que, em comparação com a simulação original (Figuras 31 e 32), não há filas tão longas formadas e o tráfego flui melhor. Foi possível verificar que o algoritmo possui um bom potencial, portanto, para otimizar planos semafóricos em outras condições de tráfego.

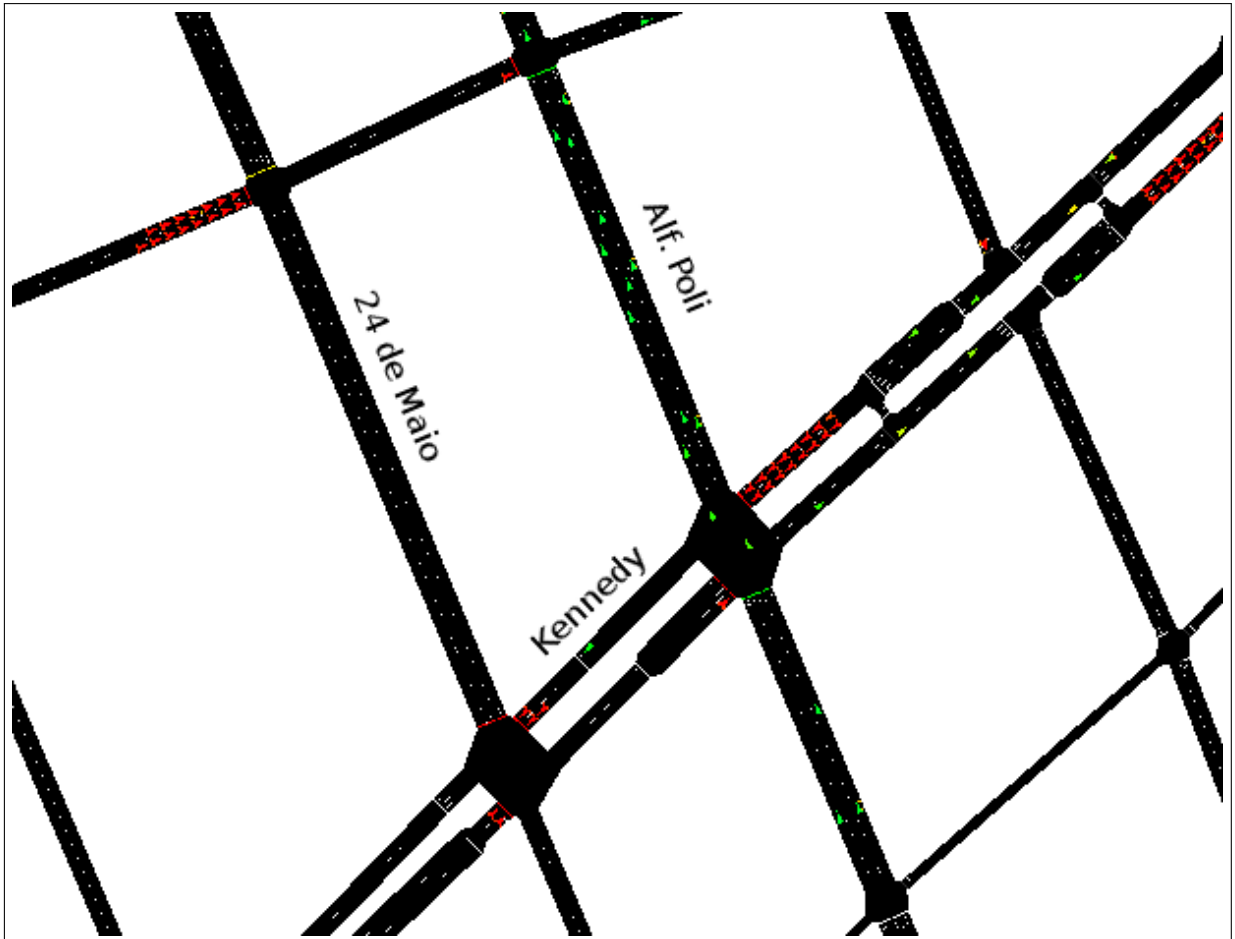


Figura 33: Estado final das filas (com rotas arbitrárias) na Rua Alferes Poli e Av. Pres. Kennedy para o melhor resultado da Tabela 12.

4.3.3 TEMPO DE PROCESSAMENTO

Nos testes, o tempo de processamento médio gasto para cada rodada do PSO (com 100 partículas, 20 iterações e 3 simulações por avaliação de fitness) foi de 9 horas e 13 minutos aproximadamente. A configuração das máquinas utilizada nos testes possuem as seguintes configurações:

- Máquina 1:
 - CPU: Intel Core i5-4440 @ 3.10 GHZ;
 - RAM: 4GB DDR3 1600 MHz.

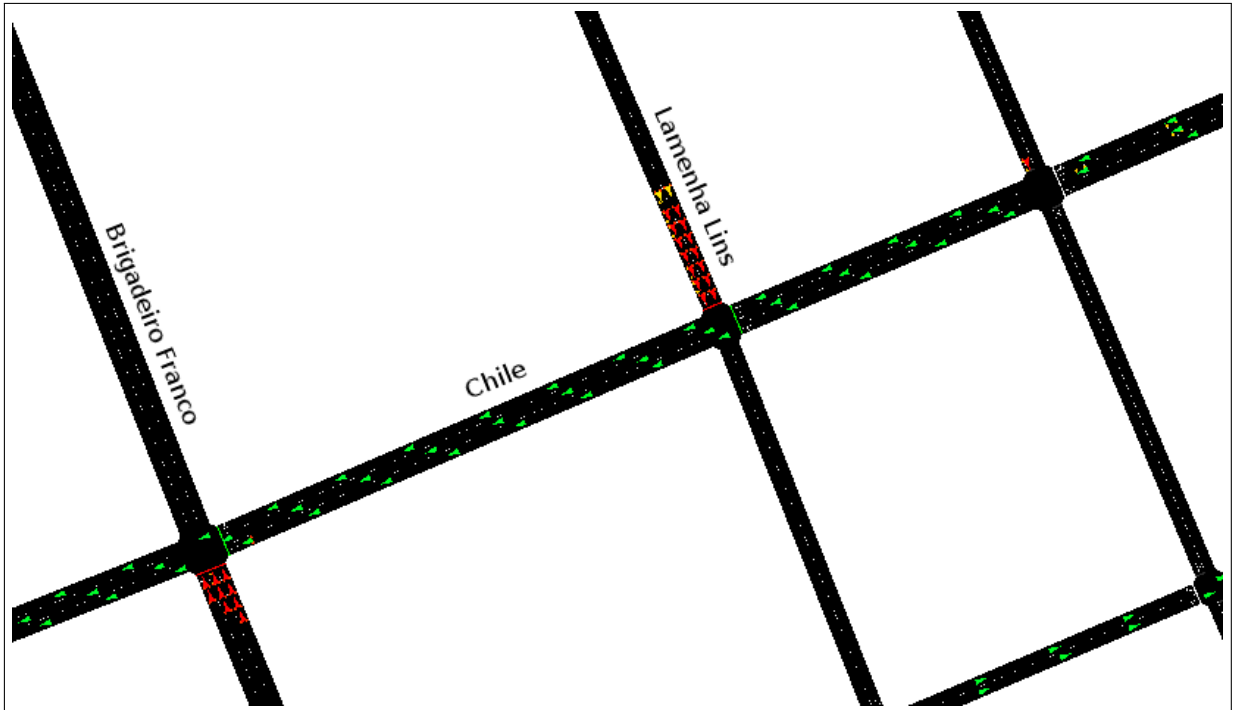


Figura 34: Estado final das filas (com rotas arbitrárias) na Rua Chile para o melhor resultado da Tabela 12.

- Máquinas 2 e 3:
 - CPU: Intel Core i7-5930K @ 3.5 GHz;
 - RAM: 32 GB DDR4 @ 2133 MHz.

Ambas as máquinas resultaram em tempos de execução parecidos. As máquinas com processador i7-5930K, porém, possuem a vantagem de ter 6 núcleos (contra 4 do i5-4440), o que estende as possibilidades para execução em paralelo. Cada instância do PSO é executada sequencialmente – tendo em vista que uma versão paralela não foi implementada, e o simulador SUMO é *single-threaded* – mas várias instâncias do PSO podem ser executadas ao mesmo tempo, com parâmetros de entrada diferentes, para aproveitar ao máximo todos os núcleos disponíveis.

Em termos de proporção de tempo, as simulações com o SUMO (para avaliações de *fitness*) foi responsável por em média 99,83% do tempo de execução total do PSO. No total, gastou-se aproximadamente 9 horas e 12 minutos só com simulações. Cada simulação de uma hora de trânsito gasta em média 5,52 segundos de execução nessas máquinas ($5,52 \text{ s} * 100 \text{ partículas} * 20 \text{ iterações} * 3 \text{ simulações por avaliação} = 9 \text{ horas e } 12 \text{ minutos}$).

4.3.4 IMPLEMENTAÇÃO DAS SOLUÇÕES NOS CONTROLADORES

Os controladores utilizados atualmente pela SETRAN possuem restrições quanto à programação temporal dos controladores semaforicos. Neste aspecto, é relevante notar que somente valores inteiros de tempo são permitidos. O algoritmo de otimização desenvolvido neste projeto utiliza valores reais (tendo em vista que o PSO contínuo é utilizado). Para uso na prática, portanto, os valores gerados pelo otimizador devem ser arredondados para números inteiros (observando-se sempre as restrições da subseção 3.3.1).

4.4 CONCLUSÃO SOBRE O CAPÍTULO

Este capítulo apresentou os resultados da análise exploratória dos dados reais de tráfego, a criação do modelo de rotas para a simulação e os resultados da aplicação do sistema de otimização semaforica nela – tudo segundo a metodologia do capítulo 3.

Gráficos de média móvel e histogramas foram gerados para cada cruzamento de entrada na região, e posteriormente as melhores distribuições de probabilidade de fluxo de veículos foram determinadas. O conjunto de demandas (veículos por unidade de tempo) para as rotas mais importantes da região semaforica foram determinadas pela aplicação do algoritmo PSO. Uma comparação foi feita posteriormente entre a simulação e a realidade, em termos do fluxo médio de veículos em cada aproximação de cruzamento. Na média, a simulação adequou-se com erro de $-17,51\%$ em relação à realidade.

Depois, apresentou-se os resultados da aplicação do sistema de otimização semaforica (também baseado no PSO) no modelo de simulação gerado. O sistema foi capaz de otimizar todos os quesitos de desempenho⁹ – atraso médio em $52,38\%$, tempo de viagem em $33,69\%$ e *throughput* em $9,18\%$. Posteriormente, testes com rotas arbitrárias foram realizados para atestar a eficácia do algoritmo em situações de maior demanda de tráfego. Neste quesito, o sistema também mostrou-se bem-sucedido, tendo melhorias¹⁰ em $52,59\%$, $38,00\%$ e $12,47\%$ nas mesmas métricas.

⁹Dados da Tabela 8

¹⁰Dados da Tabela 12.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho de conclusão de curso propôs, implementou e analisou uma estratégia para otimização da programação semaforica de uma região de Curitiba. Para atingir os objetivos, um modelo de simulação no *software* SUMO foi criado, utilizando-se dados reais de tráfego cedidos pela SETRAN. Estes dados passaram primeiramente por um pré-processamento para obter os conjuntos de dados de interesse. Depois, distribuições teóricas de probabilidade para o fluxo de veículos (por unidade de tempo) foram determinadas para cada cruzamento de entrada na região – primeiramente criando histogramas do fluxo de veículos, e posteriormente utilizando a ferramenta de análise de entrada do *software* Arena para identificar a melhor distribuição para cada caso.

Um modelo de rotas foi criado a partir de ferramentas e conhecimentos heurísticos, tendo em vista que dados reais de taxas conversão de veículos não estavam disponíveis – uma vez que os sensores (*Citylogs*) atualmente instalados na região semaforica apenas medem o fluxo de veículos em cada aproximação. Uma estratégia de inferência a partir de regiões de interesse foi utilizada para determinar as rotas mais importantes a serem consideradas na região. Além disso, conhecimentos a respeito do porte das ruas e das faixas de conversão foram utilizados para inferir as taxas de conversão em cada cruzamento semaforizado.

Tendo-se definido o conjunto de rotas e as taxas de conversão, bons valores de fluxo de veículos para cada rota foram determinados utilizando o algoritmo do PSO. O algoritmo implementado usou como medida de desempenho das soluções a adequação dos fluxos (em comparação com os dados reais) e das taxas de conversão (em comparação com os dados inferidos) em cada aproximação.

A partir do modelo de simulação, uma estratégia de otimização de planos semaforicos foi criada, também utilizando o algoritmo do PSO. Para isso, uma abordagem de otimização com simulação foi utilizada, estratégia na qual simulações são efetuadas para atestar o nível numérico de qualidade de cada solução. Conhecimentos heurísticos foram inseridos no algoritmo, inicializando-se uma parte da população com um dos planos

semafóricos da SETRAN, já utilizado e testado na prática (no horário da 7h às 9h da manhã, de segunda a sexta). Esta estratégia mostrou-se eficaz, tendo com isso o PSO um início melhor direcionado e uma convergência mais rápida. Uma grande vantagem deste método é a possibilidade de utilizar conhecimentos e experiência humanos em conjunto com as capacidades de computação do algoritmo PSO. Por exemplo, um plano semafórico com um *design* de progressões semafóricas (ondas verdes) pode ser feito especificamente para a região tratada – como foi o caso da SETRAN – e inserido na população inicial do PSO. Um início totalmente aleatório da população muito dificilmente geraria soluções que contenham essas mesmas características de progressões semafóricas.

Adicionalmente, um operador de mutação foi utilizado tendo como objetivo manter a variabilidade do enxame do PSO, evitando a estagnação em ótimos locais. Isso mostrou-se, em testes, eficaz para a geração de soluções melhores na execução do algoritmo. Também, um operador de reparação foi implementado, de forma que as soluções geradas pelo movimento das partículas fossem adequadas para uso prático – ou seja, para que os planos semafóricos satisfaçam às restrições estabelecidas e possam ser utilizadas em simulações e também na prática.

A métrica principal de desempenho de planos semafóricos, utilizada diretamente no algoritmo PSO, foi o atraso médio. Métricas auxiliares de tempo de viagem e *throughput* foram consideradas em análises manuais. Nos testes realizados, o sistema mostrou-se capaz de otimizar planos semafóricos para situações de tráfego específicas. Nos testes com o conjunto realístico de rotas e demandas, foi possível obter melhorias¹ nos quesitos de atraso médio (52,38%), tempo de viagem (33,69%) e *throughput* (9,18%). Ainda, com conjunto arbitrário de rotas e demandas, foi possível obter 52,59%, 38,00% e 12,47% de melhoria² nos mesmos quesitos.

Um ponto importante a ser ressaltado é que os planos semafóricos gerados pelo sistema podem ser aplicados nos controladores já instalados na cidade (bastando apenas efetuar arredondamentos numéricos, como discutido na seção 4.3.4). Isso é possível pois o trabalho foi focado no paradigma dos controladores semafóricos de tempo fixo, que é o tipo de controlador mais comumente utilizado em Curitiba, e além disso, fez uso dos dados para criar um ambiente mais próximo do real quanto possível.

Para trabalhos futuros, seria interessante que sensores que permitem a medição de taxas de conversão em cada cruzamento possam ser instalados. Dessa forma, o modelo de simulação pode ser desenvolvido mais precisamente, de forma a se adequar melhor à

¹Dados da Tabela 8.

²Dados da Tabela 12.

realidade. Deve-se observar que a aplicabilidade prática dos planos semaforicos gerados pelo sistema de otimização depende muito fortemente do realismo do modelo de simulação. Este, portanto, é um ponto interessante para ser abordado.

Também, pode-se focar em um detalhamento maior da simulação – por exemplo, incluindo rotas de ônibus, paradas de carros para estacionamento ou embarque/desembarque, faixas de pedestres, entre outros. Também, seria interessante realizar estudos estatísticos com relação ao perfil dos motoristas e dos veículos mais presentes na região semaforica estudada, de forma a enriquecer mais o modelo de simulação e torná-lo mais realista. É importante notar que o *software* SUMO possui recursos para implementar todo esse detalhamento na simulação.

E em Curitiba, seguindo esta linha de pesquisa, pode haver a possibilidade de que mais sensores de monitoramento de tráfego sejam instalados, de tal forma que mais regiões da cidade possam ser simuladas e otimizadas. E pode-se pensar também em simular várias regiões semaforicas e otimizá-las em conjunto, aumentando-se com isso a abrangência de potenciais melhorias no tráfego. Finalmente, outro ponto a ser pensado para o futuro é que outras cidades, além de Curitiba, podem se beneficiar ao estender a metodologia deste projeto para elas.

REFERÊNCIAS

- ABUSHEHAB, R.; ABDALHAQ, B.; SARTAWI, B. Genetic vs. particle swarm optimization techniques for traffic light signals timing. In: **6th International Conference on Computer Science and Information Technology (CSIT)**. 2014. p. 27–35.
- AL-NASSER, F. A.; MAHMOUD, M. S. **Wireless Sensors Network Application: A Decentralized Approach for Traffic Control and Management**. 2012. Disponível em: <goo.gl/TYYcwl>.
- ARENA. **Arena Simulation**. 2015. Disponível em: <<http://www.arenasimulation.com>>.
- BANKS, J. et al. **Discrete-Event System Simulation**. : Pearson Education, Limited, 2013. ISBN 9781292024370.
- CASTRO, L. D.; ZUBEN, F. V. **Recent Developments in Biologically Inspired Computing**. : Idea Group Pub., 2005. ISBN 9781591403135.
- CENTER, I. o. T. S. G. A. **SUMO - Simulation of Urban MObility**. 2014. Disponível em: <<http://sumo-sim.org/>>. Acesso em: 01 de julho de 2014.
- COMMUNITY, O. **Open Street Map**. 2015. Disponível em: <<http://www.openstreetmap.org/>>.
- DONG, C.; HUANG, S.; LIU, X. Urban area traffic signal timing optimization based on sa-pso. In: **Proceedings of the 2010 International Conference on Artificial Intelligence and Computational Intelligence (AICI)**. 2010. v. 3, p. 80–84.
- EBERHART, R.; SHI, Y. Tracking and optimizing dynamic systems with particle swarms. In: **Proceedings of the 2001 Congress on Evolutionary Computation**. 2001. v. 1, p. 94–100 vol. 1.
- EL-SHORBAGY, A. A. E.-S. Z. M. H. M. A. Reference point based tr-pso for multi-objective environmental/economic dispatch. **Applied Mathematics**, v. 4, n. 5, p. 11, 2013.
- FHWA. **Traffic Signal Timing Manual**. Federal Highway Administration, U.S. Department of administration, 2008. Disponível em: <http://ops.fhwa.dot.gov/publications/fhwahop08024/fhwa_hop_08_024.pdf>.
- GARCIA-NIETO, J.; OLIVERA, A.; ALBA, E. Optimal cycle program of traffic lights with particle swarm optimization. **IEEE Transactions on Evolutionary Computation**, v. 17, n. 6, p. 823–839, Dec 2013. ISSN 1089-778X.
- GÖKÇE, M. A.; ÖNER, E.; ISIK, G. Traffic signal optimization with particle swarm optimization for signalized roundabouts. **Simulation**, Society for Computer Simulation International, San Diego, CA, USA, v. 91, n. 5, p. 456–466, maio 2015. ISSN 0037-5497. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1177/0037549715581473>>.

KELTON, W.; SADOWSKI, R.; SADOWSKI, D. **Simulation with Arena**. : McGraw-Hill School Education Group, 2002. (McGraw-Hill Series in Industrial Engineering and Management Science). ISBN 9780072392708.

KENNEDY, J.; EBERHART, R. Particle swarm optimization. In: **IEEE International Conference on Neural Networks**. 1995. v. 4, p. 1942–1948.

KENNEDY, J.; EBERHART, R. A discrete binary version of the particle swarm algorithm. In: **IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics**. 1997. v. 5, p. 4104–4108. ISSN 1062-922X.

KRAJZEWICZ, D. et al. Sumo (simulation of urban mobility). In: **Proceedings of the 4th Middle East Symposium on Simulation and Modelling**. 2002. p. 183–187.

LOMAX, D. S. T. **2009 Urban Mobility Report**. 2009. Disponível em: <http://americandreamcoalition.org/highways/mobility_report_2009_wappx.pdf>.

NOORI, H. Modeling the impact of vanet-enabled traffic lights control on the response time of emergency vehicles in realistic large-scale urban area. In: **IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC)**. 2013. p. 526–531.

POLI, R. An analysis of publications on particle swarm optimization applications. **Essex, UK: Department of Computer Science, University of Essex**, 2007. Disponível em: <http://cswww.essex.ac.uk/staff/rpoli/papers/PoliJAEA2008_Analysis_Publications_PSO.pdf>. Acesso em: 20 de Junho de 2015.

POVO, G. do. **Paraná fecha 2013 com frota de 6,16 milhões de veículos**. 2014. Disponível em: <<http://www.gazetadopovo.com.br/vidaecidadania/conteudo.phtml?id=1441308>>. Acesso em: 12 de maio de 2014.

PROTHMANN, H. et al. Organic control of traffic lights. In: RONG, C. et al. (Ed.). **Autonomic and Trusted Computing**. Springer Berlin Heidelberg, 2008. v. 5060, p. 219–233. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-69295-9_19>.

SHI, Y.; EBERHART, R. A modified particle swarm optimizer. **IEEE International Conference on Evolutionary Computation**, IEEE Press, Piscataway, NJ, p. 69–73, 1998.

SHI, Y.; EBERHART, R. Fuzzy adaptive particle swarm optimization. In: **Proceedings of the 2001 Congress on Evolutionary Computation**. 2001. v. 1, p. 101–106 vol. 1.

STACEY, A.; JANCIC, M.; GRUNDY, I. Particle swarm optimization with mutation. In: **CEC '03. The 2003 Congress on Evolutionary Computation**. 2003. v. 2, p. 1425–1430 Vol.2.

STUTZER, B. **HBEFA - Handbook Emission Factors for Road Transport**. 2014. Disponível em: <<http://www.hbefa.net>>.

SUMO. **Models/Emissions/HBEFA3-based - Sumo**. 2014a. Disponível em: <<http://sumo.dlr.de/wiki/Models/Emissions/HBEFA3-based>>.

SUMO. **Models/Emissions** - Sumo. 2014b. Disponível em: <<http://sumo.dlr.de/wiki/Models/Emissions>>.

SUMO. **Simulation/Traffic Lights** - Sumo. 2014c. Disponível em: <http://sumo.dlr.de/wiki/Simulation/Traffic_Lights>.

SUMO. **Simulation/Output/TripInfo** - Sumo. 2014d. Disponível em: <<http://sumo.dlr.de/wiki/Simulation/Output/TripInfo>>.

SUN, D.; BENEKOHAL, R.; WALLER, S. Multiobjective traffic signal timing optimization using non-dominated sorting genetic algorithm. In: **Proceedings of the IEEE Intelligent Vehicles Symposium**. 2003. p. 198–203.

TEO, K.; KOW, W.; CHIN, Y. Optimization of traffic flow within an urban traffic light intersection with genetic algorithm. In: **Second International Conference on Computational Intelligence, Modelling and Simulation (CIMSIM)**. 2010. p. 172–177.

TOMFORDE, S. et al. Possibilities and limitations of decentralised traffic control systems. In: **The 2010 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN)**. 2010. p. 1–9. ISSN 1098-7576.

TOMFORDE, S. et al. Decentralised progressive signal systems for organic traffic control. In: **Second IEEE International Conference on Self-Adaptive and Self-Organizing Systems, 2008**. 2008. p. 413–422.

URGAL, L. P.; FUCHS, S. C. **Vídeos de otimização semafórica**. 2015. Disponível em: <<https://goo.gl/vsrFJU>>.

ZHANG, L.-p. et al. Analysis and improvement of particle swarm optimization algorithm. **Information and control**, v. 33, n. 5, p. 513–517, 2004.

ZHENG, Y. ling et al. On the convergence analysis and parameter selection in particle swarm optimization. In: **International Conference on Machine Learning and Cybernetics**. 2003. v. 3, p. 1802–1807 Vol.3.