



ROTEAMENTO ECOLÓGICO DE VEÍCULOS ORIENTADO A ONDAS VERDES

Flávio Augusto Ribeiro de Faria

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Sistemas e Computação, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Sistemas e Computação.

Orientadores: Felipe Maia Galvão França
Antonio Alfredo Ferreira
Loureiro

Rio de Janeiro
Setembro de 2013

ROTEAMENTO ECOLÓGICO DE VEÍCULOS ORIENTADO A ONDAS
VERDES

Flávio Augusto Ribeiro de Faria

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA DE SISTEMAS E COMPUTAÇÃO.

Examinada por:

Prof. Felipe Maia Galvão França, Ph.D.

Prof. Antonio Alfredo Ferreira Loureiro, Ph.D.

Prof. Valmir Carneiro Barbosa, Ph.D.

Prof. Paulo Cezar Martins Ribeiro, Ph.D.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL
SETEMBRO DE 2013

Faria, Flávio Augusto Ribeiro de

Roteamento ecológico de veículos orientado a ondas verdes/Flávio Augusto Ribeiro de Faria. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2013.

XV, 87 p.: il.; 29, 7cm.

Orientadores: Felipe Maia Galvão França

Antonio Alfredo Ferreira Loureiro

Dissertação (mestrado) – UFRJ/COPPE/Programa de Engenharia de Sistemas e Computação, 2013.

Referências Bibliográficas: p. 85 – 87.

1. Sistemas Inteligentes de Transporte. 2. Algoritmos de roteamento. 3. Consumo de combustível. 4. Emissão de gases. 5. Simulação de tráfego. I. França, Felipe Maia Galvão *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia de Sistemas e Computação. III. Título.

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Gabi, minha noiva e futura esposa, que me serviu como grande motivação para vir morar no Rio de Janeiro e fazer mestrado na COPPE. Sem o seu apoio, a realização deste trabalho seria muito mais difícil.

Agradeço também a Tia Dirce, por ter me acolhido no Rio e por ter me ajudado nos momentos em que eu precisei.

Não posso também me esquecer de Dot, meu grande companheiro, principalmente nestas últimas semanas.

À minha família, especialmente os meus pais e irmãos, pela formação que me deram, por tudo que investiram em mim e por todos os sacrifícios que fizeram para que eu chegasse até onde cheguei.

Ao meu estimado amigo Lúcio (Lulu), por toda a orientação que me foi dada desde o início, pela ajuda na solução de problemas que tive ao longo do caminho e por ter desenvolvido o MicroLAM.

Ao meu parceiro Daniel, por todo o trabalho em conjunto que desenvolvemos e pelas longas horas de conversa sobre engenharia de tráfego, simulações e sobre os problemas dos nossos trabalhos que resolvemos juntos.

A Bruno, por ter tido a maior boa vontade do mundo para revisar a minha dissertação e pelas responsabilidades que assumiu por conta da minha ausência na Dot Legend.

A Bernardo, por dividir comigo e com Daniel alguns dos momentos de tensão, euforia e angústia durante as últimas semanas nas quais concluímos os nossos trabalhos.

Aos amigos da Dot Legend, pelo apoio e companheirismo durante os quase três anos que estamos juntos.

Aos meus orientadores, Felipe e Loureiro, que me ajudaram a concretizar este trabalho e aos demais professores que tive no PESC, por todo o aprendizado que me proporcionaram.

À CAPES, por ter me concedido uma bolsa de mestrado durante o período em que fui estudante.

A Rodrigo, administrador do Grid-IA, que sempre esteve disponível e solícito nos momentos em que precisei de sua ajuda para realizar meus experimentos.

Às comunidades que mantêm as ferramentas que tornaram o desenvolvimento deste trabalho muito mais fácil: \LaTeX , Inkscape, Gnuplot e OAR.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

ROTEAMENTO ECOLÓGICO DE VEÍCULOS ORIENTADO A ONDAS VERDES

Flávio Augusto Ribeiro de Faria

Setembro/2013

Orientadores: Felipe Maia Galvão França

Antonio Alfredo Ferreira Loureiro

Programa: Engenharia de Sistemas e Computação

Neste trabalho, é apresentado um algoritmo de roteamento de veículos que se baseia nos tempos de operação das fases em um sistema de tráfego semaforizado. A solução proposta viabiliza um melhor aproveitamento dos sinais verdes, proporcionando reduções no tempo médio de viagem, no atraso médio e também nos níveis de consumo de combustível e de emissão de gases poluentes. Um outro benefício deste algoritmo de roteamento inteligente é a sua capacidade promover um balanceamento de carga em um sistema de tráfego, de modo a retardar ou até mesmo evitar a saturação das vias.

O microssimulador de tráfego MicroLAM foi utilizado para avaliar o desempenho deste algoritmo em cenários com semáforos de tempo fixo e também com semáforos inteligentes, que reconfiguram seus tempos em função das condições do trânsito.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

ECOLOGICAL GREEN-WAVE-DRIVEN VEHICLE ROUTING

Flávio Augusto Ribeiro de Faria

September/2013

Advisors: Felipe Maia Galvão França

Antonio Alfredo Ferreira Loureiro

Department: Systems Engineering and Computer Science

This work presents a vehicle routing algorithm that is based on signal phase operation timings in a signal-controlled traffic system. The proposed solution enables vehicles to take advantage of green lights, allowing reductions in average travel times and average delays, as well as lower fuel consumption and emissions rates. Another advantage of the presented algorithm is its ability to provide load balancing to the traffic system, so that roads take longer to get saturated, if they ever do.

A microscopic traffic simulator called MicroLAM was used to evaluate the performance of this routing algorithm in environments where pretimed signals were used. Simulations were also performed with intelligent signals, which self-reconfigure their timings according to traffic conditions.

Sumário

Lista de Figuras	x
Lista de Tabelas	xiv
1 Introdução	1
1.1 Objetivos	2
1.2 Trabalhos Relacionados	2
1.2.1 Roteamento de Veículos	3
1.2.2 Predição de Semáforos	3
1.3 Estrutura da Dissertação	4
2 Referencial Teórico	5
2.1 Componentes do Fluxo de Tráfego	5
2.1.1 Parâmetros Macroscópicos	6
2.1.2 Parâmetros Microscópicos	7
2.1.3 Tempo de Viagem e Atraso	7
2.2 Princípios da Sinalização de Interseções	9
2.2.1 Componentes do Ciclo de um Semáforo	9
2.3 Controle de Sinais	10
2.3.1 Controlador SMER	11
2.4 Coordenação de Sinais	15
2.4.1 Coordenador SMER	15
2.5 Modelos de Consumo de Combustível e Emissão de Gases	16
2.5.1 Avaliação Empírica dos Níveis de Consumo de Combustível	17
2.5.2 VT-Micro	18
2.6 Simulação de Tráfego	20
2.6.1 Modelos Determinísticos e Estocásticos	20
2.6.2 Modelos Baseados em Eventos e no Tempo	20
2.6.3 Modelos Microscópicos, Macroscópicos e Mesoscópicos	20
2.6.4 Modelos de Perseguição Veicular	21

3	MicroLAM	23
3.1	Representação dos Elementos de Tráfego	25
3.2	Roteamento de Veículos	27
4	Roteamento Ecológico Orientado a Ondas Verdes	29
4.1	Gerador de Redes Fechadas	29
4.2	Exibição das rotas	30
4.3	Rota Espacialmente Mais Curta	31
4.4	Rota Temporalmente Mais Curta	32
4.5	IDM e Desaceleração nas Curvas	32
4.6	Níveis de consumo e emissão de gases	33
4.7	Roteamento Inteligente	36
4.7.1	Predição de Fases dos Semáforos	37
4.7.2	Planejamento de Rota Cooperativo e Sensível à Demanda . . .	38
4.7.3	Replanejamento Dinâmico da Rota	40
4.8	IDM e Ondas Verdes	40
4.8.1	Aceleração Confortável	41
4.9	Considerações Finais	47
5	Experimentos e Resultados	48
5.1	Metodologia Utilizada	48
5.1.1	Medidas de Interesse	48
5.2	Experimentos Realizados	49
5.2.1	Semáforos de Tempo Fixo	51
5.2.2	Semáforos SMER	70
6	Conclusões e Trabalhos Futuros	82
6.1	Trabalhos Futuros	82
6.1.1	Suporte a Múltiplas Faixas	83
6.1.2	Pontos Intermediários de Origem e Destino	83
6.1.3	Experimentos em Cenários Urbanos Reais	83
	Referências Bibliográficas	85

Lista de Figuras

2.1	Densidade de veículos.	6
2.2	<i>Headway</i> espacial.	7
2.3	<i>Headway</i> temporal.	7
2.4	Fluxos de uma interseção, com suas respectivas regiões de conflito [1].	11
2.5	Fluxos como processos e regiões de conflito como recursos compartilhados [1].	12
2.6	Operação do escalonamento dos fluxos da interseção. Após o término da execução, cada sumidouro (em cor escura) reverte as suas arestas para que outros processos possam executar. Os estados do grafo se repetem periodicamente [1].	13
2.7	Exemplo da operação de um multigrafo SMER ao escalonar seus processos [1].	14
2.8	Interseções representadas como recursos e corredores representados como processos que as compartilham [1].	16
3.1	Interface gráfica do MicroLAM [1, p.30].	24
3.2	Representação em grafo de um cenário do MicroLAM.	27
4.1	Rede fechada de tamanho 3×3 com vias em sentidos alternados. As interserções de entrada e de saída estão destacadas na cor cinza.	30
4.2	Pequenas setas sobre as vias de uma rede fechada indicando a rota do veículo selecionado, que foi gerada aleatoriamente.	31
4.3	Painel exibindo níveis instantâneos de consumo de combustível e emissão de gases do veículo selecionado (em amarelo).	34
4.4	Comparação das curvas de aceleração instantânea do IDM.	36
4.5	Comparação das acelerações de um veículo antes e depois das adaptações realizadas no IDM.	42
4.6	Pelotão de veículos se posicionando na cabeça de um segmento de onda verde que se propaga da interseção i13 em direção à interseção i14, representado por um tapete magenta sobre a via.	43

5.1	Rede fechada 10×10 utilizada nas simulações. As setas indicam os sentidos dos fluxos.	50
5.2	Resultados da simulação da estratégia de reserva de espaço nas fases dos semáforos.	54
	(a) Tempo médio de viagem e atraso médio.	54
	(b) Velocidade média.	54
	(c) Níveis de consumo de combustível.	54
	(d) Níveis de emissão de gases.	54
5.3	Resultados da simulação após a adoção da estratégia de replanejamento dinâmico da rota.	56
	(a) Tempo médio de viagem e atraso médio.	56
	(b) Velocidade média.	56
	(c) Níveis de consumo de combustível.	56
	(d) Níveis de emissão de gases.	56
5.4	Resultados da comparação de desempenho das simulações com volume baixo entre a rota espacialmente mais curta e a rota orientada a ondas verdes.	59
	(a) Tempo médio de viagem e atraso médio.	59
	(b) Velocidade média.	59
	(c) Níveis de consumo de combustível.	59
	(d) Níveis de emissão de gases.	59
5.5	Resultados da comparação de desempenho das simulações com volume médio entre a rota espacialmente mais curta e a rota orientada a ondas verdes.	60
	(a) Tempo médio de viagem e atraso médio.	60
	(b) Velocidade média.	60
	(c) Níveis de consumo de combustível.	60
	(d) Níveis de emissão de gases.	60
5.6	Resultados da comparação de desempenho das simulações com volume alto entre a rota espacialmente mais curta e a rota orientada a ondas verdes.	61
	(a) Tempo médio de viagem e atraso médio.	61
	(b) Velocidade média.	61
	(c) Níveis de consumo de combustível.	61
	(d) Níveis de emissão de gases.	61
5.7	Resultados da comparação de desempenho das simulações com volume baixo entre a rota temporalmente mais curta e a rota orientada a ondas verdes.	63
	(a) Tempo médio de viagem e atraso médio.	63

(b)	Velocidade média.	63
(c)	Níveis de consumo de combustível.	63
(d)	Níveis de emissão de gases.	63
5.8	Resultados da comparação de desempenho das simulações com volume médio entre a rota temporalmente mais curta e a rota orientada a ondas verdes.	64
(a)	Tempo médio de viagem e atraso médio.	64
(b)	Velocidade média.	64
(c)	Níveis de consumo de combustível.	64
(d)	Níveis de emissão de gases.	64
5.9	Resultados da comparação de desempenho das simulações com volume alto entre a rota temporalmente mais curta e a rota orientada a ondas verdes.	65
(a)	Tempo médio de viagem e atraso médio.	65
(b)	Velocidade média.	65
(c)	Níveis de consumo de combustível.	65
(d)	Níveis de emissão de gases.	65
5.10	Mapa de calor da contagem de veículos na simulação do algoritmo de rota espacialmente mais curta com volume alto. As cores estão interpoladas em escala logarítmica.	67
5.11	Mapa de calor da contagem de veículos na simulação do algoritmo de rota temporalmente mais curta com volume alto. As cores estão interpoladas em escala logarítmica.	68
5.12	Mapa de calor da contagem de veículos na simulação do algoritmo de rota orientada a ondas verdes com volume alto. As cores estão interpoladas em escala logarítmica.	69
5.13	Deadlock.	70
5.14	Resultados da comparação de desempenho das simulações com volume médio entre as rotas temporalmente mais curta, espacialmente mais curta e orientada a ondas verdes. O intervalo entre as reconfigurações das fases foi de 5 minutos.	73
(a)	Tempo médio de viagem e atraso médio.	73
(b)	Velocidade média.	73
(c)	Níveis de consumo de combustível.	73
(d)	Níveis de emissão de gases.	73
5.15	Resultados da comparação de desempenho das simulações com volume médio entre as rotas temporalmente mais curta, espacialmente mais curta e orientada a ondas verdes. O intervalo entre as reconfigurações das fases foi de 10 minutos.	75

(a)	Tempo médio de viagem e atraso médio.	75
(b)	Velocidade média.	75
(c)	Níveis de consumo de combustível.	75
(d)	Níveis de emissão de gases.	75
5.16	Resultados da comparação de desempenho das simulações com volume médio entre as rotas temporalmente mais curta, espacialmente mais curta e orientada a ondas verdes. O intervalo entre as reconfigurações das fases foi de 15 minutos.	77
(a)	Tempo médio de viagem e atraso médio.	77
(b)	Velocidade média.	77
(c)	Níveis de consumo de combustível.	77
(d)	Níveis de emissão de gases.	77
5.17	Resultados da comparação de desempenho das simulações com volume baixo entre as rotas temporalmente mais curta, espacialmente mais curta e orientada a ondas verdes.	79
(a)	Tempo médio de viagem e atraso médio.	79
(b)	Velocidade média.	79
(c)	Níveis de consumo de combustível.	79
(d)	Níveis de emissão de gases.	79
5.18	Resultados da comparação de desempenho das simulações com volume alto entre as rotas temporalmente mais curta, espacialmente mais curta e orientada a ondas verdes.	81
(a)	Tempo médio de viagem e atraso médio.	81
(b)	Velocidade média.	81
(c)	Níveis de consumo de combustível.	81
(d)	Níveis de emissão de gases.	81

Lista de Tabelas

2.1	Comparação dos modelos de regressão	18
2.2	Parâmetros dos modelos de regressão	19
5.1	Medidas de interesse para o roteamento sensível às fases dos semáforos.	52
5.2	Medidas de interesse para o parâmetro de calibração do algoritmo de roteamento.	52
5.3	Medidas de interesse para o teste de replanejamento dinâmico da rota.	55
5.4	Medidas de interesse para o roteamento orientado a ondas verdes com volumes baixo e médio.	57
5.5	Medidas de interesse para o algoritmo de rota espacialmente mais curta com volumes baixo, médio e alto.	58
5.6	Medidas de interesse para o algoritmo de rota temporalmente mais curta com volumes baixo, médio e alto.	62
5.7	Intervalos que definem os volumes variáveis utilizados nas simulações com semáforos SMER.	71
5.8	Comparativo entre o desempenho das rotas espacialmente mais curta, temporalmente mais curta e orientada a ondas verdes em um cenário com semáforos SMER. O intervalo entre as reconfigurações das fases foi de 5 minutos.	72
5.9	Comparativo entre o desempenho das rotas espacialmente mais curta, temporalmente mais curta e orientada a ondas verdes em um cenário com semáforos SMER. O intervalo entre as reconfigurações das fases foi de 10 minutos.	74
5.10	Comparativo entre o desempenho das rotas espacialmente mais curta, temporalmente mais curta e orientada a ondas verdes em um cenário com semáforos SMER. O intervalo entre as reconfigurações das fases foi de 15 minutos.	76
5.11	Comparativo entre o desempenho das rotas espacialmente mais curta, temporalmente mais curta e orientada a ondas verdes em um cenário com semáforos SMER. Foi utilizada a configuração de volume baixo para estas simulações.	78

5.12 Comparativo entre o desempenho das rotas espacialmente mais curta, temporalmente mais curta e orientada a ondas verdes em um cenário com semáforos SMER. Foi utilizada a configuração de volume alto para estas simulações.	80
--	----

Capítulo 1

Introdução

A deficiência existente nos serviços de transporte coletivo das cidades brasileiras aliada aos incentivos fiscais oferecidos à indústria automobilística vem provocando um crescimento nas vendas de veículos automotores de uso pessoal. Nos últimos 30 anos, a frota brasileira de veículos teve um crescimento exponencial de aproximadamente 400% [2], o que vem acarretando uma maior saturação dos sistemas rodoviários. Consequentemente, o efeito observado é um prejuízo à mobilidade urbana como um todo.

De acordo com os dados de uma pesquisa da Confederação Nacional da Indústria e do IBOPE [3], 24% da população brasileira gasta mais de uma hora por dia para se locomover entre suas residências até a escola ou local de trabalho. Nos municípios com uma população superior a 100 mil habitantes, esta fração sobe para 32%. Na cidade de São Paulo, o tempo médio de viagem é de 52 minutos [4].

O aumento da frota de veículos também traz malefícios à saúde pública e ao meio ambiente. Portanto, o Conselho Nacional do Meio Ambiente criou o PROCONVE e o PROMOT, programas que visam supervisionar e diminuir os níveis de poluição do ar por veículos rodoviários automotores [5]. Estes programas estabelecem limites para os níveis de emissão dos veículos importados e fabricados no Brasil de acordo com um cronograma de fases que deve ser cumprido pela indústria. Entretanto, a substituição da frota de veículos do país ocorre de forma gradual, à medida em que eles vão envelhecendo e se tornando sucateados.

Uma estratégia que vem sendo adotada por algumas cidades nos últimos anos para aprimorar a mobilidade urbana com o uso de tecnologia avançada é a implementação de Sistemas Inteligentes de Transporte (ou, em Inglês, *Intelligent Transportation Systems*, também conhecidos como ITS) [6].

São diversos os instrumentos compreendidos na área de Sistemas Inteligentes de Transporte, os quais foram concebidos para melhorar a eficiência e a segurança de um sistema de tráfego rodoviário a partir do uso de sistemas computacionais e de telecomunicações. Estas ferramentas podem proporcionar uma maior velocidade

nos deslocamentos urbanos, reduções nos níveis de congestionamento, melhorias na qualidade do ar e redução nos acidentes de trânsito. A economia local também pode ser beneficiada, pois as soluções de ITS propiciam facilidades na área de logística e de distribuição de insumos.

Esta dissertação propõe alguns instrumentos de ITS desenvolvidos pelo autor e seus objetivos serão apresentados na seção 1.1. Alguns trabalhos relacionados que influenciaram e contribuíram para o desenvolvimento deste serão descritos e citados na seção 1.2.

1.1 Objetivos

Em sistemas rodoviários urbanos, existe o interesse de garantir a passagem de forma ininterrupta de um fluxo de veículos por uma sequência de interseções sinalizadas. Para que isso seja possível, é comum que seja adotada a estratégia de sincronizar os tempos em que os semáforos operam de modo em que o direito de passagem seja concedido de forma sequencial, à medida que um pelotão de veículos se aproxima de cada interseção. A literatura de engenharia de tráfego se refere ao efeito causado por esta sincronização como *onda verde*.

Este trabalho propõe um algoritmo que permite que um veículo que viaja partindo de um ponto de origem até um ponto de destino possa construir a sua rota de modo a obter vantagem das temporizações dos semáforos. Foram também propostas extensões ao *Intelligent Driver Model* (IDM) [7] que sugerem um comportamento adequado para que o veículo sempre se mantenha viajando nas janelas de tempo das ondas verdes e que tenha o compromisso de tornar mais homogênea a sua aceleração instantânea.

A partir do uso desta solução, é esperado observar uma redução nos tempos de viagem e de atraso, como também nos níveis de consumo de combustível e de emissão de gases poluentes.

Estas hipóteses foram verificadas com o uso de um microssimulador de tráfego, para o qual foram também construídos novos módulos que permitiram que fossem realizadas simulações utilizando o algoritmo proposto. O desempenho deste algoritmo foi avaliado em cenários que utilizam dois tipos de semáforos distintos: de tempo fixo e inteligentes.

1.2 Trabalhos Relacionados

A seguir, serão sumarizados alguns trabalhos que compartilham algum aspecto com o que é apresentado nesta dissertação e que de alguma forma contribuíram para o entendimento do estado da arte, facilitando o desenvolvimento da solução proposta.

1.2.1 Roteamento de Veículos

Em 2000, Chen e Yang [8] propuseram um algoritmo de roteamento veicular baseado nas temporizações dos semáforos. Este algoritmo foi fundamentado no problema do caminho mais curto com restrições de tempo, uma generalização do problema do caminho mais curto. As restrições em questão são as janelas de tempo de sinal verde, que se repetem a cada ciclo do semáforo. O algoritmo é basicamente uma extensão do algoritmo de caminho mais curto de Dijkstra [9] e opera sobre um grafo, no qual os vértices representam interseções semaforizadas e as arestas representam as vias que as ligam. Entretanto, o custo de uma aresta (u, v) que liga as interseções u e v é dado pelo instante mais breve possível em que o veículo poderá atravessar a interseção v , que depende do limite de velocidade da via e o momento em que o sinal em v se tornará verde. Parte do algoritmo de roteamento inteligente apresentado nesta dissertação opera de forma bem similar ao algoritmo proposto por Chen e Yang [8]. No entanto, ele foi desenvolvido de forma independente, pois este último só foi descoberto após a conclusão do algoritmo que será aqui apresentado.

Um condutor, ao escolher uma rota até o seu destino, geralmente está interessado em minimizar o tempo de viagem, o que muitas vezes o influencia a escolher rotas mais rápidas, ainda que mais longas. O modo em que um condutor escolhe a sua rota exerce influência no consumo de combustível e nos níveis de emissão de gases. O impacto destas escolhas foi estudado e avaliado por Ahn e Rakha [10], que utilizaram dados coletados por GPS sobre as rotas realizadas por um veículo de teste. A partir destes dados, simulações de tráfego puderam ser realizadas para avaliar o consumo de combustível e os níveis de emissão de gases em função das rotas escolhidas.

1.2.2 Predição de Semáforos

A predição de semáforos para estabelecer um comportamento na dinâmica de movimentação de um veículo já vem sendo explorada há algum tempo por diversos pesquisadores. Em 2006, Sanchez, Cano, e Kim [11] propuseram o IDMP, uma extensão do IDM que avalia os instantes de mudança do semáforo para alertar ao condutor se será ou não possível cruzar a interseção àquela velocidade, permitindo assim uma desaceleração suave para minimizar consumo de combustível. Este modelo foi experimentado a partir de um microssimulador de tráfego que implementava uma rede de sensores sem fio ao longo da via para propagar as informações sobre os tempos que o semáforo operava.

Com o objetivo de minimizar o tempo de viagem e o consumo de combustível, Asadi e Vahidi [12] propuseram um algoritmo para encontrar uma velocidade alvo ótima que garante a passagem ininterrupta por uma sequência de semáforos com o compromisso de reduzir a necessidade de frenagens. É também garantida uma

distância mínima do veículo à frente para que não haja colisões.

1.3 Estrutura da Dissertação

O conteúdo desta dissertação está organizado em seis capítulos. No capítulo 2, serão apresentados alguns fundamentos que foram essenciais para o desenvolvimento deste trabalho, entre eles: princípios básicos de engenharia de tráfego, modelos de estimação de consumo de combustível e emissão de gases e microssimulação de tráfego. No capítulo 3, serão descritos alguns aspectos do MicroLAM, o microssimulador utilizado para a execução das simulações que avaliaram o desempenho da solução proposta. O algoritmo de roteamento orientado a ondas verdes é descrito em detalhes no capítulo 4, juntamente com as modificações realizadas no MicroLAM. No capítulo 5, serão apresentados os experimentos realizados e seus respectivos resultados. Por fim, as conclusões e os trabalhos futuros estarão presentes no capítulo 6.

Capítulo 2

Referencial Teórico

Neste capítulo, serão apresentados os fundamentos que serviram como alicerces teóricos para o desenvolvimento deste trabalho. Serão introduzidos primeiramente alguns conceitos elementares sobre o fluxo de tráfego e também sobre o funcionamento, controle e coordenação de semáforos. Em seguida, serão discutidos alguns modelos de estimação de níveis de consumo de combustível e emissão de gases, os quais foram essenciais para mensurar e avaliar algumas das medidas de interesse no capítulo 5. O referencial teórico encerra com a apresentação do funcionamento de simuladores de tráfego, pois o algoritmo de roteamento inteligente proposto neste trabalho foi avaliado em um desses simuladores.

2.1 Componentes do Fluxo de Tráfego

O entendimento dos componentes do fluxo de tráfego é essencial para compreender toda a dinâmica da interação entre eles. Os componentes mais críticos no contexto de planejamento de tráfego são:

- **usuários:** motoristas, passageiros, pedestres e ciclistas;
- **veículos:** privados e comerciais;
- **vias:** ruas, avenidas e vias expressas;
- **dispositivos de controle de tráfego:** marcação horizontal (faixas de pedestres, faixas de separação de pistas), placas de sinalização e semáforos.
- **fatores ambientais:** clima, iluminação, densidade de desenvolvimento urbano, eficácia na fiscalização de leis de trânsito, etc.

2.1.1 Parâmetros Macroscópicos

A seguir, serão apresentados alguns parâmetros macroscópicos que são frequentemente utilizados como medidas de interesse na área de engenharia de tráfego.

Volume/Taxa de Fluxo

Dado um ponto fixo de referência em uma via qualquer, o volume (ou taxa de fluxo) desta via corresponde ao número de veículos que passam por este ponto durante um determinado intervalo de tempo. Na literatura, é comum descrever o volume de uma via em *veículos por dia* ou *veículos por hora (vph)*.

Velocidade

A velocidade é a taxa de movimento de um veículo e é representada pela razão entre a distância percorrida por unidade de tempo. Em geral, a velocidade é definida em metros por segundo (m/s) ou quilômetros por hora (km/h).

Densidade

A densidade é definida pela quantidade de veículos que ocupam um determinado trecho de uma via ou faixa. A unidade de medida para a densidade é a relação entre a quantidade de veículos por unidade de espaço linear, por exemplo, *veículos por quilômetro* (figura 2.1). Dentre os parâmetros macroscópicos, a densidade é o mais importante deles, pois é o que mais se relaciona com a demanda do tráfego. A densidade também é um bom instrumento para avaliar a qualidade do tráfego na via, visto que, quanto maior a densidade, menor a distância entre os veículos, o que acarreta limitações para manobrá-los e conduzi-los.

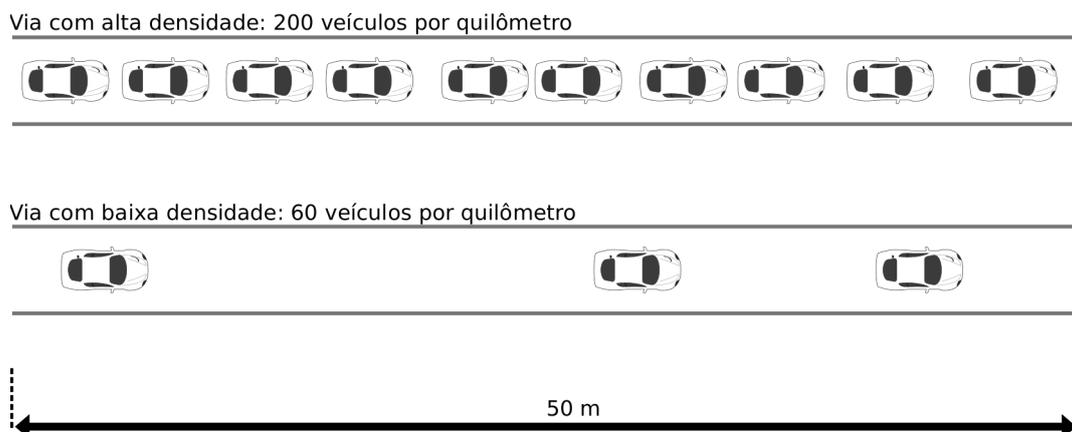


Figura 2.1: Densidade de veículos.

2.1.2 Parâmetros Microscópicos

Headway Espacial

O *headway* espacial é a distância linear que separa dois veículos consecutivos em uma via (figura 2.2). Geralmente, adota-se um ponto de referência para estabelecer esta medida, como por exemplo, o pára-choque dianteiro ou as rodas dianteiras.

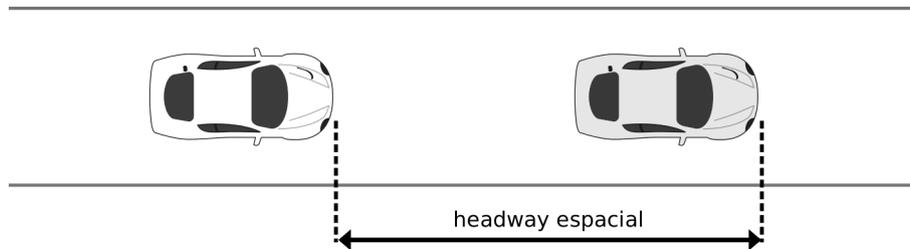


Figura 2.2: *Headway* espacial.

Headway Temporal

O *headway* temporal é o intervalo de tempo entre a passagem de dois veículos consecutivos por um ponto de referência fixo em uma via (figura 2.3). O *headway* temporal é geralmente medido em segundos.

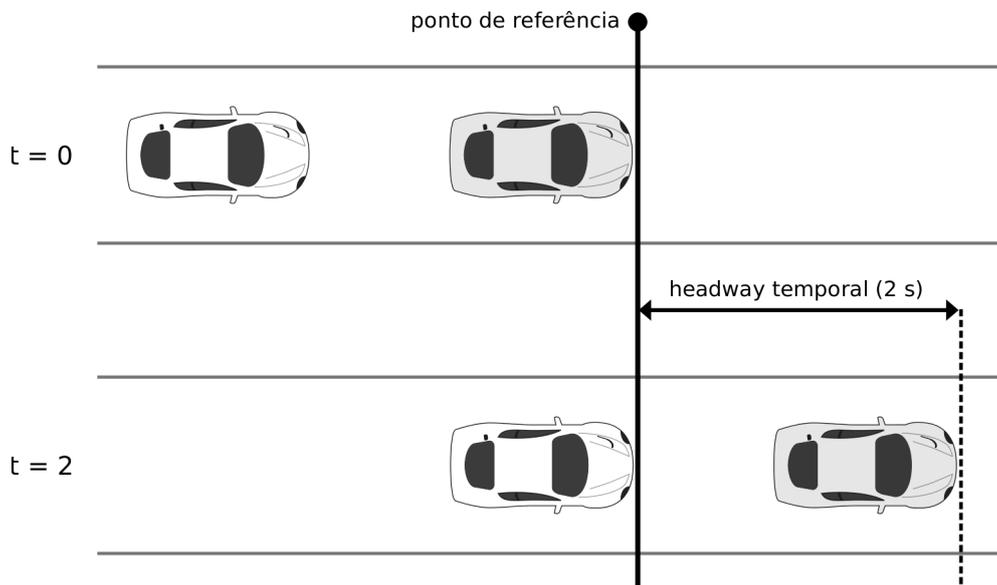


Figura 2.3: *Headway* temporal.

2.1.3 Tempo de Viagem e Atraso

De forma geral, as pessoas, enquanto conduzem seus veículos, estão interessadas em realizar suas viagens no menor tempo possível, dentro dos limites que proporcionam

alguma segurança. Deste modo, o tempo de viagem compreendido entre o ponto de origem e o ponto de destino de cada veículo pode ser utilizado como um dos indicadores de eficiência de um sistema rodoviário.

O *atraso* é uma fração do tempo de viagem que costuma ser facilmente identificada principalmente por ser inconveniente para os passageiros de um veículo. Instantes de espera em um sinal vermelho, obras, acidentes, obstruções de qualquer tipo e congestionamento são exemplos de fatores que colaboram para que o atraso seja maior.

Atraso por tempo de parada

É o tempo que compreende os momentos nos quais o veículo se encontra parado devido a uma interseção sinalizada por semáforo ou por uma placa que instrui o condutor a parar para dar preferência ao fluxo de outra via que utiliza a mesma interseção.

Atraso de aproximação

É o atraso causado pela desaceleração e aceleração necessárias para parar e retomar o movimento do veículo.

Atraso por tempo na fila

Contempla o tempo definido entre o momento em que um veículo ingressa no final de uma fila de veículos parados em uma interseção e o momento em que o mesmo cruza a linha de retenção¹ desta interseção para atravessá-la.

Atraso de controle

É o atraso total causado por uma interseção, que inclui não só o tempo parado na fila, como também o atraso provocado pela desaceleração e aceleração ao chegar e ao sair dela.

Atraso do tempo de viagem

Para os casos em que há uma rota a ser traçada ou pontos de origem e destino definidos, este atraso é descrito como a diferença entre o tempo de viagem real e o tempo de viagem desejado pelo condutor. No entanto, não existem procedimentos precisos para determinar qual seria o tempo de viagem desejado.

¹A linha de retenção de uma interseção é aquela que marca o local limite em que o condutor deve parar o veículo, prevenindo a obstrução da faixa de pedestres e da interseção.

2.2 Princípios da Sinalização de Interseções

A seguir, serão apresentados os princípios básicos que ajudam a compreender o funcionamento da sinalização em uma interseção controlada por um conjunto de semáforos. Os conceitos aqui apresentados são descritos com mais detalhes na referência [13].

2.2.1 Componentes do Ciclo de um Semáforo

Para uma compreensão elementar do funcionamento de uma interseção controlada por semáforos, serão apresentados a seguir alguns conceitos essenciais.

Intervalo

É o espaço de tempo marcado pela duração de um estado do semáforo. Existem quatro tipos de intervalo:

- **intervalo de mudança:** define a transição do estado verde para o vermelho, de modo a garantir que um veículo que não tenha tempo hábil de parar por conta da sua velocidade e proximidade à interseção possa atravessá-la com segurança. Neste intervalo, os semáforos correspondentes aos movimentos que estão em transição de verde para vermelho se tornam amarelos, enquanto os demais semáforos permanecem no estado vermelho. Cada movimento da interseção detém um intervalo de mudança dentro do ciclo.
- **intervalo de vermelho geral:** é um intervalo imediatamente posterior ao intervalo de mudança e estabelece o estado vermelho para todos os movimentos. Este intervalo é necessário para garantir que algum veículo que eventualmente tenha entrado na interseção durante o intervalo de mudança possa cruzá-la completamente com segurança. Cada movimento da interseção detém um intervalo de vermelho geral dentro do ciclo.
- **intervalo verde:** proporciona a liberdade para a passagem dos veículos de um dado movimento pela interseção. Cada movimento da interseção detém um intervalo verde dentro do ciclo.
- **intervalo vermelho:** define que os veículos devem aguardar a liberação da passagem atrás da linha de retenção. Cada movimento da interseção detém um intervalo vermelho durante o ciclo. Para todo movimento proibido haverá um intervalo vermelho, enquanto que para todo movimento legal haverá um intervalo verde.

Fase

É definida pela sequência composta por um intervalo verde, um de mudança e um de vermelho geral que vale para um conjunto de movimentos legais.

Ciclo

É uma sequência de fases que se repete ciclicamente cujo propósito é alternar o fluxo pela interseção, concedendo pelo menos uma única vez o direito à passagem para cada movimento.

Comprimento de Ciclo

É o tempo, em segundos, que um ciclo leva para ser completado.

2.3 Controle de Sinais

A duração dos intervalos de verde dos fluxos conflitantes de uma interseção sinalizada é regida por um mecanismo que idealmente opera em função dos volumes das vias que cruzam esta interseção. O critério utilizado para medir estes volumes é o que diferencia os tipos de controle comumente empregados nos semáforos. Entre os tipos de controle de sinais, se destacam:

- **Controle de tempo fixo:** neste tipo de controle, o semáforo respeita uma sequência de fases pré-configurada, com seus respectivos tempos de verde, amarelo e vermelho constantes. Esta sequência de fases se repete continuamente e de forma determinística. Entretanto, os volumes nas vias que cruzam a interseção, em geral, não se mantêm constantes ao longo do dia, especialmente pela existência de horários de pico. Por isso, pode ser necessário que um semáforo opere com mais de uma política de temporização. Nestes casos, um relógio interno é utilizado para trocar a configuração do semáforo nos horários planejados. Este tipo de controle não depende de sensores instalados nas vias e geralmente tem baixo custo. No entanto, por ser de natureza estática, sua eficiência não será alta se os volumes das vias não estiverem em conformidade com as temporizações, o que torna este controle insensível às variações que costumam ocorrer.
- **Controle atuado:** neste tipo de controle, há detectores instalados nas vias que cruzam a interseção. Os critérios para a distribuição do tempo de verde entre os fluxos conflitantes são baseados nos dados coletados por estes detectores e em um conjunto de regras pré-programadas.

- **Controle inteligente:** a partir do uso de sistemas computacionais, este tipo de controle permite que os semáforos possam se ajustar dinamicamente em função das mudanças nas condições do tráfego, que são sensoriadas por detectores instalados nas vias. É comum que um conjunto de semáforos opere de forma coordenada e sincronizada para garantir o escoamento ininterrupto de pelotões de veículos em interseções consecutivas.

2.3.1 Controlador SMER

O controlador de semáforo SMER proposto por de Paiva [1] é um controlador inteligente, o qual é capaz de se adaptar dinamicamente às mudanças nas condições do tráfego. Para monitorar os fluxos de veículos que vão cruzar uma interseção, sensores são instalados nas vias de chegada. Estes sensores coletam dados que permitem decidir qual dos fluxos que chegam à interseção tem maior demanda.

Em qualquer interseção sinalizada, fluxos diferentes se cruzam sobre determinadas regiões, de modo que haja a necessidade que os mesmos operem de forma isolada a fim de evitar colisões. Estas regiões são chamadas de *regiões de conflito*. Para compreender a metodologia de funcionamento do controlador SMER, é importante visualizar as regiões de conflito de uma interseção como um conjunto de recursos compartilhados. Os fluxos concorrentes que cruzam esta interseção podem ser entendidos como processos, que executam somente quando todos os recursos dos quais dependem estão disponíveis. A figura 2.4 ilustra um exemplo desta modelagem.

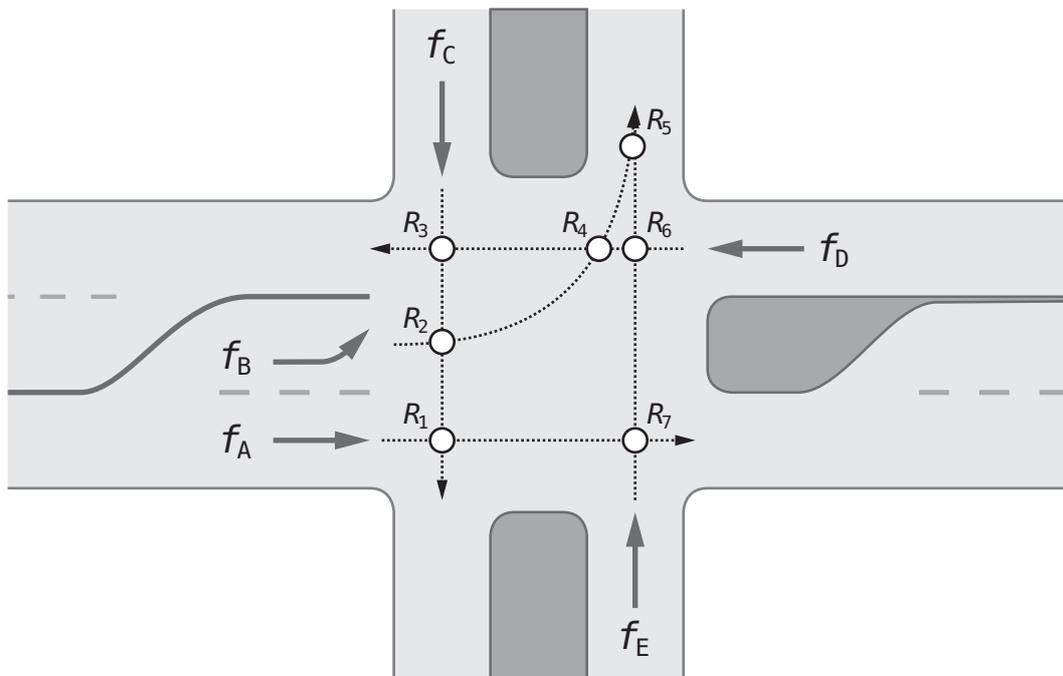


Figura 2.4: Fluxos de uma interseção, com suas respectivas regiões de conflito [1].

Os processos e recursos em questão podem ser formalizados por um grafo dire-

cionado. Cada fluxo da interseção (processo) deve ser representado por um vértice. Se houver uma região de conflito (recurso) para um dado par de fluxos, há de existir no grafo uma aresta entre os vértices que os representam. O sentido da aresta determina qual dos dois fluxos está autorizado a passar pela região de conflito a ela associada, ou seja, qual dos dois processos exerce a posse exclusiva do recurso compartilhado. A figura 2.5 ilustra esta abstração.

Para que um fluxo possa atravessar a interseção com segurança, nenhuma das regiões de conflito das quais ele depende pode estar sendo cruzada por outro fluxo. De forma análoga, para que o processo relativo a este fluxo possa operar, todos os recursos aos quais ele é subordinado precisam estar alocados para ele. No momento em que isto acontece, todas as arestas adjacentes ao vértice que representa este fluxo estão direcionadas para ele, que será chamado de *sumidouro* enquanto estiver nesta condição. Sendo assim, o tempo de verde é concedido para este fluxo apenas quando o seu vértice for sumidouro. No momento em que o semáforo fica vermelho, os recursos sob o seu domínio se tornam desnecessários. Para dar lugar à operação dos demais processos, todas as arestas que representam estes recursos são revertidas, permitindo que os outros fluxos possam atravessar a interseção. Para melhor entendimento, este processo é ilustrado na figura 2.6.

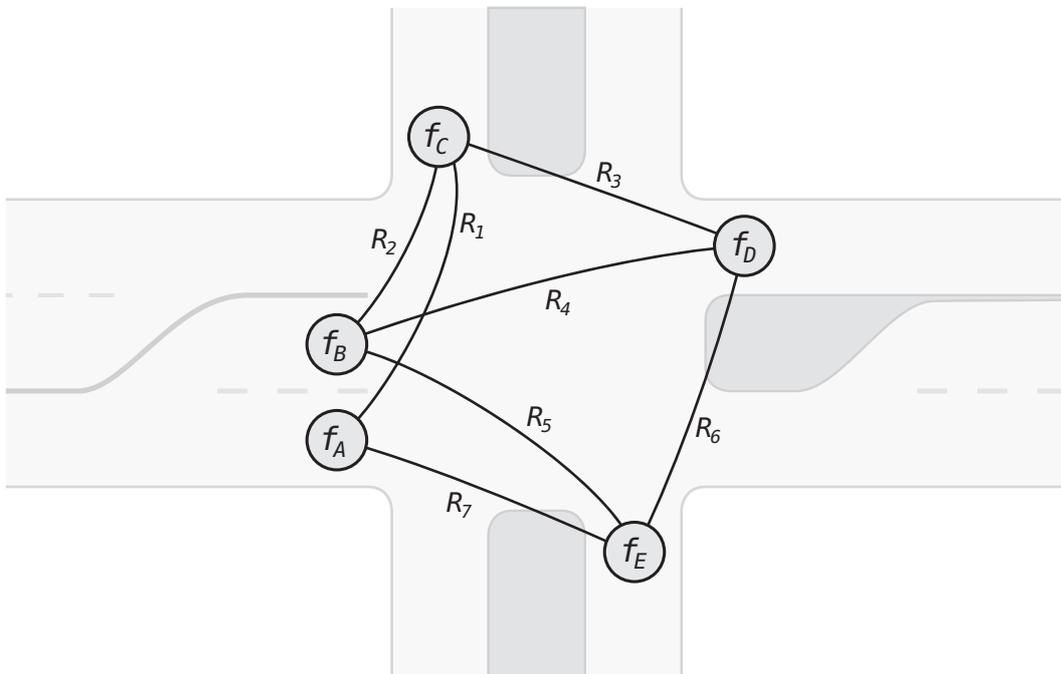


Figura 2.5: Fluxos como processos e regiões de conflito como recursos compartilhados [1].

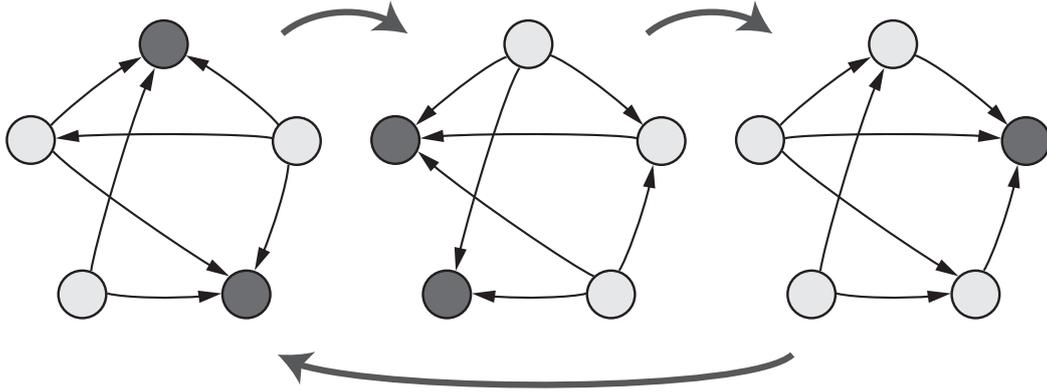


Figura 2.6: Operação do escalonamento dos fluxos da interseção. Após o término da execução, cada sumidouro (em cor escura) reverte as suas arestas para que outros processos possam executar. Os estados do grafo se repetem periodicamente [1].

Este algoritmo de escalonamento de processos é chamado de *Scheduling by Edge Reversal* (SER, em sua forma curta) e mais detalhes a seu respeito podem ser consultados em Barbosa e Gafni [14]. É importante ressaltar que o SER assegura que haverá justiça na execução, ou seja, que cada processo irá executar o mesmo número de vezes dentro de um período. No entanto, é comum encontrar interseções nas quais as vias de chegada têm taxas de fluxo bastante distintas, o que acarreta a necessidade de alocar um maior tempo de verde para algumas dessas vias em detrimento das demais. Nessas condições, a justiça inerente ao SER pode ser desvantajosa.

O SMER (*Scheduling by Multiple Edge Reversal*) [15] é um outro algoritmo de escalonamento que foi derivado do SER, porém ele permite que alguns processos sejam executados com mais frequência do que os demais dentro de cada período do grafo. No entanto, nos grafos em que o SMER opera, que são também chamados de *multigrafos*, é permitido que dois vértices estejam ligados por mais de uma aresta. Um conjunto de arestas que conecta um par de vértices é chamado de *arco*.

Para que um vértice se torne sumidouro, é necessário que haja uma quantidade mínima de arestas de cada arco direcionadas para ele. Esta quantidade mínima é uma propriedade do vértice e a ela é dada o nome de *reversibilidade*. A reversibilidade também determina quantas arestas de cada arco são invertidas após o término da execução.

Para garantir que dois vértices adjacentes não executem ao mesmo tempo, a quantidade de arestas que formam o arco que os une deve ser obrigatoriamente inferior à soma das reversibilidades destes vértices. Para evitar que estes dois vértices entrem em *deadlock*, o número exato de arestas que devem compor este arco é definido por:

$$r_i + r_j - mdc(r_i, r_j), \quad (2.1)$$

onde r_i e r_j são os valores correspondentes às suas reversibilidades. A figura 2.7 exemplifica o compartilhamento de recursos em um grafo SMER.

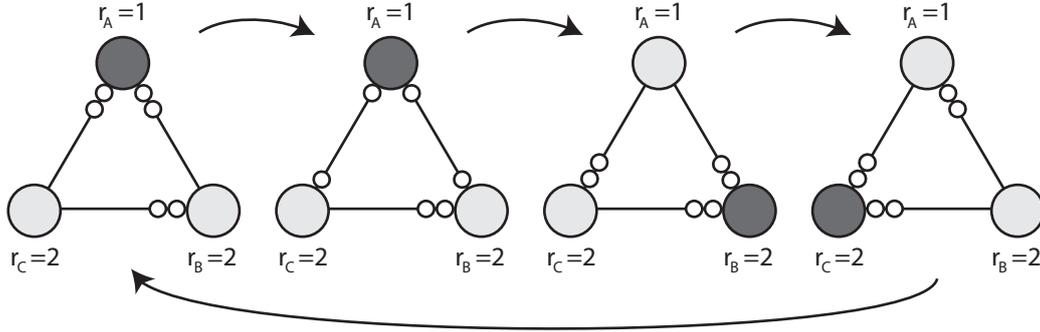


Figura 2.7: Exemplo da operação de um multigrafo SMER ao escalonar seus processos [1].

É importante perceber que, para um par de vértices adjacentes, o que tiver menor reversibilidade irá executar, a cada ciclo, com uma frequência maior, visto que o mesmo depende de menos recursos para operar.

As reversibilidades inerentes aos vértices do multigrafo SMER são os mecanismos que possibilitarão que os tempos de verde sejam distribuídos entre as vias de chegada de uma interseção de forma heterogênea. Deste modo, os vértices correspondentes aos fluxos com maior volume terão uma menor reversibilidade. Sendo assim, tempos de verde serão concedidos a estes fluxos com maior frequência.

No controlador SMER, as reversibilidades dos vértices precisam ser calculadas em função das demandas nas vias de chegada, que são mensuradas pelos sensores nelas instalados. Seja $G(V, E)$ um grafo que modela uma interseção qualquer e $D = \{d_1, d_2, \dots, d_n\}$ as demandas dos respectivos vértices em V . A reversibilidade r_i do vértice $v_i \in V$ é dada por:

$$r_i = \frac{mmc(D)}{d_i}. \quad (2.2)$$

Quando o controlador SMER começa a operar, é atribuído o valor 1 para as reversibilidades de todos os vértices, já que as demandas das vias de chegada ainda não são conhecidas.

As leituras dos dados capturados pelos sensores são realizadas frequentemente e o intervalo de tempo entre estas leituras é definido no momento de implantação do controlador. A partir destes dados, a demanda de cada fluxo é propagada para todos os outros vértices do multigrafo, permitindo que cada um deles possa, progressivamente, mudar sua reversibilidade. Isso permite que o multigrafo SMER se mantenha continuamente de acordo com as condições de tráfego da interseção que o mesmo modela.

Até aqui foram apresentados os conceitos de maior relevância para o entendimento da operação de um controlador SMER no contexto deste trabalho. Alguns outros conceitos também relevantes sobre o algoritmo SMER, entre eles o tratamento de *deadlocks* e a geração de estados iniciais podem ser vistos em Barbosa, Benevides, Franca, et al. [15].

2.4 Coordenação de Sinais

No tráfego cotidiano, pode-se observar com certa frequência um fenômeno que ocorre quando veículos parados em um sinal vermelho observam à sua frente um ou mais semáforos operando no intervalo verde mesmo quando não há nenhum veículo disponível para aproveitá-los. Este é um cenário no qual a sequência de semáforos da via em questão não está operando de forma coordenada, acarretando no mal aproveitamento da capacidade de escoamento da via.

Segundo Roess, Prassas, e McShane [13], um pelotão de veículos formado em um semáforo vermelho, ao ser liberado, geralmente mantém a sua formação por mais de 300 metros. Portanto, vale a pena garantir que semáforos que estão separados por distâncias não tão longas (até 1,6 quilômetro) sejam coordenados de modo a permitir que o pelotão possa atravessar a sequência de interseções sem sofrer interrupções e sem se dissolver.

2.4.1 Coordenador SMER

De forma análoga ao controlador SMER apresentado na seção 2.3.1, o coordenador SMER utiliza a abstração de processos e recursos para modelar corredores que se cruzam. Um corredor é um conjunto de segmentos de via sequenciais e conectados por interseções sinalizadas que permite o deslocamento de um fluxo de veículos entre dois pontos do cenário. Idealmente, os semáforos pertencentes a um corredor devem operar de forma coordenada, para que os veículos possam se deslocar sem que haja interrupções.

As interseções sinalizadas em um coordenador SMER são representadas por recursos e os fluxos pertencentes a cada corredor são os processos que compartilham estas interseções. A figura 2.8 ilustra esta abstração.

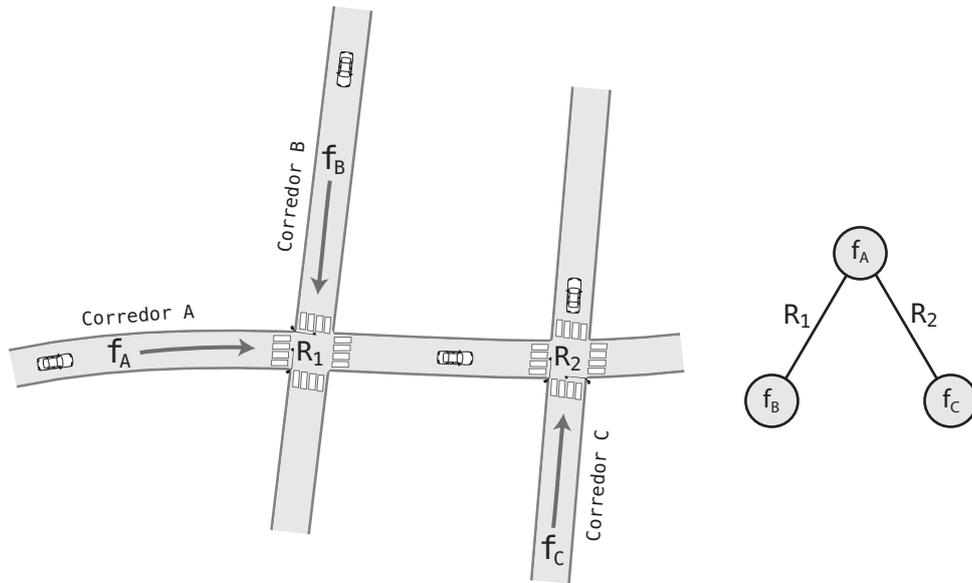


Figura 2.8: Interseções representadas como recursos e corredores representados como processos que as compartilham [1].

Quando o fluxo de um corredor tem o direito de passagem concedido, o processo que o representa se encontra de posse dos recursos de todas as interseções que compõem este corredor. Entretanto, a passagem por estas interseções ocorrerá de forma sequencial, tornando desnecessária a posse do direito de passagem em todas elas durante todo o intervalo de tempo no qual o pelotão do corredor se desloca. Portanto, as fases dos semáforos deste corredor devem ser configuradas para serem iniciadas com uma defasagem de tempo que coincida com a chegada de um pelotão, que cruzará uma interseção após a outra.

Este coordenador, cuja operação é regida por um multigrafo SMER, oferece a vantagem de adaptar os tempos de verde dos semáforos pertencentes aos corredores em função das suas demandas, de maneira análoga à que ocorre com o controlador SMER. Maiores detalhes a respeito do funcionamento do coordenador SMER podem ser verificados na referência [1].

2.5 Modelos de Consumo de Combustível e Emissão de Gases

À medida em que a quantidade de pessoas conduzindo veículos cresce, a alta saturação das rodovias torna mais comum os casos de congestionamento no sistema rodoviário. O alto nível de consumo de combustível, além de acarretar prejuízos econômicos, provoca efeitos indesejáveis de alto impacto ecológico, como por exemplo, o aumento nas taxas de emissão de gases poluentes [16].

São muitas as variáveis que influenciam os níveis de consumo de combustível e

emissão de gases de um veículo. Estas variáveis podem estar relacionadas [17]:

- **à viagem:** se enquadram neste conjunto os fatores que envolvem as distâncias percorridas e a quantidade de viagens realizadas em um período de tempo analisado;
- **ao clima:** temperatura, umidade, efeitos do vento e outros fenômenos naturais podem ser considerados;
- **ao veículo:** propriedades intrínsecas ao veículo, entre elas o tamanho do motor e as suas condições, a presença (ou ausência) de um catalisador, o condicionador de ar que pode estar ligado, entre outras;
- **à via:** esta pode ser horizontal ou uma ladeira e pode também apresentar deteriorações no asfalto;
- **ao tráfego:** são as variáveis referentes às interações entre veículos que compartilham a via, como também as interações entre os veículos e os dispositivos de controle de tráfego;
- **ao motorista:** o comportamento do motorista, que pode ser mais sereno ou mais agressivo.

Estas variáveis introduzem certa complexidade no desenvolvimento de modelos matemáticos que têm como finalidade realizar o cálculo dos níveis de consumo de combustível e de emissão de gases. Alguns dos modelos existentes na literatura se baseiam nas resistências aerodinâmica, friccional, de rolamento e de aceleração [16]. Exemplos que se baseiam em alguns desses parâmetros são os modelos propostos por Post, Kent, Tomlin, e Carruthers [18] e por Biggs et al. [19].

2.5.1 Avaliação Empírica dos Níveis de Consumo de Combustível

A fim de se construir uma base de dados sobre o perfil de consumo de combustível e emissão de gases de veículos, West, McGill, Hodgson, Sluder, e Smith [20] coletou dados reais no Laboratório Nacional de Oak Ridge (ORNL). Estas informações foram armazenadas nesta base juntamente com suas respectivas velocidades e acelerações instantâneas. As medições de consumo e emissão foram realizadas com o uso de um dinamômetro de chassi, dispositivo utilizado para monitorar a eficiência energética de um veículo, como também outras medidas relacionadas.

Esses experimentos realizados no ORNL utilizaram oito veículos distintos, sendo que cinco deles eram veículos de passeio e os demais eram caminhões de pequeno

porte. A partir dos valores médios coletados para esses veículos, estimou-se um veículo genérico. Os gases levados em consideração nesta coleta foram: hidrocarboneto (HC), óxidos de nitrogênio (NO_x) e monóxido de carbono (CO) [20].

O conjunto de dados coletados contém mais de 1300 amostras, com acelerações que variam entre $-1,5$ a $3,7 \text{ m/s}^2$ em intervalos de $0,3$. As velocidades se distribuem entre 0 e $33,5 \text{ m/s}$ ($120,6 \text{ km/h}$) em intervalos de $0,3$.

2.5.2 VT-Micro

Para estimar os níveis de consumo de combustível e emissão de gases, AHN propôs o VT-Micro [21], composto por modelos que se baseiam essencialmente na velocidade e aceleração instantâneas do veículo. Um diferencial destes modelos em relação a outros já propostos anteriormente são as suas capacidades de considerar a heterogeneidade das particularidades da via, do tráfego e do motorista.

Os modelos do VT-Micro se baseiam em regressão, um instrumento estatístico que permite estimar funções a partir de conjuntos de amostras. Os dados coletados por West, McGill, Hodgson, Sluder, e Smith [20] foram utilizados para desenvolver estes modelos.

Para medir o ajustamento de uma função estimada com regressão em relação aos dados da amostra, utiliza-se o *coeficiente de determinação*, também conhecido como R^2 . O valor deste coeficiente varia entre 0 e 1 e indica o quanto a função estimada consegue explicar os valores observados. Quanto maior o valor de R^2 , maior é a fidelidade da função estimada em relação à amostra.

	Combustível	HC	CO	NO_x
Primeiro modelo	0,870	0,319	0,870	0,667
Segundo modelo	0,996	0,716	0,748	0,805
Terceiro modelo	0,998	0,974	0,918	0,982

Tabela 2.1: Coeficientes de determinação (R^2) para os modelos de regressão que estimam os níveis para cada medida.

A equação 2.3 descreve o primeiro modelo proposto, o qual, conforme a tabela 2.1, consegue representar com uma boa precisão (R^2 acima de $0,7$ para duas das três medidas) os dados coletados no ORNL. Entretanto, quando o veículo trafega com baixos níveis de aceleração e velocidade, o modelo se mostra menos preciso.

$$MOE_e = \sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^3 (K_{i,j}^e \times s^i \times a^j) \quad (2.3)$$

onde:

- MOE_e = nível de consumo de combustível ou emissão de gás (L/s ou mg/s);
- K^e = coeficientes do modelo de regressão e (listados na tabela 2.2);
- s = velocidade (km/h);
- a = aceleração (m/s^2).

	Combustível	CO	HC	NO_x
K_{00}	-0,679439	0,887447	-0,728042	-1,067682
K_{01}	0,135273	0,148841	0,012211	0,254363
K_{02}	0,015946	0,03055	0,023371	0,008866
K_{03}	-0,001189	-0,001348	-0,000093243	-0,000951
K_{10}	0,029665	0,070994	0,02495	0,046423
K_{11}	0,004808	0,00387	0,010145	0,015482
K_{12}	0,000083329	-0,000926	-0,000549	0,002876
K_{13}	-0,000061321	0,000046144	-0,000113	-0,000321
K_{20}	-0,000276	-0,000786	-0,000205	-0,000173
K_{21}	-0,000020535	0,000093228	-0,000103	-0,000131
K_{22}	0,000000937	0,000049181	0,000037592	-0,00005866
K_{23}	0,000000304	-0,00000141	0,00000331	0,000001943
K_{30}	0,000001487	0,000004616	0,000001949	0,000000569
K_{31}	0,0000000554	-0,000000706	0,000000618	0,000000328
K_{32}	-0,0000000248	-0,000000314	-0,000000213	0,000000024
K_{33}	-0,00000000447	0,00000000817	-0,0000000174	-0,0000000126

Tabela 2.2: Coeficientes produzidos a partir dos dados coletados por West, McGill, Hodgson, Sluder, e Smith [20] no ORNL. Dados retirados de Ahn [21].

Para algumas amostras de velocidade e aceleração, este modelo produziu valores negativos. Para contornar o problema, as amostras foram transformadas utilizando logaritmo natural e então os modelos de regressão foram reajustados para se adequar a estas transformações. Em seguida, os valores estimados foram submetidos à função exponencial. O modelo resultante dessas transformações é apresentado na equação 2.4.

$$MOE_e = exp \left(\sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^3 (K_{i,j}^e \times s^i \times a^j) \right) \quad (2.4)$$

Os modelos de regressão de Ahn [21] conseguem estimar os níveis de consumo de combustível e emissão de gases coletados empiricamente no ORNL com alta fidelidade. Entre as suas vantagens, é importante ressaltar que estes modelos podem ser facilmente implementados em um microssimulador de tráfego, especialmente por

conta da simplicidade dos seus parâmetros e pelo baixo custo computacional que lhes é inerente.

2.6 Simulação de Tráfego

Simuladores de tráfego são ferramentas que permitem a realização de experimentos que reproduzem a maneira em que o tráfego de veículos se comporta durante várias horas ou dias. A seguir, serão explicados alguns tipos de modelos que estabelecem, por exemplo, a maneira em que os estados de uma simulação progridem em função do tempo e o nível de granularidade da simulação. Os conceitos aqui apresentados foram extraídos do *Highway Capacity Manual* [22].

2.6.1 Modelos Determinísticos e Estocásticos

No contexto da simulação de tráfego, existem os modelos determinísticos e os modelos estocásticos. Nos modelos determinísticos, não há quaisquer ingredientes aleatórios no processo de simulação. Desta forma, o conjunto de dados de saída de uma simulação será sempre o mesmo para aquele conjunto de parâmetros fornecidos como entrada. Em contraponto, os modelos estocásticos utilizam variáveis aleatórias para introduzir na simulação atributos que são pouco conhecidos.

2.6.2 Modelos Baseados em Eventos e no Tempo

Os modelos de simulação baseados em eventos são aqueles nos quais o tempo avança em função de eventos à medida em que eles ocorrem no sistema. Instantes definidos em intervalos de tempo compreendidos entre dois eventos são ignorados, visto que estes não acarretam mudanças nos dados de saída. Nos modelos baseados no tempo, a simulação progride à medida em que o tempo incrementa em intervalos que, na maioria das vezes, são constantes, reproduzindo assim as mudanças de estado do sistema.

2.6.3 Modelos Microscópicos, Macroscópicos e Mesoscópicos

Os modelos microscópicos são aqueles que simulam o comportamento e as propriedades de cada veículo de forma análoga à mecânica das partículas em um fluido. A velocidade, posição, aceleração, frenagem e outros atributos são calculados para cada veículo, de modo a representar com fidelidade a forma com que eles interagem entre si. Entretanto, a execução dos modelos microscópicos em geral demandam um maior poder computacional por conta da granularidade dos elementos envolvidos.

Os modelos macroscópicos, por outro lado, se propõem a simular o tráfego de forma mais generalizada, utilizando as taxas de fluxo e outras propriedades mais abstratas como objetos da simulação. Há também os modelos mesoscópicos, que se posicionam entre os modelos microscópicos e macroscópicos, cujos elementos atômicos são os pelotões de veículos.

2.6.4 Modelos de Perseguição Veicular

Há mais de cinquenta anos, pesquisadores estudam a dinâmica do tráfego de veículos a partir de modelos microscópicos contínuos no tempo, conhecidos como Modelos de Perseguição Veicular. “A perseguição veicular propriamente dita constitui um dos principais processos em todos os modelos microscópicos de simulação, bem como na teoria do fluxo de tráfego moderna, a qual se esforça para compreender as relações entre o motorista individual e o comportamento global em uma escala macroscópica” Brackstone e McDonald [23, p.182].

Intelligent Driver Model (IDM)

O IDM é um modelo de perseguição veicular proposto por Treiber, Hennecke, e Helbing [7] que tem como uma das suas vantagens a simplicidade dos seus parâmetros, o que o torna bastante adequado para uso em microssimuladores de tráfego. Este modelo também garante que acidentes não ocorrerão, visto que a velocidade e a aceleração do veículo são estabelecidas em função do movimento do veículo à frente.

Segundo o IDM, a distância desejada $s^*(v, \Delta v)$ entre um veículo e o veículo à frente é definida por:

$$s^*(v, \Delta v) = s_0 + Tv + \frac{v\Delta v}{2\sqrt{ab}}, \quad (2.5)$$

onde:

- $s_0 = headway$ espacial mínimo em relação ao veículo à frente;
- $T = headway$ temporal mínimo em relação ao veículo à frente;
- $v =$ velocidade instantânea do veículo;
- $\Delta v =$ diferença de velocidade em relação ao veículo à frente;
- $a =$ aceleração usual do veículo;
- $b =$ taxa de desaceleração desejada.

A tendência de acelerar a_f em uma via livre é definida por:

$$a_f = a \left[1 - \left(\frac{v}{v_0} \right)^\delta \right] \quad (2.6)$$

onde:

- v_0 = velocidade desejada pelo veículo;
- δ = expoente da aceleração que determina o seu crescimento em função à medida que se aproxima do veículo à frente.

A tendência a frear $-b_{int}(s, v, \Delta v)$ acarretada pela presença de um veículo à frente é definida por:

$$-b_{int}(s, v, \Delta v) = -a \left(\frac{s^*(v, \Delta v)}{s} \right)^2 \quad (2.7)$$

O IDM define a aceleração do veículo a partir da interpolação das equações de aceleração e frenagem anteriormente descritas, que pode ser calculada a partir da equação 2.8.

$$\dot{v} = a \left[1 - \left(\frac{v}{v_0} \right)^\delta - \left(\frac{s^*(v, \Delta v)}{s} \right)^2 \right] \quad (2.8)$$

Capítulo 3

MicroLAM

O MicroLAM é um simulador microscópico de tráfego desenvolvido por de Paiva [1] como contribuição para a sua dissertação de mestrado. Este simulador tem como objetivo observar a dinâmica do tráfego como um todo a partir do comportamento individual de cada veículo. O que motivou a criação do MicroLAM foi a escassez de simuladores voltados para o desenvolvimento de trabalhos científicos na área de engenharia de tráfego, visto que boa parte dos simuladores já existentes eram voltados para assistir os engenheiros de tráfego no trabalho de planejamento urbano. Assim sendo, se fez necessário o desenvolvimento de uma ferramenta que fosse facilmente extensível, de modo a permitir que pesquisadores pudessem programar novos módulos e realizar experimentos acadêmicos na área de engenharia de tráfego.

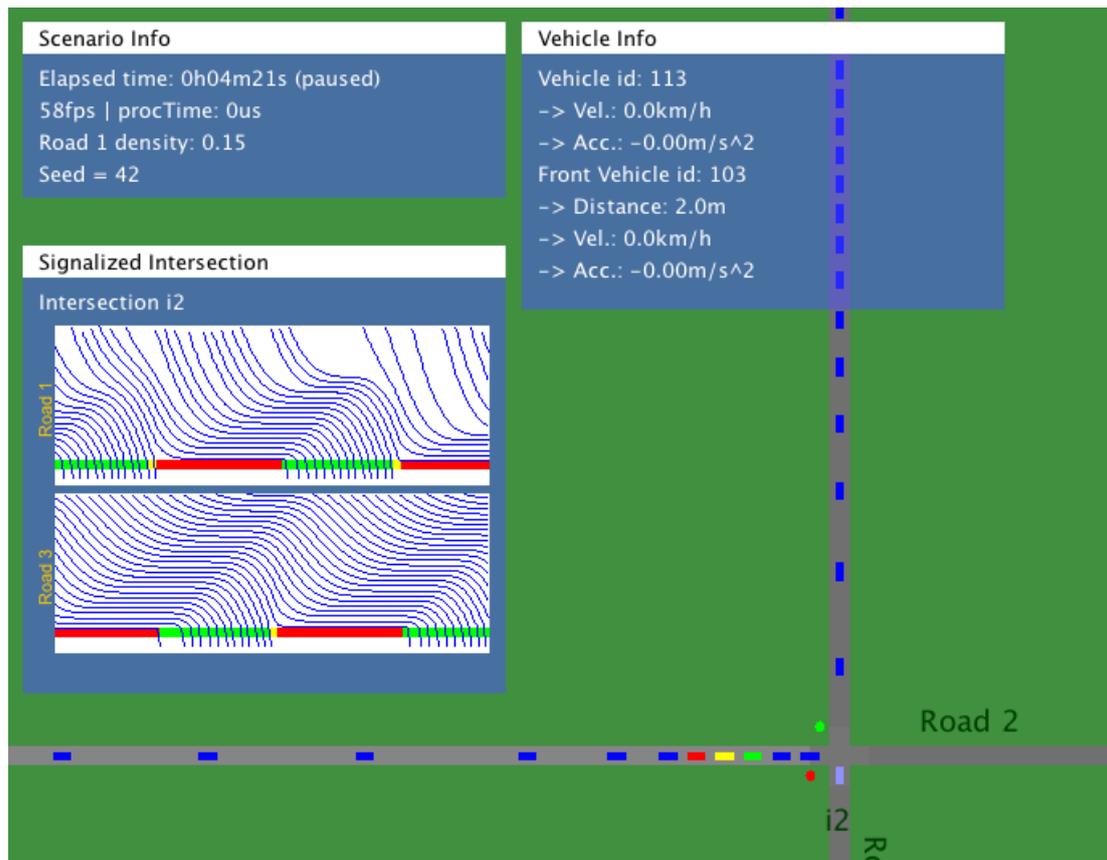


Figura 3.1: Interface gráfica do MicroLAM [1, p.30].

Para a implementação do MicroLAM, foi utilizada a linguagem *Java*, o que tornou possível que o mesmo fosse compatível com múltiplas plataformas. Além disso, o MicroLAM pode ser executado como um *Applet*, possibilitando que ele seja embarcado em uma página na *web*.

No MicroLAM existem dois modos de simulação. O primeiro deles apresenta em um painel uma interface gráfica utilizada para demonstrar a movimentação microscópica dos veículos sobre as vias à medida em que os semáforos alternam seus estados. No segundo modo de simulação, nenhuma interface gráfica é apresentada, sendo este mais apropriado para a execução de simulações nas quais as medidas de interesse são conhecidas e estão devidamente instrumentadas.

Os cenários do MicroLAM são definidos em arquivos com o formato XML, uma contribuição realizada pelo autor desta dissertação enquanto de Paiva [1] ainda desenvolvía o seu trabalho. Estes cenários contêm todos os parâmetros de entrada necessários para a execução da simulação, entre eles: o posicionamento das vias e seus respectivos limites de velocidade; os tipos de controlador de sinais; as políticas de geração de veículos que entram no cenário e as temporizações das fases dos semáforos. É importante ressaltar que o funcionamento do MicroLAM é determinístico. Ou seja, para um determinado conjunto de parâmetros de entrada, os mesmos dados serão

produzidos na saída da simulação, independentemente da quantidade de simulações realizadas.

As interseções no MicroLAM podem ou não ser controladas por semáforos. Quando não há um semáforo na interseção, o modelo de motorista de um dado veículo prestes a atravessá-la se encarrega da decisão de quando fazê-lo. Para as interseções sinalizadas, foram desenvolvidos dois controladores de semáforo. O mais simples deles é o de tempo fixo, cujas fases e intervalos são estáticos, especificados no XML para cada interseção como parâmetros de entrada. Foi também desenvolvido um controlador baseado no conceito SMER, o qual se reconfigura dinamicamente em função dos parâmetros de condições do tráfego coletados por sensores instalados nas vias.

Um coordenador de semáforos foi criado e implementado no MicroLAM. Este coordenador se propõe a calcular o menor tempo necessário para que um veículo, trafegando na velocidade máxima da via em que ele se encontra, possa viajar entre dois semáforos consecutivos desta via. Este tempo mínimo de travessia, chamado de *offset*, é calculado para uma série de pares de semáforos consecutivos, de modo a criar uma *onda verde*, ou seja, um corredor de semáforos que atuam em sincronia e que asseguram a passagem de um pelotão de veículos sem que haja uma descontinuação no fluxo. Todavia, as interseções que participam desses corredores precisam ser explicitamente declaradas no arquivo XML fornecido como entrada para a simulação.

O modelo de motorista que foi implementado neste simulador é o IDM. Foi também implementada uma variação do mesmo, na qual uma velocidade alvo para o veículo é estabelecida quando o mesmo se encontra viajando sobre uma onda verde, de maneira a garantir que o veículo não irá se antecipar a ponto de deixar a onda verde para trás e, desta forma, evitando uma parada desnecessária em um semáforo que ainda está no intervalo vermelho.

O MicroLAM também permite a geração de relatórios das simulações nele realizadas. As medidas de interesse que podem ser extraídas são: velocidade, tempo de viagem, tempo de espera, contagem de veículos e *headway* temporal. Para cada uma dessas medidas, estão disponíveis nos relatórios o valor máximo, o valor mínimo, a média e o desvio padrão. Estas medidas são coletadas tanto para o sistema como um todo quanto para cada segmento de via (trecho compreendido entre duas interseções).

3.1 Representação dos Elementos de Tráfego

O MicroLAM recebe como entrada um arquivo de cenário no formato XML. Este arquivo contém todas as informações necessárias para que a simulação possa ser executada, entre elas o posicionamento espacial das vias e interseções.

Conforme ilustrada na figura 3.2, a estrutura de um cenário a ser simulado é representada por um grafo direcionado, no qual os vértices representam as interseções e as arestas representam os segmentos de via. A orientação de uma aresta determina o sentido em que fluem os veículos no seu respectivo segmento de via.

Os cenários do MicroLAM contemplam quatro tipos de interseção:

- **não-sinalizadas:** são interseções entre vias sem qualquer controle de fluxo. A decisão de travessia fica a critério do modelo de motorista. A implementação do IDM no MicroLAM contempla um mecanismo para tratar colisões entre os fluxos concorrentes em interseções não-sinalizadas.
- **sinalizadas:** estas interseções são dotadas de um controlador de fluxos. O MicroLAM oferece três tipos de controladores: de tempo fixo, SMER e SMER com corredores coordenados. A interseção i_4 na figura 3.2 é um exemplo de interseção sinalizada.
- **de entrada:** as interseções de entrada não são interseções reais, porém foram modeladas desta forma para simplificar a abstração do grafo que representa o cenário. O propósito destas interseções é alimentar o sistema com novos veículos. Elas também oferecem o controle de vários aspectos da geração dos mesmos. O intervalo de tempo entre a geração de dois veículos pode ser constante, como também pode seguir uma distribuição exponencial. O fluxo de veículos gerados na interseção de entrada pode ser configurado para variar ao longo da simulação. A partir de uma função senóide, a geração de veículos varia entre dois valores para o fluxo, o que permite modelar momentos de alta e baixa demanda. A figura 3.2 ilustra duas interseções de entrada: i_1 e i_3 .
- **de saída:** assim como as interseções de entrada, também não são interseções reais. As interseções de saída servem apenas para escoar veículos para fora do sistema. A figura 3.2 apresenta i_5 e i_7 como interseções de saída.

De agora em diante, o termo *interseção*, quando não qualificado, será usado apenas para se referir a interseções nas quais dois ou mais fluxos conflitantes se encontram, ou seja, interseções não-sinalizadas e sinalizadas.

As vias adjacentes a uma interseção podem ser qualificadas como vias de entrada ou vias de saída. Uma via de entrada é aquela que escoar na direção da interseção o fluxo de veículos que por ela trafegam. Uma via de saída, por sua vez, sucede a interseção e recebe os veículos que acabaram de atravessá-la. Vale ressaltar que estes conceitos são relativos e têm como referência uma dada interseção. Ao tomar, por exemplo, a interseção i_4 como referência na figura 3.2, é possível observar que as vias *Road 1* e *Road 3* são vias de entrada e as vias *Road 2* e *Road 4* são vias de saída.

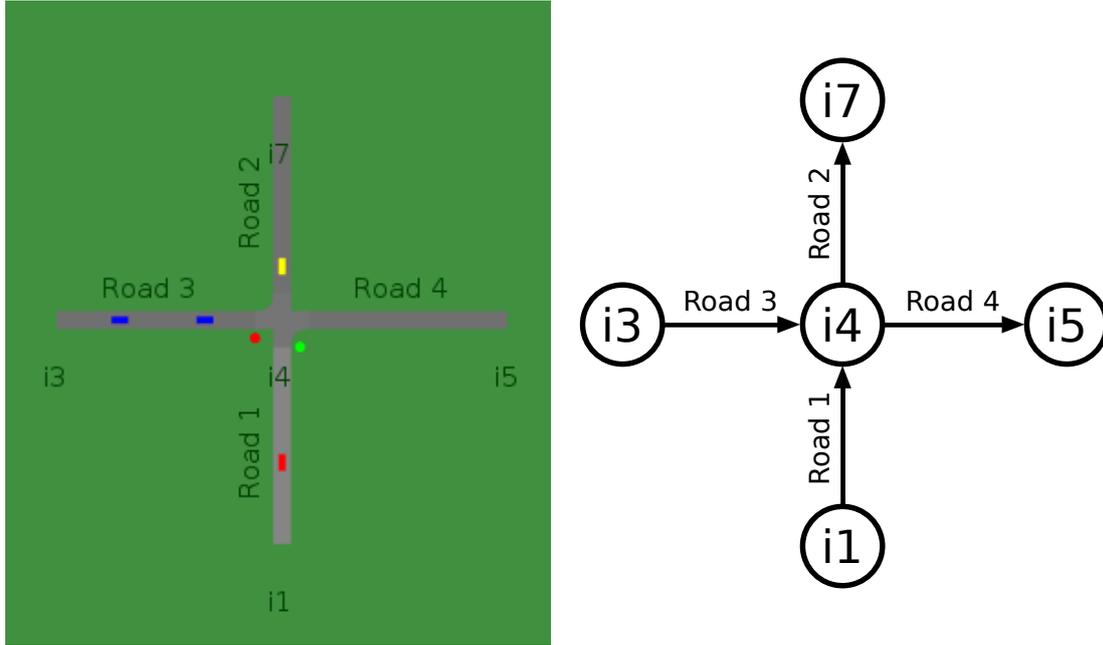


Figura 3.2: Representação em grafo de um cenário do MicroLAM.

Uma interseção pode ter m vias de entrada e n vias de saída. No entanto, pode ser necessário garantir que apenas um subconjunto das vias de saída esteja disponível para os veículos que chegam a partir de uma via de entrada específica. Isso se mostra essencial na modelagem de algumas interseções, especialmente daquelas controladas por um semáforo. O MicroLAM permite que sejam configurados os movimentos permitidos para cada fase de uma interseção sinalizada. Um movimento permitido nada mais é do que um par de vias adjacentes à interseção, sendo a primeira delas uma via de entrada e a outra, necessariamente, uma via de saída.

3.2 Roteamento de Veículos

No momento em que um veículo é gerado e adicionado ao cenário por meio de uma interseção de entrada, uma rota é planejada para ele. Quando implementado, o MicroLAM tinha como principal propósito a simulação, avaliação e comparação de desempenho entre controladores de semáforos submetidos a diversas oscilações nas condições de tráfego. Nessas circunstâncias, as interseções de origem e destino de um veículo qualquer, bem como todas as outras interseções da sua rota, não desempenhavam um papel importante no contexto do estudo do controle de semáforos.

O MicroLAM suporta apenas rotas geradas de forma aleatória. Essas rotas são geradas da seguinte forma: um veículo, ao ser introduzido no cenário, irá inevitavelmente ao encontro da sua primeira interseção, que será obrigatoriamente sinalizada ou não-sinalizada. O veículo decidirá de forma probabilística qual será a via de saída pela qual irá deixar a interseção. É possível configurar no cenário do MicroLAM a

probabilidade de cada movimento permitido ser escolhido por um veículo que chega na interseção.

Capítulo 4

Roteamento Ecológico Orientado a Ondas Verdes

O algoritmo de roteamento inteligente proposto neste trabalho foi implementado e avaliado com o uso do MicroLAM. Este microssimulador foi escolhido especialmente pela sua fácil extensibilidade, como também por já ter disponíveis os controladores de semáforo de tempo fixo e inteligentes, sendo estes últimos operados com o uso de SMER.

Entretanto, foram necessários vários ajustes no MicroLAM como um todo, entre eles a construção de ferramentas de suporte à configuração de cenários, melhorias no desempenho para aumentar a velocidade das simulações, como também as demais extensões necessárias para o desenvolvimento do roteamento orientado a ondas verdes.

4.1 Gerador de Redes Fechadas

Para o desenvolvimento do algoritmo de roteamento orientado a ondas verdes, havia a necessidade de executar simulações em cenários que admitissem diversas rotas para um mesmo par de pontos. Desta forma, as redes fechadas com vias alternadas se mostrou apropriada, pois atendiam a esta necessidade.

Um cenário do tipo rede fechada de dimensões $m \times n$ é aquele formado por um conjunto de m vias paralelas sobreposto por um segundo conjunto de n vias também paralelas, de forma que todas as vias do primeiro conjunto sejam perpendiculares às vias do segundo conjunto.

Quando uma rede fechada é composta por vias com sentidos alternados (conforme ilustrada na figura 4.1), é possível visualizar que existem diversos caminhos possíveis entre um par de pontos de entrada e saída quaisquer. Neste tipo de cenário, a quantidade de vias de entrada e saída é dada por $m + n$, enquanto a quantidade de

interseções sinalizadas e não-sinalizadas é dada por $m \cdot n$. Desta forma, a quantidade de rotas existentes entre um par de pontos aumenta em função das dimensões da grade.

A construção de cenários grandes no MicroLAM ainda é uma tarefa trabalhosa e demorada, pois os arquivos XML precisam ser criados manualmente, já que ainda não há um recurso que automatize este processo. Para minimizar este problema, foi desenvolvida para o MicroLAM uma ferramenta que permite gerar redes fechadas quadradas com vias alternadas e de tamanho parametrizável.

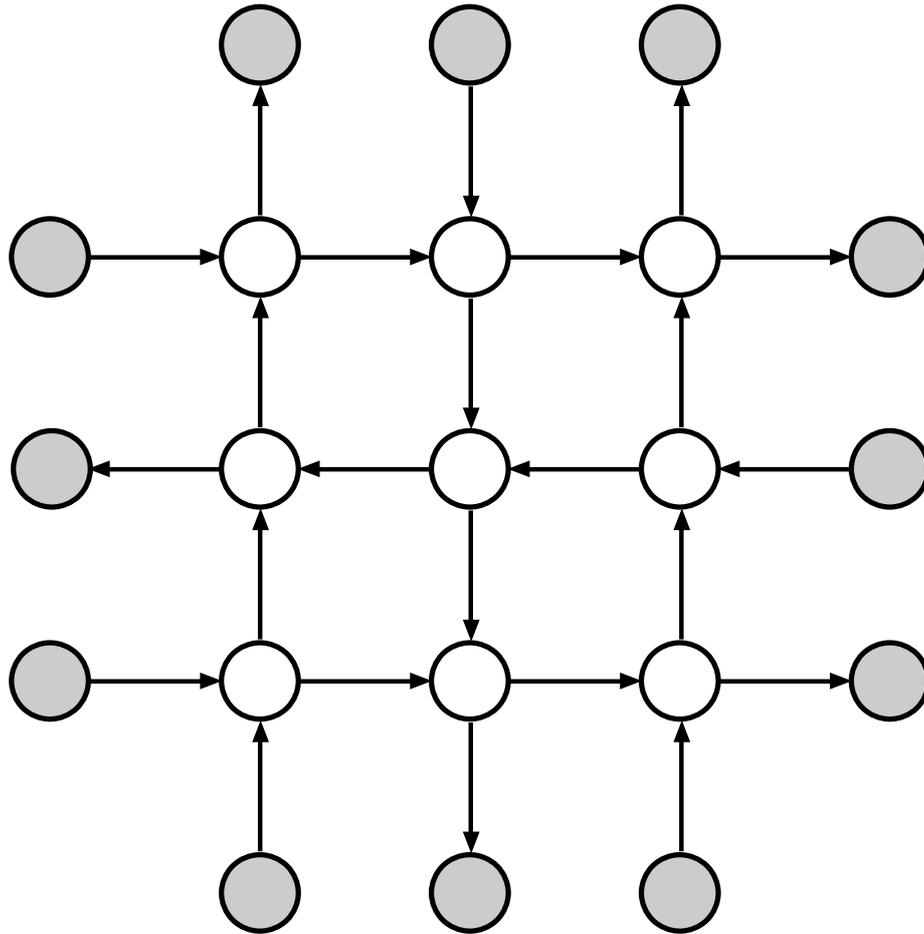


Figura 4.1: Rede fechada de tamanho 3×3 com vias em sentidos alternados. As interseções de entrada e de saída estão destacadas na cor cinza.

4.2 Exibição das rotas

Para um melhor entendimento de como as rotas dos veículos no MicroLAM são criadas, foi necessário primeiramente desenhá-las na tela. Conforme pode ser visto na figura 4.2, pequenas setas roxas sobre as vias indicam todo o trajeto a ser percorrido pelo veículo selecionado (representado na cor amarela), partindo da interseção de entrada $i15$, pela qual ele foi introduzido no sistema e encerrando na via de saída $i2$,

pela qual ele irá deixá-lo. É possível observar que a rota aleatória implementada no MicroLAM permite a formação de laços no cenário, também visível na figura 4.2.

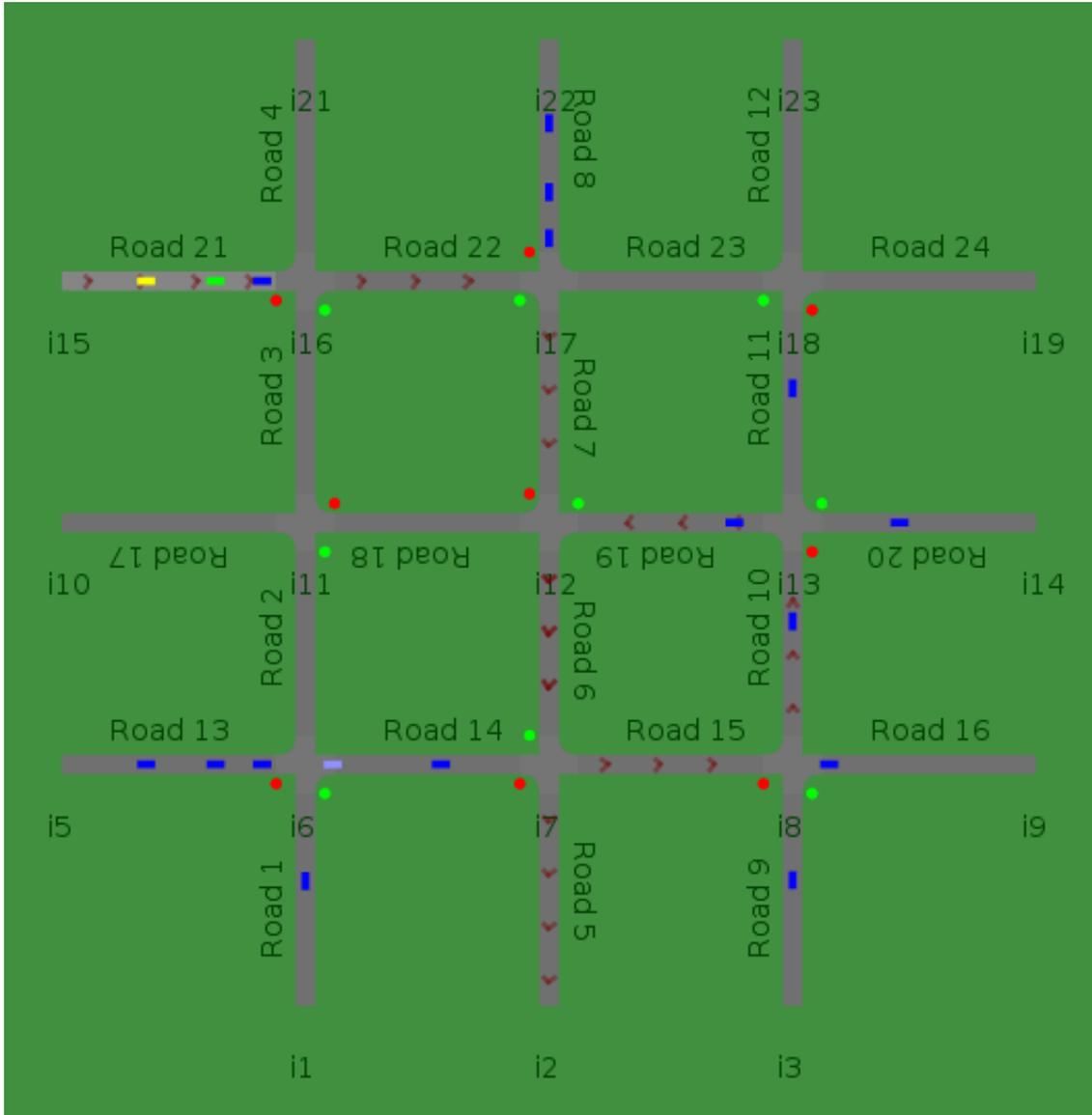


Figura 4.2: Pequenas setas sobre as vias de uma rede fechada indicando a rota do veículo selecionado, que foi gerada aleatoriamente.

4.3 Rota Espacialmente Mais Curta

As rotas aleatórias implementadas no MicroLAM não representam a dinâmica de movimentação urbana do mundo real, na qual as pessoas que conduzem seus veículos têm pontos de destino específicos e estão interessadas em chegar até eles de forma objetiva, preferencialmente percorrendo rotas curtas e concluindo as viagens no tempo mais breve possível. Conforme apresentado na seção 3.2, as rotas aleatórias foram criadas com o propósito de avaliar o desempenho de controladores de semáforos.

Sendo assim, as particularidades das viagens individuais de cada veículo não eram relevantes.

Para colaborar na validação da solução de roteamento proposta neste trabalho, foi implementada a rota espacialmente mais curta. Quando um veículo é introduzido no sistema, é sorteada uniformemente uma interseção de saída qualquer, que servirá como ponto de destino para este veículo. O algoritmo de caminho mais curto de Dijkstra [9] é então utilizado para estabelecer a rota entre a interseção de entrada e a interseção de saída. As arestas são ponderadas pelo comprimento dos seus respectivos segmentos de via.

A rota espacialmente mais curta previne que os veículos sejam mantidos no cenário indefinidamente, viajando em ciclos e colaborando para o surgimento de congestionamentos. Na rota aleatória, a probabilidade do surgimento de ciclos é ainda maior em cenários do tipo rede fechada, especialmente naqueles de maior tamanho, conforme descrito na seção 4.1. A rota espacialmente mais curta, em contraponto à rota aleatória, não admite o surgimento de ciclos.

4.4 Rota Temporalmente Mais Curta

A rota espacialmente mais curta, apresentada na seção 4.3, não é necessariamente a melhor escolha para veículos que querem realizar a viagem no menor tempo possível. Uma pequena otimização que pode trazer ganhos expressivos no tempo de viagem é a inclusão de vias de maior velocidade no planejamento da rota.

A rota temporalmente mais curta também foi implementada no MicroLAM e é também construída com o algoritmo de *Dijkstra*. No entanto, as arestas não são ponderadas pelos comprimentos dos seus respectivos segmentos de via, como ocorre na rota espacialmente mais curta. Seja l_r o comprimento de um segmento de via r e v_r^{max} o seu limite de velocidade. O peso w atribuído à sua aresta é dado por:

$$w = \frac{l_r}{v_r^{max}}. \quad (4.1)$$

Este valor nada mais é do que tempo necessário para que um veículo a atravesse por completo ao viajar na velocidade máxima permitida pela via.

4.5 IDM e Desaceleração nas Curvas

Conforme apresentado na subseção 2.6.4, uma das principais vantagens do IDM é a sua simplicidade. Portanto, a sua taxa de frenagem é meramente baseada nos parâmetros do veículo à frente, o qual costuma ser o principal agente que influencia

os parâmetros do veículo em questão. No entanto, outros fatores que podem ser relevantes em alguns aspectos, como por exemplo, as características urbanas inerentes ao cenário, não são levados em consideração.

A existência de uma curva na trajetória de um veículo nada interfere no seu comportamento. A velocidade e a aceleração do mesmo não são reajustadas para que a curva seja realizada de maneira suave e imune aos problemas existentes no mundo real, entre eles o risco de sobresterço¹ e de capotamento.

O *Traffic Engineering Handbook* [24] estabelece uma equação para definir a velocidade ideal para um veículo realizar uma curva.

$$\frac{V^2}{127R} = f + 0,01e, \quad (4.2)$$

onde:

- V = velocidade ideal (km/h);
- R = raio da curva (m);
- f = fator de atrito lateral;
- e = percentual de superelevação da via.

Logo, para oferecer um maior nível de realismo na maneira em que as curvas são realizadas pelo IDM, foi implementado no MicroLAM o modelo descrito na equação 4.2.

4.6 Níveis de consumo e emissão de gases

Para discutir e avaliar a eficiência de um veículo do ponto de vista ecológico, no qual os níveis de consumo de combustível e de emissão de gases são as medidas de interesse em questão, foi necessário integrar o VT-Micro ao MicroLAM. O VT-Micro é descrito com maiores detalhes na subseção 2.5.2.

¹É chamado de sobresterço o efeito causado pela força centrífuga em uma curva, no qual as rodas traseiras do veículo deslisam lateralmente, acarretando uma eventual perda de controle.

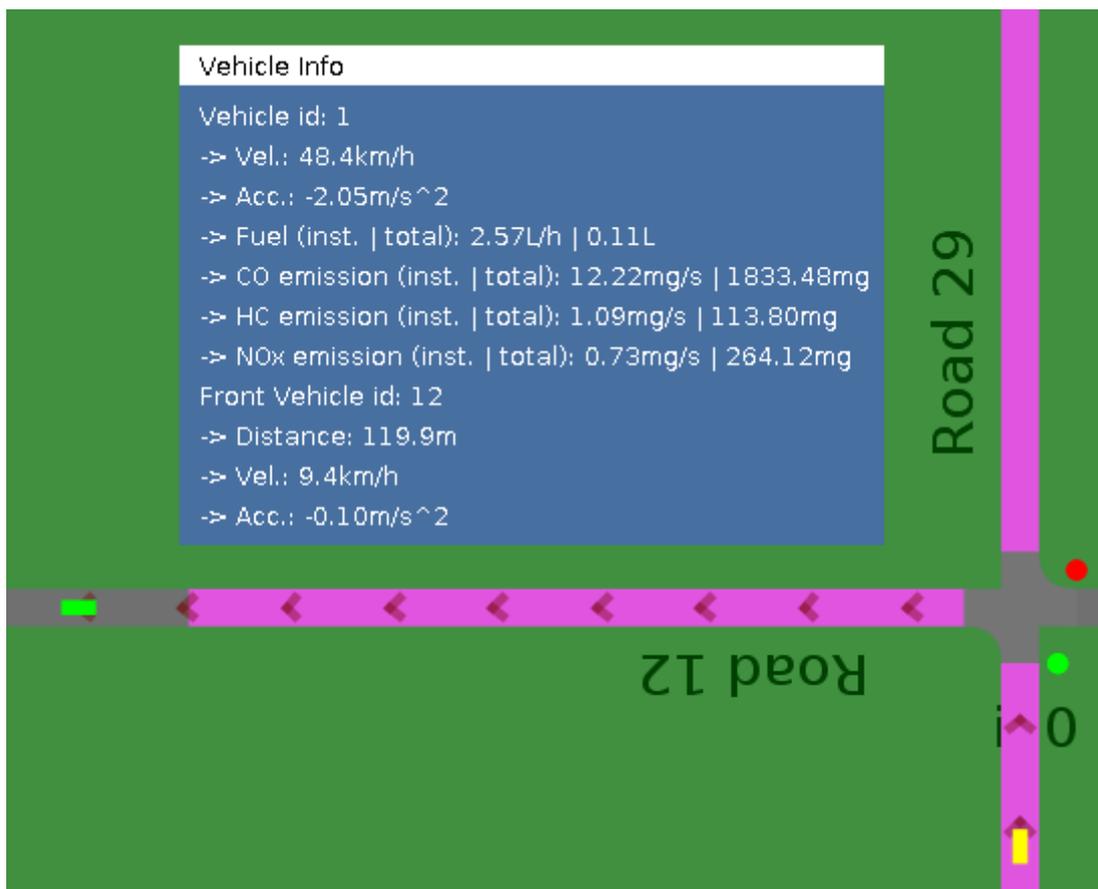


Figura 4.3: Painel exibindo níveis instantâneos de consumo de combustível e emissão de gases do veículo selecionado (em amarelo).

O MicroLAM, por ser um microsimulador baseado no tempo, executa, a cada segundo, uma quantidade de passos constante, que pode ser configurada. As simulações realizadas neste trabalho foram executadas com uma taxa de 60 passos por segundo, o que corresponde a uma duração aproximada de 16,7 *ms* para cada passo.

O VT-Micro fornece valores de saída instantâneos a partir da velocidade e aceleração instantâneas. A cada passo da simulação, calcula-se para cada veículo do cenário o seu nível instantâneo de consumo de combustível, como também de emissão de CO, HC e NO_x.

Seja s a quantidade de passos da simulação, t a duração de cada passo e MOE_i o nível de consumo ou emissão no passo $i \leq s$. O valor acumulado MOE_{acum} ao final da simulação é dado por:

$$MOE_{acum} = \sum_{i=1}^s MOE_i \times t \quad (4.3)$$

Conforme descritos na subseção 2.5.1, os modelos de regressão do VT-Micro foram baseados em um conjunto de amostras de aceleração e velocidade, cujos valores para a aceleração estão compreendidos no intervalo entre -1,5 e 3,7 m/s^2 . O IDM pode, em algumas circunstâncias, apresentar acelerações abaixo deste intervalo, já que o mesmo admite taxas de frenagem infinitas. Nos passos da simulação em que isso ocorre, o valor da aceleração instantânea do veículo não é contabilizado no cálculo dos níveis acumulados de consumo de combustível e emissão de gases.

Uma outra imperfeição do IDM se manifesta nos momentos em que o veículo trafega no limite da velocidade da via, em que é possível observar a nível microscópico grandes oscilações na sua aceleração. Contudo, estas oscilações se compensam de forma a manter a velocidade do veículo constante. Apesar disso, este fenômeno compromete a medição dos níveis acumulados de consumo de combustível e emissão de gases, calculados com a equação 4.3. Em situações realistas, a aceleração de um veículo que trafega em velocidade quase constante se mantém em torno de 0 m/s^2 .

A solução utilizada para contornar este problema foi a implementação da filtragem por média móvel nos valores da velocidade e aceleração instantâneas. O tamanho da janela utilizada é de 60 passos, o que corresponde a um segundo de simulação. A figura 4.4 mostra a curva de aceleração instantânea de um veículo que viaja a aproximadamente 60 *km/h*. A curva filtrada com média móvel também é apresentada para efeitos de comparação. É possível observar que a implementação da média móvel apresentou um resultado positivo, pois garantiu que a aceleração do veículo se mantém próxima ao valor de 0 m/s^2 .

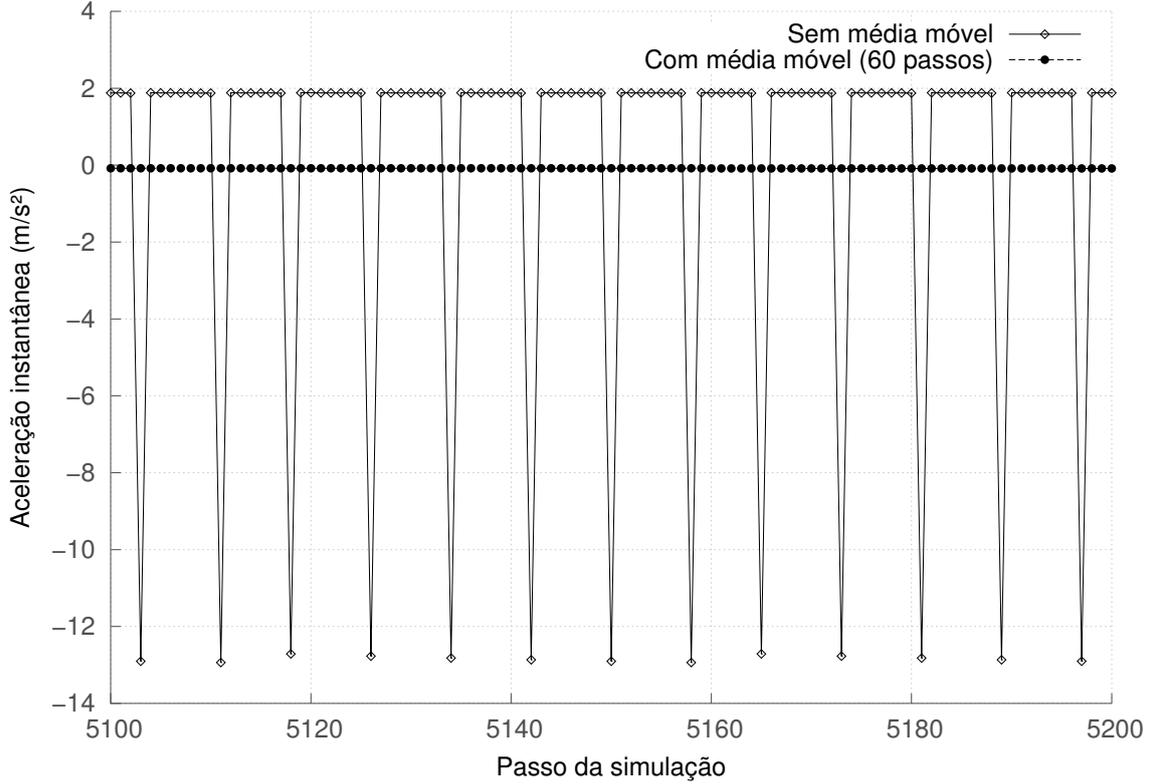


Figura 4.4: Comparação das curvas de aceleração instantânea do IDM.

Com o uso da média móvel, deixa de ser necessário o cálculo dos níveis de consumo e de emissão de gases a cada passo da simulação, pois os valores para a velocidade e para a aceleração instantâneas serão idênticos em intervalos de 60 passos. Para tornar o cálculo mais simples e a simulação computacionalmente menos custosa, o valor acumulado é calculado uma vez a cada segundo, de acordo com a equação 4.4.

$$MOE_{acum} = \sum_{i=1}^s MOE_i \times 60t. \quad (4.4)$$

4.7 Roteamento Inteligente

A seguir, serão apresentados os detalhes da concepção do algoritmo de roteamento orientado a ondas verdes. Primeiramente, é apresentada uma abordagem orientada aos tempos dos semáforos para ponderar as arestas ao traçar as rotas. Em seguida, é descrita uma estratégia cooperativa para evitar segmentos de via de maior demanda. A seção é então finalizada com um método para contornar possíveis atrasos que surjam ao longo da viagem.

4.7.1 Predição de Fases dos Semáforos

A rota de um veículo pode também tirar vantagem da maneira em que os tempos das fases dos semáforos do sistema estão ajustados. Quando um veículo viaja por uma sequência de segmentos de via cujos semáforos operam em sincronia, uma série de benefícios são obtidos. O tempo de viagem fica mais curto, as paradas se tornam menos frequentes, as formações de filas em sinais vermelhos diminuem, os níveis de consumo e de emissão de gases são reduzidos e o condutor dirige com mais conforto.

Semáforos de Tempo Fixo

Em um ambiente no qual todos os semáforos do sistema são de tempo fixo e as suas temporizações são conhecidas pelos veículos, é possível planejar rotas de modo a evitar a passagem pelas vias cujos sinais estarão vermelhos. Um veículo, ao entrar no cenário pela interseção de entrada i_0 , tem meios de avaliar quanto tempo, no melhor caso, é necessário para chegar à primeira interseção à sua frente, i_1 . A partir do comprimento l_r do segmento de via r_0 que liga i_0 a i_1 e do limite de velocidade de r_0 dado por $v_{r_0}^{max}$, é possível calcular o tempo mínimo necessário $t_{r_0}^{min}$, nas circunstâncias mais otimistas, para chegar até i_1 , conforme descrito na seção 4.1.

Se por ventura o semáforo da interseção i_1 estiver verde no instante $t_{r_0}^{min}$, o condutor do veículo pode se esforçar para mantê-lo em movimento na velocidade $v_{r_0}^{max}$. Se não houver intercorrências nas condições de tráfego durante este pequeno trajeto, o veículo alcançará a interseção i_1 em tempo hábil de atravessá-la sem a necessidade de ficar retido no sinal vermelho.

Caso o semáforo de i_1 esteja vermelho no instante $t_{r_0}^{min}$, o veículo não terá outra escolha senão esperar pela próxima fase. Seja t_{g_0} o instante em que a próxima fase de r_0 se inicia (ou se iniciou, caso já esteja ativa). Na melhor das circunstâncias, o instante t_{i_1} que torna factível a passagem pela interseção i_1 é definido por:

$$t_{i_1} = \max(t_{r_0}^{min}, t_{g_0}). \quad (4.5)$$

Após atravessar a interseção i_1 , o veículo deverá seguir por uma das vias de saída de i_1 até a próxima interseção i_2 , que precisa ser definida. A escolha de i_2 deve ser baseada no instante mínimo factível necessário para cruzá-la, que é baseado em t_{i_1} e pode ser definido por:

$$t_{i_2} = t_{i_1} + \max(t_{r_1}^{min}, t_{g_1}). \quad (4.6)$$

É possível então generalizar o instante factível para cruzar uma interseção qualquer no sinal verde da seguinte forma:

$$t_{i_n} = \begin{cases} \max(t_{r_0}^{min}, t_{g_0}) & \text{para } n = 0 \\ t_{i_{n-1}} + \max(t_{r_{n-1}}^{min}, t_{g_{n-1}}) & \text{para } n > 0 \end{cases} \quad (4.7)$$

A partir da temporização dos semáforos, é possível construir uma rota baseada nos tempos de viagem factíveis para cada par de interseções. Esta rota também é construída com o algoritmo de *Dijkstra*. A aresta de um segmento de via r_n é ponderada pelo valor de $t_{i_{n+1}}$. Por levar em consideração o tempo mínimo de travessia de cada segmento de via, esta rota contempla as vantagens da rota temporalmente mais curta, detalhada na seção 4.4.

Semáforos SMER

Os semáforos com controladores SMER, conforme descritos em maiores detalhes na subseção 2.3.1, se ajustam periodicamente de acordo com as mudanças nas condições de tráfego. No momento em que uma reconfiguração ocorre, o controlador SMER estabelece uma temporização fixa, a qual se repete regularmente até o momento de uma nova reconfiguração. Durante o intervalo compreendido entre duas reconfigurações, o semáforo se comporta basicamente como um semáforo de tempo fixo. Desta forma, é possível prever o estado de um sinal em qualquer instante contido na janela de tempo que termina quando a próxima reconfiguração ocorre.

O roteamento inteligente apresentado na subseção 4.7.1 também pode ser utilizado em cenários cujos semáforos são operados por controladores SMER. Entretanto, previsões precisam ser feitas a respeito dos seus estados em instantes que estão fora da janela de tempo na qual estes semáforos estão operando. Para isso, é adotada a estratégia de ignorar as reconfigurações futuras e o planejamento da rota é todo feito a partir das temporizações vigentes.

4.7.2 Planejamento de Rota Cooperativo e Sensível à Demanda

À medida em que os veículos planejam as suas rotas, pode surgir espontaneamente um desbalanceamento na distribuição dos fluxos das vias do cenário. As artérias do sistema, por exemplo, costumam concentrar grandes fluxos, já que os seus altos limites de velocidade potencializam as chances de serem escolhidas por veículos no momento em que planejam as suas rotas. Sabe-se também que, conforme as taxas de entrada de veículos no sistema aumentam, maior se torna a tendência das vias

se saturarem ao longo do tempo.

Assumindo que os níveis de saturação das vias do cenário são globalmente conhecidos, um veículo pode tentar estimar para cada via da sua rota o atraso que lhe será acarretado. Isso oferece ao veículo a possibilidade de evitar vias que aumentarão o tempo de viagem e de parada, caso sejam escolhidas para compor a sua rota.

Um veículo, ao escolher uma via, reserva um espaço na fase do semáforo posterior a ela, manifestando assim o seu interesse em cruzá-lo em algum instante desta fase. Esta reserva de espaço é visível para todo o sistema, de modo a permitir que os demais veículos, enquanto planejam suas rotas, possam saber quantos veículos já reservaram espaço nas fases em que estão interessados para estimar o atraso causado por estas demandas. Portanto, este atraso deve ser somado ao tempo mínimo factível, apresentado na seção 4.7, que é utilizado para calcular o peso da aresta no grafo durante o planejamento da rota do veículo.

Em situações pessimistas, o veículo, ao entrar em uma via, pode encontrar à sua frente um pelotão bloqueado no semáforo que se encontra no final dela. Este atraso, idealmente, poderia ser baseado no *startup lost time*, que é definido pelo tempo perdido no momento em que os veículos deste pelotão reagem à mudança para o sinal verde e começam a acelerar, até que todos eles estabeleçam um *headway* temporal aproximadamente constante.

No entanto, calcular o *startup lost time* no MicroLAM é uma tarefa um tanto complexa, especialmente por conta da dinâmica das variações de aceleração e velocidade inerentes ao IDM, que se alteram a cada passo da simulação. Logo, uma simplificação para estimar o atraso t_d em função das reservas nas fases é mostrada na equação 4.8.

$$t_d = w \times q_r^f, \quad (4.8)$$

onde:

- w = parâmetro de regulagem da equação;
- q_r^f = quantidade de veículos que reservaram espaço na fase f da via r .

O parâmetro w de regulagem da equação é calculado empiricamente a partir da observação de uma simulação qualquer. Ele representa o *headway* temporal médio dos veículos no momento em que cruzam a interseção logo após arrancarem em reação à mudança para o sinal verde.

4.7.3 Replanejamento Dinâmico da Rota

Conforme apresentado na subseção 4.7.1, a construção da rota proposta por este trabalho parte de premissas otimistas sobre as condições de trânsito. No mundo real, entretanto, nem sempre é possível que um veículo trafegue na velocidade máxima da via, pois o espaço da via é dividido com outros veículos. No MicroLAM, pode ocorrer de haver à frente veículos trafegando em velocidades mais lentas, muitas vezes por estarem ainda se recuperando de uma parada em um sinal que até então estava vermelho e acabara de se tornar verde.

Para contornar este problema, o veículo, no momento em que entra em cada interseção, recalcula a sua rota com o mesmo algoritmo, porém tomando agora esta interseção como ponto de partida até o seu destino, que foi estabelecido no momento em que o veículo foi introduzido no cenário. Deste modo, os prejuízos causados por eventuais intercorrências ao longo da viagem pelo último segmento de via podem ser minimizados. Este artifício também pode ajudar a compensar previsões imprecisas, apresentadas na subseção 4.7.1, que eventualmente ocorrem em cenários compostos por semáforos SMER.

4.8 IDM e Ondas Verdes

Conforme detalhado na subseção 2.6.4, o IDM tem entre os seus parâmetros uma velocidade alvo. Em boas condições de tráfego, o veículo se empenha para alcançá-la e mantê-la durante o maior intervalo de tempo possível. Entretanto, por ser um modelo de perseguição veicular, o estado de um semáforo à frente não é levado em consideração. Logo, um veículo pode ser forçado a frear de forma abrupta enquanto viaja em altas velocidades, especialmente nos momentos em que é surpreendido com um sinal vermelho à medida em que se aproxima de uma interseção sinalizada.

O IDM tenta imitar o comportamento de condutores reais. O compromisso em viajar nos limites de velocidade e aceleração em um sistema de tráfego semaforizado contribui para que ocorra uma série de prejuízos. O tempo de parada em sinais vermelhos é prolongado, o veículo sofre maiores desgastes e os passageiros são submetidos a um certo desconforto enquanto viajam.

O comportamento do condutor, ou até mesmo de veículos autônomos, pode ser ajustado para que as temporizações dos semáforos sejam aproveitadas ao calcular a aceleração do veículo. Desta forma, é possível atravessar vários sinais verdes consecutivos, sem que sejam necessárias paradas em sinais que poderiam ser evitadas. Além disso, os níveis de consumo de combustível e de emissão de gases provavelmente seriam reduzidos.

Para atingir estes objetivos, foi necessário adicionar extensões ao IDM na imple-

mentação do MicroLAM, que serão descritas a seguir.

4.8.1 Aceleração Confortável

Para garantir um maior conforto aos passageiros do veículo, decidiu-se limitar o IDM de forma que não seja possível atingir acelerações e desacelerações superiores aos valores confortáveis. Segundo o *Traffic Engineering Handbook* [24], estes valores são $1,1$ e -3 m/s^2 , respectivamente.

A aceleração do IDM é dotada de um limite superior, dado por a , conforme pode ser visto na equação 2.6. Para garantir acelerações confortáveis, deverá ser usado o valor de $1,1 \text{ m/s}$ para este parâmetro. Já a taxa de frenagem do IDM, por este ser um modelo de perseguição veicular, é baseada somente nas propriedades do próprio veículo e do veículo à frente. Desta forma, o IDM não é sensível a paradas em sinais vermelhos.

Quando um sinal está verde, o primeiro veículo de um pelotão que viaja em direção à interseção tem como referência o último veículo que está na via posterior a ela. Portanto, este veículo se movimenta para alcançá-lo, cruzando a interseção. Quando o sinal está vermelho, o veículo precisa parar e aguardar a passagem do fluxo concorrente.

Para se adaptar ao IDM, o MicroLAM materializa um veículo de comprimento, velocidade e aceleração iguais a zero e o posiciona exatamente na linha de retenção da interseção quando o sinal muda para vermelho. Desta forma, o primeiro veículo do pelotão toma como referência este veículo falso, e é obrigado a desacelerar até parar. No momento em que o sinal se torna verde, o pelotão volta a se deslocar, pois o veículo falso é removido da linha de retenção.

O surgimento súbito deste veículo bloqueante pode surpreender o pelotão que viaja em direção à interseção, que possivelmente está em alta velocidade. O semáforo pode ficar vermelho a qualquer momento e quando isso ocorre, o pelotão é obrigado a parar repentinamente. Isso pode provocar desacelerações irrealistas, especialmente quando o pelotão está muito próximo da interseção, pois o IDM garante que colisões não podem ocorrer.

Fez-se necessário tornar o comportamento dos veículos sensível aos tempos do semáforo. Isso permitiu que o nível de desaceleração confortável pudesse ser praticado, pois o veículo passou a ter meios de se planejar para iniciar a frenagem muito antes do momento em que o semáforo se torna vermelho. Além disso, o veículo pode ajustar a sua velocidade e aceleração e viajar de acordo com os tempos das fases dos semáforos, se mantendo, sempre que possível, nas ondas verdes. Dessa forma, o veículo passa a viajar com um comportamento mais homogêneo, minimizando os níveis de consumo de combustível e emissão de gases. A figura 4.5 mostra

a comparação das variações na aceleração de um veículo antes e depois das extensões implementadas no IDM para ele se mantivesse nas ondas verdes. É possível também observar que em momento algum o veículo excedeu os limites confortáveis de aceleração e desaceleração.

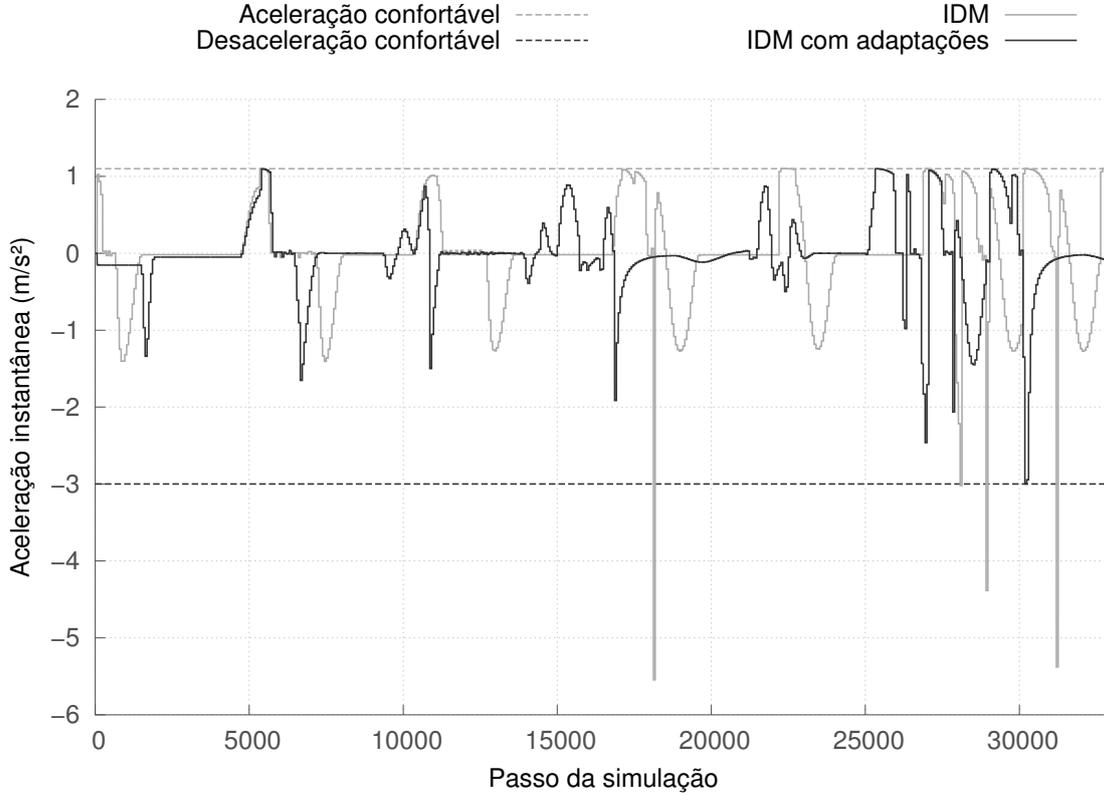


Figura 4.5: Comparação das acelerações de um veículo antes e depois das adaptações realizadas no IDM.

No MicroLAM, cada veículo do sistema precisa calcular a sua velocidade e aceleração instantâneas a cada passo da simulação. No IDM, a aceleração é definida a partir da equação 2.8. A velocidade é definida pela soma do seu valor no passo anterior com a diferença obtida durante o passo atual. Logo, a velocidade do IDM na implementação do MicroLAM é dada por:

$$v_i = v_{i-1} + \frac{a_i}{p}, \quad (4.9)$$

onde:

- v_i = aceleração do veículo no i -ésimo passo;
- a_i = aceleração do veículo no i -ésimo passo calculada pela equação 2.8;
- p = quantidade de passos que a simulação realiza a cada segundo.

No MicroLAM, os segmentos das ondas verdes são entidades cujas propriedades podem ser acessadas por qualquer veículo da via. Portanto, os veículos utilizam dessas propriedades para calcular suas velocidades e acelerações.

Os veículos se esforçam para viajar nas ondas verdes sempre que possível, o que permite que eles aproveitem as temporizações dos semáforos para se movimentarem de modo a reduzir variações na velocidade e na aceleração. Os veículos têm um posicionamento alvo na cabeça da onda, que garante que haverá espaço livre na cauda para que outros veículos possam alcançá-la e se juntar ao pelotão. Um veículo que queira entrar na onda a partir da cabeça reduzirá sua velocidade, de modo a ser alcançado por ela, empurrando os demais veículos para trás e permitindo assim a sua acomodação na onda. A figura 4.6 ilustra um pelotão de veículos viajando sobre uma onda verde.

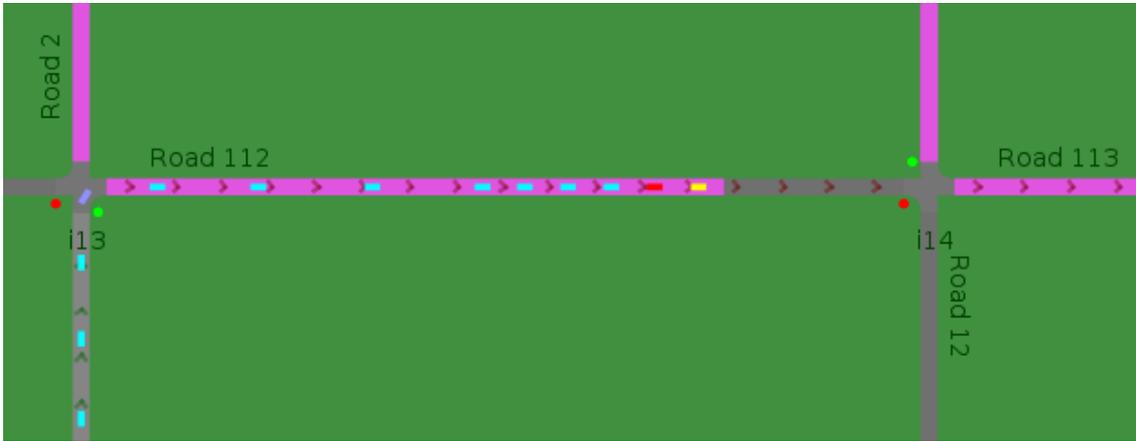


Figura 4.6: Pelotão de veículos se posicionando na cabeça de um segmento de onda verde que se propaga da interseção i13 em direção à interseção i14, representado por um tapete magenta sobre a via.

Um veículo, ao calcular a sua velocidade, primeiramente avalia se há algum segmento de onda verde à sua frente na via que ele se encontra. Em caso positivo, é necessário verificar se a onda é alcançável ou não. Uma onda é considerada alcançável quando o veículo pode chegar até a sua cauda antes de entrar na interseção. Dadas a velocidade, aceleração máxima e posicionamento do veículo juntamente com a velocidade e posicionamento da onda, é possível descobrir o momento em que eles se encontrarão de acordo com a equação a seguir:

$$\begin{aligned} s_{0v} + v_v t &= s_{0w} + v_w t \\ \therefore s_{0v} + (v_{0v} + a_v t)t &= s_{0w} + (v_{0w} + a_w t)t. \end{aligned} \tag{4.10}$$

Dado que a onda verde se propaga com velocidade constante, então sua aceleração a_w é nula. Simplificando, tem-se:

$$a_v t^2 + (v_{0v} - v_w)t + s_{0v} - s_{0w} = 0, \quad (4.11)$$

onde:

- t = instante em que o veículo e a onda verde se encontrarão;
- a_v = aceleração calculada pelo IDM;
- v_{0v} = velocidade instantânea do veículo;
- v_w = velocidade constante da onda verde;
- s_{0v} = posição instantânea da frente do veículo;
- s_{0w} = posição instantânea da cauda da onda verde.

A aceleração calculada pelo IDM é usada no lugar do limite de aceleração do veículo na equação 4.11 para garantir que ele irá responder ao comportamento do veículo à frente. Isso garante que não haja colisão entre eles. É importante ressaltar que a aceleração do veículo nunca ultrapassa o valor de $1,1 \text{ m/s}^2$, para que não haja desconforto para os passageiros.

A posição em que o veículo e a onda verde se encontrarão pode ser calculada por:

$$s = a_v t^2 + v_{0v} t + s_{0v}. \quad (4.12)$$

No entanto, é importante verificar se o veículo não excederá o limite de velocidade da via enquanto acelera a $a_v \text{ m/s}^2$ durante t segundos. A velocidade final do veículo durante este trajeto pode ser calculada por:

$$v_v = v_{0v} + a_v t. \quad (4.13)$$

Caso esta velocidade seja superior ao limite da via, é necessário calcular o instante em que a velocidade máxima é atingida:

$$t' = \frac{v_r^{max} - v_{0v}}{a_v}. \quad (4.14)$$

A posição do veículo neste instante será:

$$s'_v = a_v t'^2 + v_{0v} t' + s_{0v}. \quad (4.15)$$

E a posição da cauda da onda será:

$$s'_w = s_{0w} + v_w t'. \quad (4.16)$$

Portanto, o tempo em que o veículo viajará na velocidade máxima é dado por:

$$t'' = \frac{s'_w - s'_v}{v_r^{max} - v_w}. \quad (4.17)$$

Logo, o instante em que o veículo se encontrará com a cauda da onda é dado por $t' + t''$, que corresponde ao tempo em que o veículo levará para chegar até a velocidade máxima da via somado ao tempo em que ele viajará na velocidade constante v_r^{max} . A onda, então, será considerável alcançável se este encontro acontecer antes que a cauda da onda atinja a interseção:

$$t' + t'' < \frac{d_{w,i}}{v_w}, \quad (4.18)$$

onde $d_{w,i}$ é a distância entre a cauda da onda verde e a interseção à frente, para a qual a onda se propaga.

É possível que haja mais de uma onda se propagando sobre uma via, especialmente naquelas muito longas ou em situações em que o semáforo na saída da via opera com ciclos mais curtos do que o semáforo na entrada. Se houver mais de uma onda verde alcançável na via, o veículo irá escolher a que estiver com a cabeça mais próxima da saída.

Uma vez dentro da onda verde, o veículo irá acelerar confortavelmente, caso necessário, para se juntar ao pelotão que se forma na cabeça dela, e nele se manterá.

Na situação em que não houver nenhuma onda verde alcançável, o veículo terá que esperar pela próxima fase para cruzar o semáforo à frente. Assim, ele utiliza das informações sobre os tempos das fases deste semáforo, conforme explicado na subseção 4.7.1, para calcular sua velocidade e sua aceleração, de modo a estabelecer uma taxa de desaceleração suave e confortável, que minimiza a probabilidade de parada na linha de retenção à espera do sinal verde. Seja b a taxa de frenagem definida pelo IDM na equação 2.7, a_v^{max} o nível máximo de aceleração do veículo e $d_{v,i}$ a distância entre o veículo e a interseção. O tempo mínimo de viagem até a

interseção, em condições de trânsito livre é dado pela equação 4.19.

$$(a_v^{max} - b)t^2 + v_{0v}t + d_{v,i} = 0. \quad (4.19)$$

É possível verificar a velocidade final ao manter a aceleração a_v^{max} por t segundos na equação 4.20.

$$v_v = v_{0v} + a_v^{max}t. \quad (4.20)$$

Entretanto, é preciso considerar que o veículo não poderá ultrapassar o limite de velocidade imposto pela via. Logo, sabe-se que o tempo necessário para que este limite seja atingido é dado por:

$$t' = \frac{v_r^{max} - v_{0v}}{a_v^{max} - b}. \quad (4.21)$$

Quando isto ocorrer, o veículo estará na posição s_v dada por:

$$s_v = (a_v^{max} - b)t'^2 + v_{0v}t' + s_{0v}. \quad (4.22)$$

Após atingir a velocidade máxima, o veículo ainda viajará por mais t'' segundos até chegar na interseção.

$$t'' = \frac{l_r - s_v}{v_r^{max}}. \quad (4.23)$$

Finalizando, dado que a via estará livre para que o veículo possa acelerar na sua velocidade máxima e que o limite de velocidade da via será respeitado, o tempo mínimo de viagem até a interseção à frente pode ser calculado com a equação 4.24.

$$t_i^{min} = \begin{cases} t & \text{para } v_v \leq v_r^{max} \\ t' + t'' & \text{para } v_v > v_r^{max} \end{cases}. \quad (4.24)$$

Após calculado o tempo mínimo de viagem entre a interseção, é possível saber o instante t_i em que a fase que o veículo irá passar será iniciada. A seção 4.7.1 fornece os detalhes para calcular esse instante a partir do tempo mínimo de viagem até a interseção.

Para viajar com um comportamento suave, o veículo deve estabelecer uma velocidade média da sua posição até a interseção, dada por:

$$v_{mv} = \frac{s_{v,i}}{t_i}. \quad (4.25)$$

Para garantir que a viagem seja realizada com esta velocidade média, o veículo deve estabelecer uma aceleração instantânea de acordo com a equação 4.26.

$$a = \max \left[b_{max}, \min \left(\frac{2v_{mv} - 2v_{0v}}{t_i}, a_f \right) \right]. \quad (4.26)$$

Para que não haja qualquer colisão, a aceleração deve ser superiormente limitada por a_f , valor fornecido para a aceleração pela equação 2.6. Há também um limite inferior para a aceleração b_{max} , que corresponde à frenagem máxima permitida. Para garantir que seja confortável, ela deve ser igual a -3 m/s^2 .

A velocidade instantânea do veículo no próximo passo da simulação é dada por:

$$v = v_{0v} + \frac{a}{p}, \quad (4.27)$$

onde p é a taxa de passos por segundo da simulação.

4.9 Considerações Finais

Neste capítulo, foi apresentado o algoritmo de roteamento ecológico orientado a ondas verdes e as extensões realizadas no IDM que garantem um melhor aproveitamento dos tempos dos semáforos no cálculo da aceleração. Foram também apresentadas as demais modificações e extensões realizadas no MicroLAM, que permitiram viabilizar a avaliação da solução proposta. Os resultados do seu desempenho serão apresentados no capítulo seguinte.

Capítulo 5

Experimentos e Resultados

Neste capítulo, será apresentada primeiramente a metodologia utilizada para avaliar o roteamento ecológico proposto por este trabalho. Em seguida, serão mostrados os cenários que foram utilizados nas simulações realizadas no MicroLAM e ao final, algumas considerações sobre os seus resultados.

5.1 Metodologia Utilizada

Os experimentos realizados foram formulados com o propósito de avaliar quantitativamente o desempenho do roteamento inteligente orientado a ondas verdes em relação aos roteamentos de menor comprimento espacial e temporal, apresentados nas seções 4.3 e 4.4, respectivamente. O funcionamento do roteamento inteligente é avaliado em cenários com semáforos de tempo fixo, como também em cenários com semáforos dinâmicos SMER. O modelo de motorista utilizado nas simulações realizadas com o algoritmo de roteamento inteligente foi o IDM estendido, apresentado na seção 4.8, de modo a garantir que os veículos planejassem as suas acelerações e velocidades em função das temporizações dos semáforos. Para os demais algoritmos de roteamento, foi utilizado o IDM sem as extensões propostas.

5.1.1 Medidas de Interesse

As seguintes medidas de interesse foram avaliadas e serviram de métricas para comparar o roteamento inteligente aos demais:

Tempo médio de viagem

É quanto tempo, em média, os veículos levam para viajar dos seus pontos de origem até os seus pontos de destino. Os pontos de origem são sempre interseções de entrada e os pontos de destino, interseções de saída. Esta medida ajuda a estimar o aproveitamento das fases dos semáforos. À medida em que mais veículos conseguem

aproveitar as ondas verdes para se deslocarem, menor tende a ser o tempo médio de viagem.

Velocidade média

É a média das velocidades médias dos veículos que viajam pelo cenário. A velocidade média, no contexto das simulações aqui consideradas, dá uma noção da maneira em que os veículos fluem pelo sistema. Em circunstâncias de alta densidade ou de excessivas paradas em semáforos, a velocidade média tende a ser mais baixa.

Atraso médio

É quanto tempo, em média, um veículo se mantém totalmente parado ao longo da viagem, com velocidade igual a zero. Esta medida também ajuda a entender o aproveitamento das fases dos semáforos. Ela também está altamente relacionada ao tempo médio de viagem, pois as constantes retomadas de velocidade após as paradas acarretam um atraso no tempo de viagem, especialmente por conta do *startup lost time*.

Consumo médio de combustível

É o nível médio de consumo de combustível, em L/km , que um veículo desempenha ao longo da sua viagem.

Emissões médias de CO, HC e NO_x

São os níveis médios de emissão de CO, HC e NO_x, em g/km , que um veículo desempenha ao longo da sua viagem.

5.2 Experimentos Realizados

O cenário utilizado em todos os experimentos foi uma rede fechada simétrica de dimensões 10×10 e com fluxos alternados. Cada segmento de via que une duas interseções desta grade tem $200\ m$ de comprimento. Há também nela dois pares de corredores de maior velocidade, sendo que dois deles estão dispostos verticalmente e os outros dois, horizontalmente. O limite de velocidade nestes corredores é de $60\ km/h$. Nas demais vias do cenário, este limite é de $40\ km/h$. A figura 5.1 ilustra este cenário, com os corredores de maior velocidade destacados em cor escura.

A motivação para utilizar uma rede fechada com fluxos alternados é que ela garante que qualquer interseção de saída do cenário pode ser alcançada a partir de qualquer interseção de entrada. Além disso, ela oferece uma variedade de caminhos

distintos que ligam dois pontos do cenário. Desta forma, ela se torna adequada para avaliar o algoritmo de escolha de rotas inteligentes e orientadas a ondas verdes em detrimento de outras rotas possíveis.

As medidas de interesse foram coletadas em um período de duas horas de simulação. O algoritmo orientado a ondas verdes foi submetido a experimentos nos quais foram utilizados semáforos de tempo fixo e semáforos inteligentes SMER. A motivação para experimentá-lo em conjunto com semáforos inteligentes foi a necessidade de avaliar o seu desempenho em um ambiente no qual as fases dos semáforos se reconfigurassem periodicamente, comprometendo a predição dos seus estados e dificultando o planejamento das rotas.

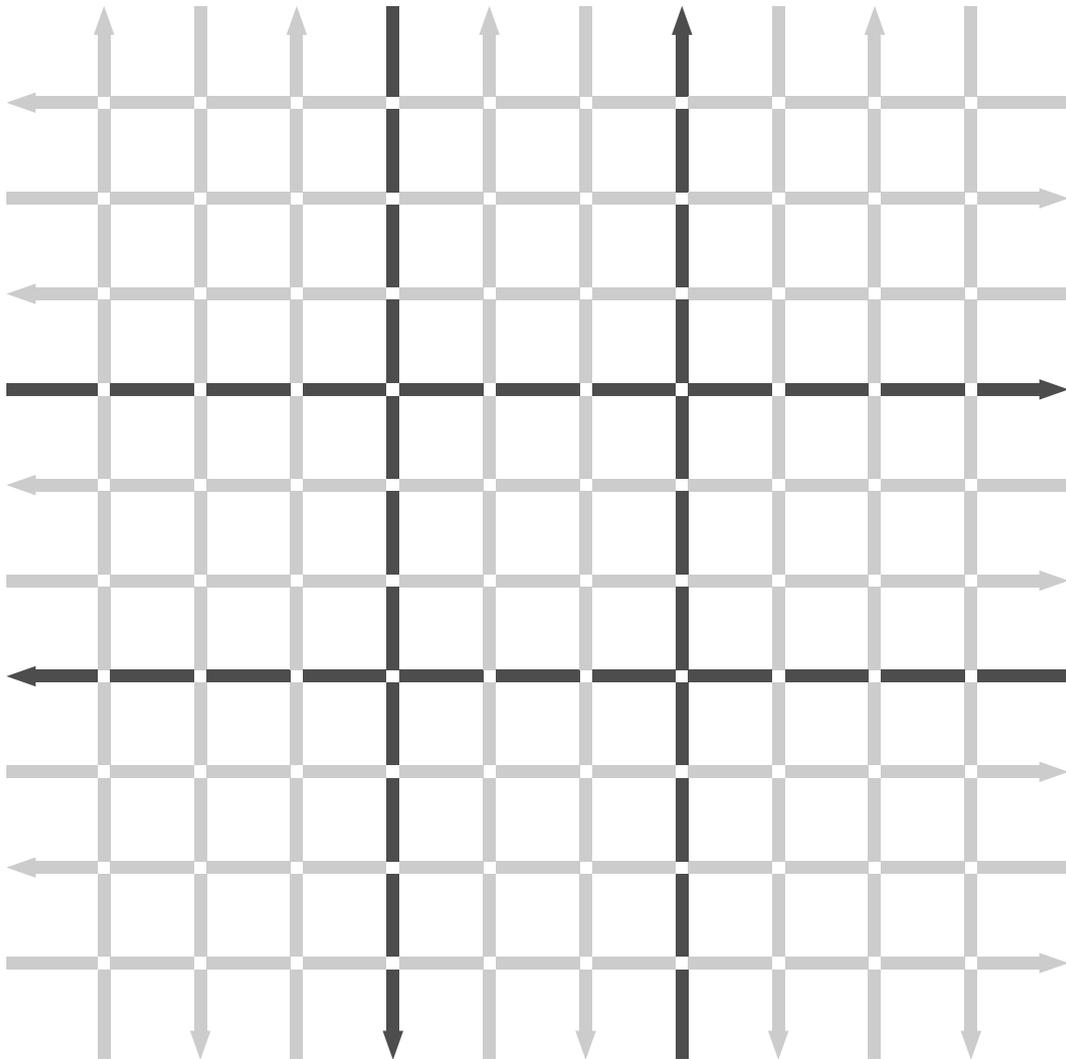


Figura 5.1: Rede fechada 10×10 utilizada nas simulações. As setas indicam os sentidos dos fluxos.

5.2.1 Semáforos de Tempo Fixo

Primeiramente, o algoritmo de roteamento inteligente orientado a ondas verdes foi testado no cenário com semáforos de tempo fixo. Para avaliar o desempenho deste algoritmo, foram utilizadas três configurações de volume. Para as simulações com volumes baixos, foi estabelecida a taxa de 300 *vph* para as vias de alta velocidade e de 200 *vph* para as demais. Para as simulações com volumes médios, estes valores foram 450 *vph* e 300 *vph*, respectivamente. Para as simulações com volumes altos, utilizou-se 600 *vph* e 400 *vph*. Estes últimos valores, entretanto, tornam os cenários saturados antes do término das simulações, pois as densidades das vias aumentam substancialmente, de modo a comprometer o movimento dos veículos como um todo. Os volumes altos, por outro lado, são importantes para avaliar o desempenho do algoritmo de roteamento inteligente em condições de tráfego de maior estresse.

É importante observar que estes volumes são proporcionais aos limites de velocidade das vias. Eles também se mantêm constantes durante todo o tempo da simulação e os intervalos entre as entradas dos veículos no sistema seguem uma distribuição exponencial.

A primeira simulação realizada considera apenas os tempos dos semáforos no planejamento das rotas. A reserva de espaço nas fases dos semáforos não foi utilizada. O roteamento dinâmico, realizado a cada interseção cruzada, também não foi utilizado nesta simulação. O propósito de não utilizar estes dois recursos foi o interesse de avaliar nos experimentos seguintes os benefícios que cada um deles agrega. Por este motivo, esta simulação utilizou a configuração de volumes altos, de modo a obrigar os veículos a planejarem suas rotas em um cenário propenso ao surgimento de congestionamentos.

As durações das fases foram configuradas proporcionalmente aos volumes das vias de entrada das interseções para garantir que haja justiça na concessão do direito de passagem. Para as vias de alta velocidade, a duração das fases é de 72 segundos, sendo 67 para o intervalo verde, 4 para o amarelo e 1 para o intervalo de vermelho geral. As fases das demais vias têm duração de 48 segundos, sendo 44, 3 e 1 para os intervalos de verde, de amarelo e de vermelho geral, respectivamente. Desta forma, cruzamentos entre vias de alta e baixa velocidade têm um tempo de ciclo de dois minutos. A tabela 5.1 apresenta os resultados desta simulação.

Semáforos de tempo fixo	
Tempo médio de viagem (<i>s</i>)	699,75
Velocidade média (<i>m/s</i>)	3,95
Atraso médio (<i>s</i>)	414,44
Consumo de combustível (<i>L/km</i>)	0,22
Emissão de CO (<i>g/km</i>)	2,32
Emissão de HC (<i>g/km</i>)	0,24
Emissão de NO _x (<i>g/km</i>)	0,34

Tabela 5.1: Medidas de interesse para o roteamento sensível às fases dos semáforos.

Reserva de Espaço nas Fases

Para mensurar a contribuição que a estratégia de reservar espaço nas fases dos semáforos pode oferecer, foi necessário primeiramente realizar simulações para avaliar o melhor valor para o parâmetro de regulagem do algoritmo de roteamento inteligente orientado a ondas verdes.

Conforme apresentado na seção 4.7.2, este algoritmo utiliza um parâmetro de regulagem que é necessário para estimar o *startup lost time* médio e ponderar o custo de cruzar um semáforo em uma fase específica com base na quantidade de veículos que já manifestaram interesse em fazer o mesmo.

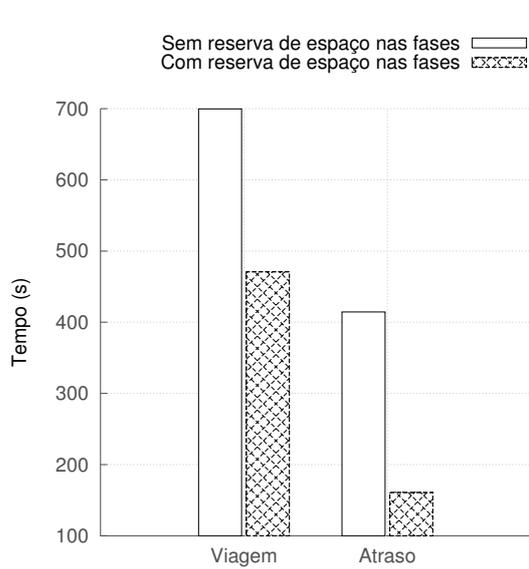
Para encontrar um valor adequado para este parâmetro, foram realizadas cinco simulações, uma para cada valor testado. Os demais parâmetros utilizados nestas simulações foram os mesmos utilizados no experimento anterior. Estas simulações diferem apenas por adotar a estratégia de reserva de espaço nas fases dos semáforos.

A tabela 5.2 apresenta os resultados de cada simulação realizada. Conforme é possível verificar, o valor mais adequado para o parâmetro de regulagem é 3,5, pois o mesmo obteve vantagem em todas as medidas de interesse. Portanto, este valor foi utilizado nas demais simulações que utilizaram a rota inteligente com reserva de espaço nas fases dos semáforos, que serão apresentadas ao longo deste capítulo.

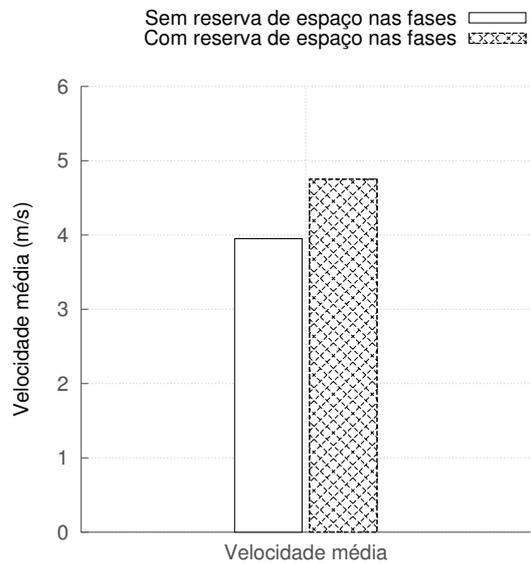
	Parâmetros de regulagem				
	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0
Tempo médio de viagem (<i>s</i>)	489,18	496,66	475,86	470,72	473,76
Velocidade média (<i>m/s</i>)	4,63	4,60	4,70	4,75	4,72
Atraso médio (<i>s</i>)	181,41	191,66	168,56	160,76	162,95
Consumo de combustível (<i>L/km</i>)	0,20	0,20	0,19	0,19	0,19
Emissão de CO (<i>g/km</i>)	2,01	2,02	2,01	2,00	2,00
Emissão de HC (<i>g/km</i>)	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18
Emissão de NO _x (<i>g/km</i>)	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30

Tabela 5.2: Medidas de interesse para o parâmetro de calibração do algoritmo de roteamento.

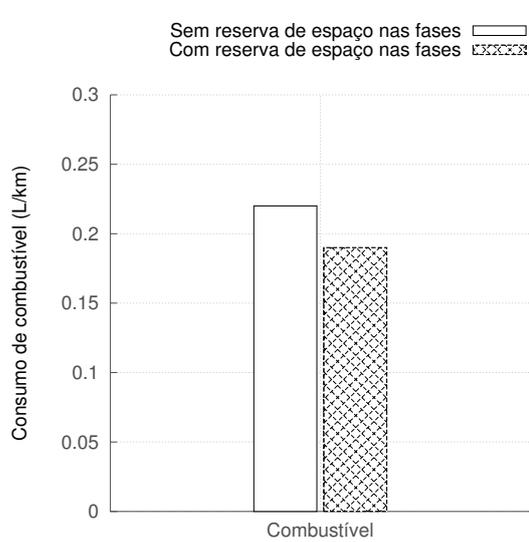
A partir dos resultados obtidos para o valor 3,5, é possível comparar o desempenho alcançado após a adoção da estratégia de reserva de espaço nas fases dos semáforos com os resultados da simulação realizada anteriormente, apresentados na tabela 5.1, que diferia apenas por não adotar esta estratégia. Os gráficos apresentados na figura 5.2 mostram as comparações de algumas das medidas de interesse avaliadas.



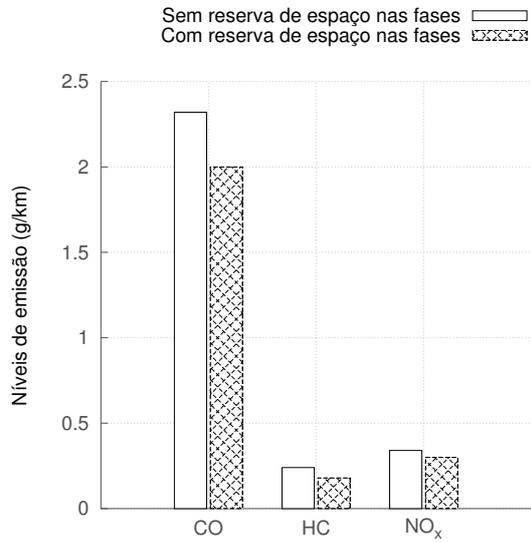
(a) Tempo médio de viagem e atraso médio.



(b) Velocidade média.



(c) Níveis de consumo de combustível.



(d) Níveis de emissão de gases.

Figura 5.2: Resultados da simulação da estratégia de reserva de espaço nas fases dos semáforos.

É possível observar que a estratégia de reservar espaço nas fases dos semáforos durante o planejamento da rota e avaliar caminhos alternativos cujas fases têm menor demanda possibilitou uma redução de quase 40% no tempo médio de viagem. O atraso médio diminuiu em mais de três vezes e os níveis de consumo de combustível e emissão de gases também foram reduzidos.

Replanejamento Dinâmico da Rota

O replanejamento dinâmico da rota foi uma segunda abordagem adotada como uma tentativa de melhorar o desempenho do algoritmo de roteamento inteligente. Durante o desenvolvimento do trabalho, surgiu a hipótese de que as intercorrências nas condições de tráfego poderiam comprometer o compromisso de um veículo em se manter na rota inicialmente planejada, atravessando cada uma das interseções sinalizadas nos instantes estimados durante o cálculo da rota.

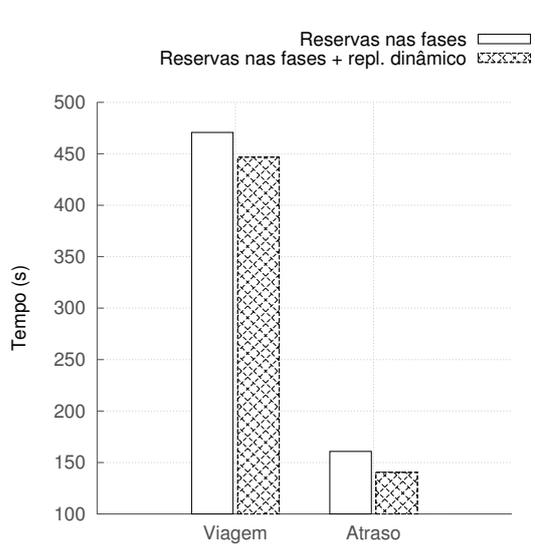
Para tentar compensar este efeito, foi implementada a estratégia de recalculer a rota do veículo no momento em que cada interseção é cruzada, pois dadas as condições de trânsito neste momento, poderá haver uma rota alternativa que se mostre melhor em relação à rota inicialmente planejada.

Portanto, foi realizada uma simulação em que foi adotado o uso desta estratégia, a fim de comparar o seu desempenho com o do último experimento, que utilizou volumes altos e reserva de espaço nas fases dos semáforos. A tabela 5.3 apresenta os resultados obtidos nesta simulação.

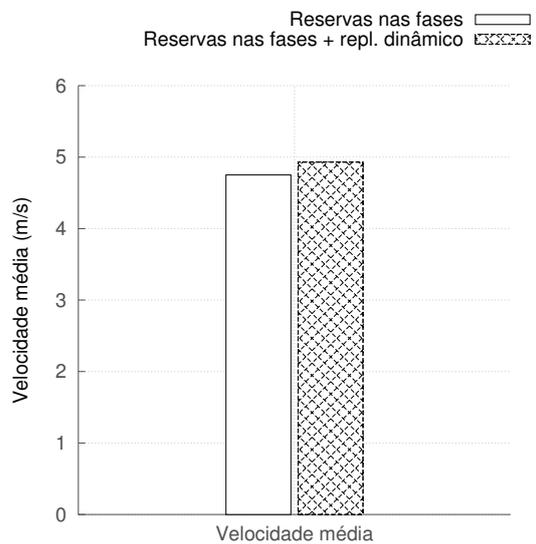
Reserva nas Fases + Replanejamento Dinâmico da Rota	
Tempo médio de viagem (s)	446,70
Velocidade média (m/s)	4,93
Atraso médio (s)	140,37
Consumo de combustível (L/km)	0,19
Emissão de CO (g/km)	1,99
Emissão de HC (g/km)	0,17
Emissão de NO_x (g/km)	0,30

Tabela 5.3: Medidas de interesse para o teste de replanejamento dinâmico da rota.

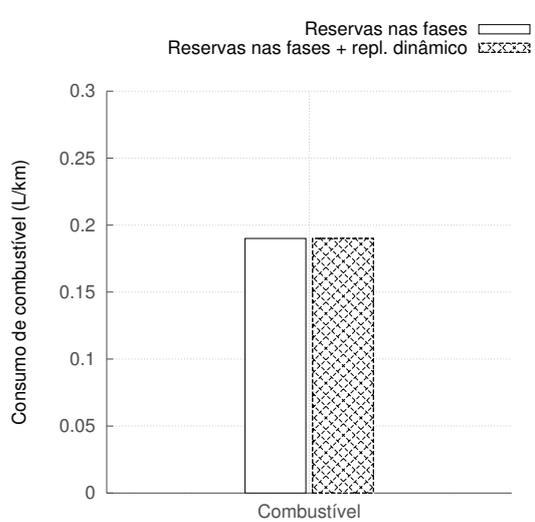
Os resultados que são apresentados na tabela 5.3 e nos gráficos da figura 5.3 validam a hipótese de que a adoção da estratégia de recalculer a rota dos veículos a cada interseção cruzada traz resultados positivos para as medidas de interesse analisadas. O tempo de viagem e o atraso foram as medidas que obtiveram ganhos maiores. As demais também foram beneficiadas, ainda que em proporções pouco significativas.



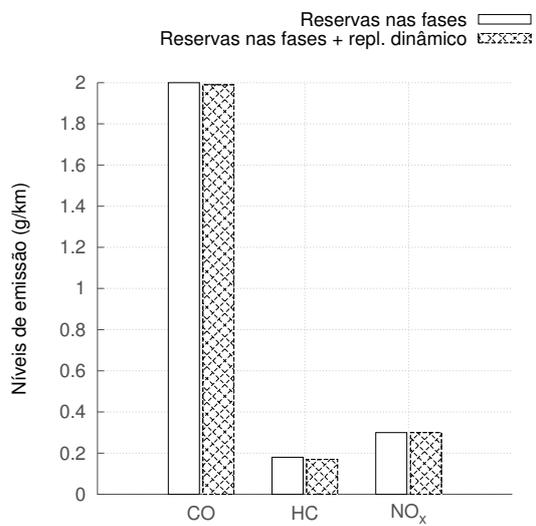
(a) Tempo médio de viagem e atraso médio.



(b) Velocidade média.



(c) Níveis de consumo de combustível.



(d) Níveis de emissão de gases.

Figura 5.3: Resultados da simulação após a adoção da estratégia de replanejamento dinâmico da rota.

Conforme foi demonstrado, a reserva de espaço nas fases e o replanejamento dinâmico da rota trazem benefícios ao algoritmo de roteamento inteligente proposto neste trabalho. Faz-se então necessária a avaliação do desempenho deste algoritmo em relação aos demais algoritmos de roteamento implementados no MicroLAM. Portanto, a última simulação foi executada mais duas vezes, porém foi usado o volume baixo em uma das execuções e o volume médio na outra. Os resultados destas três simulações, apresentados na tabela 5.4, serão posteriormente comparados com os resultados das simulações dos algoritmos de rota espacialmente e temporalmente mais curta.

	Volumes	
	200/300 vph	300/450 vph
Tempo médio de viagem (s)	364,78	395,94
Velocidade média (m/s)	5,96	5,54
Atraso médio (s)	76,94	95,36
Consumo de combustível (L/km)	0,17	0,18
Emissão de CO (g/km)	1,98	1,98
Emissão de HC (g/km)	0,16	0,16
Emissão de NO_x (g/km)	0,29	0,29

Tabela 5.4: Medidas de interesse para o roteamento orientado a ondas verdes com volumes baixo e médio.

Comparação de Desempenho: Rota Espacialmente Mais Curta

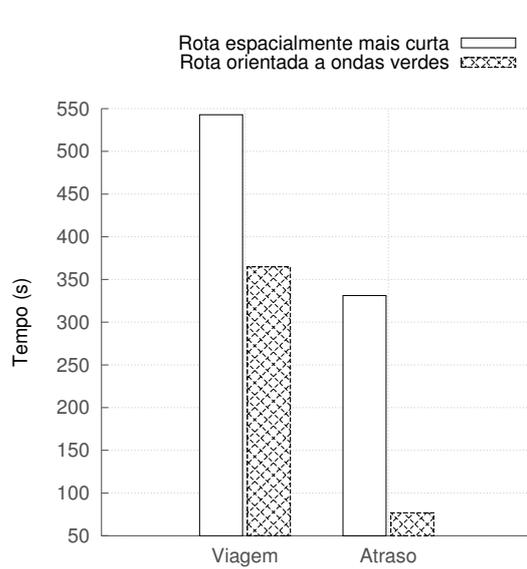
É necessário realizar experimentos com veículos que traçam a rota espacialmente mais curta para avaliar o seu desempenho em relação ao algoritmo proposto.

Portanto, foi realizada uma simulação para cada configuração de volume, sendo uma delas com volume baixo, a outra com volume médio e a terceira com volume alto. O modelo de motorista utilizado pelos veículos foi o IDM. Os resultados destes experimentos serão comparados individualmente com os resultados dos experimentos do algoritmo de roteamento inteligente de acordo com seus respectivos volumes.

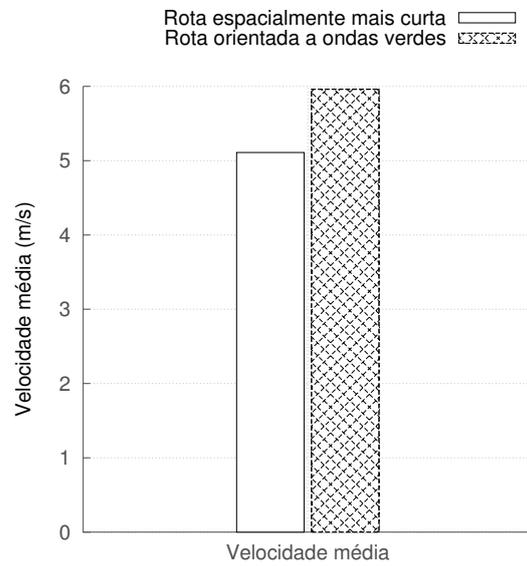
	Volumes		
	200/300 <i>vph</i>	300/450 <i>vph</i>	400/600 <i>vph</i>
Tempo médio de viagem (s)	542,87	494,12	564,82
Velocidade média (m/s)	5,11	4,73	4,07
Atraso médio (s)	331,22	289,43	359,61
Consumo de combustível (L/km)	0,20	0,21	0,23
Emissão de CO (g/km)	2,44	2,40	2,49
Emissão de HC (g/km)	0,20	0,20	0,23
Emissão de NO_x (g/km)	0,39	0,38	0,39

Tabela 5.5: Medidas de interesse para o algoritmo de rota espacialmente mais curta com volumes baixo, médio e alto.

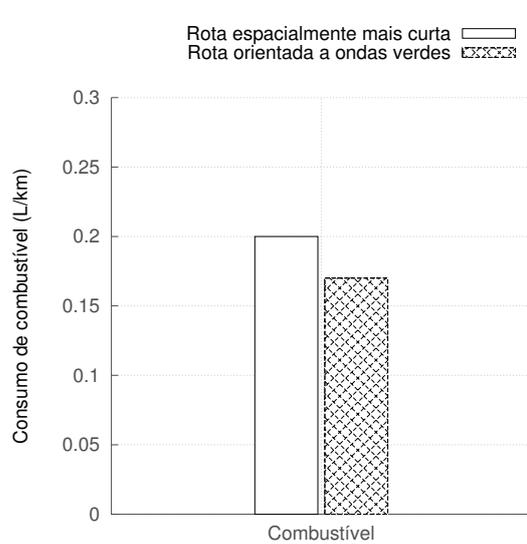
Os resultados obtidos pelos experimentos com o algoritmo de rota espacialmente mais curta apresentados na tabela 5.5, quando comparados aos das tabelas 5.3 e 5.4, oferecem uma percepção da diferença de desempenho entre este algoritmo e o algoritmo de roteamento orientado a ondas verdes. As figuras 5.4, 5.5 e 5.6 ilustram a comparação das medidas de interesse entre os dois modos de roteamento para os volumes baixo, médio e alto, respectivamente.



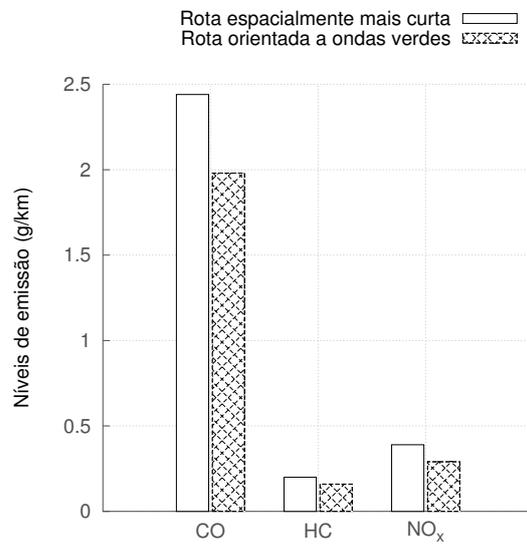
(a) Tempo médio de viagem e atraso médio.



(b) Velocidade média.

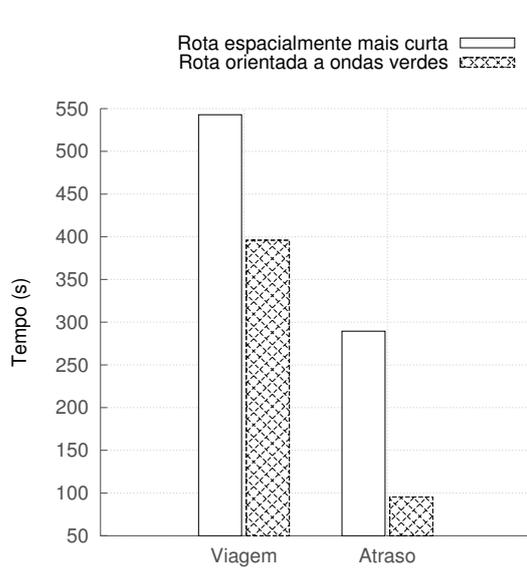


(c) Níveis de consumo de combustível.

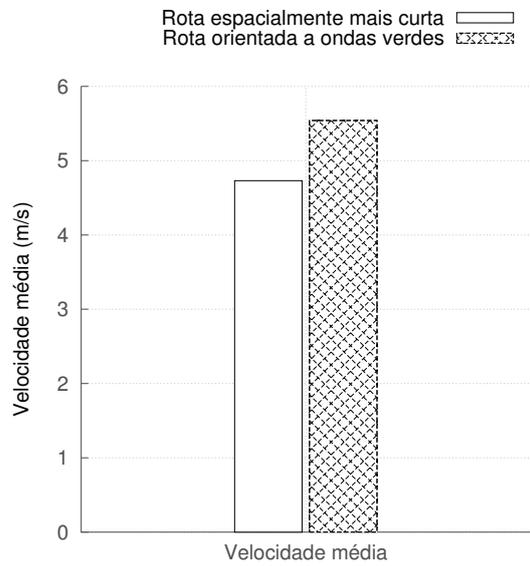


(d) Níveis de emissão de gases.

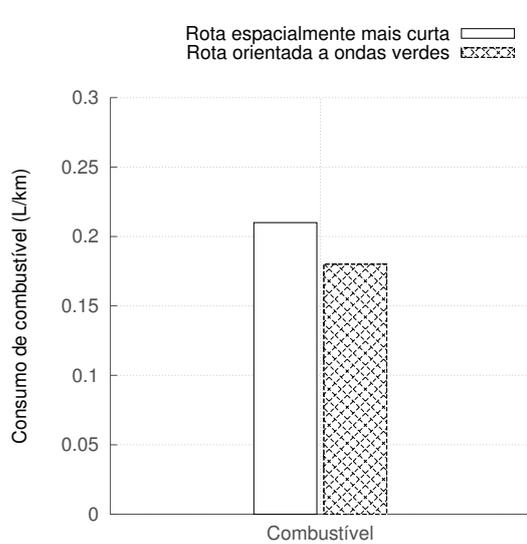
Figura 5.4: Resultados da comparação de desempenho das simulações com volume baixo entre a rota espacialmente mais curta e a rota orientada a ondas verdes.



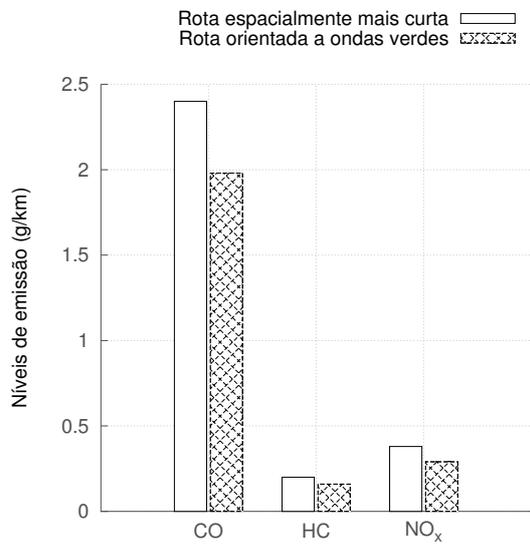
(a) Tempo médio de viagem e atraso médio.



(b) Velocidade média.

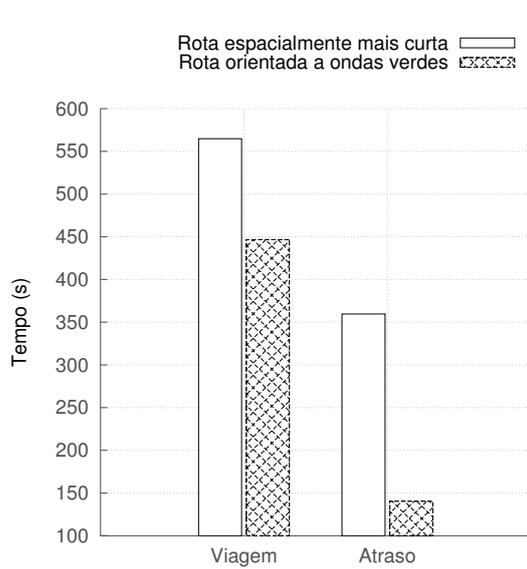


(c) Níveis de consumo de combustível.

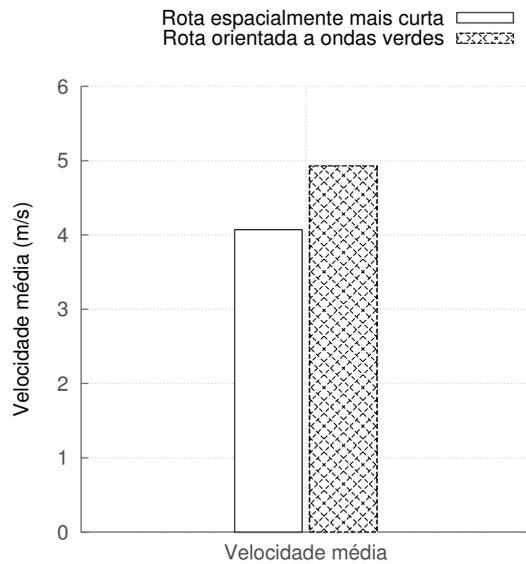


(d) Níveis de emissão de gases.

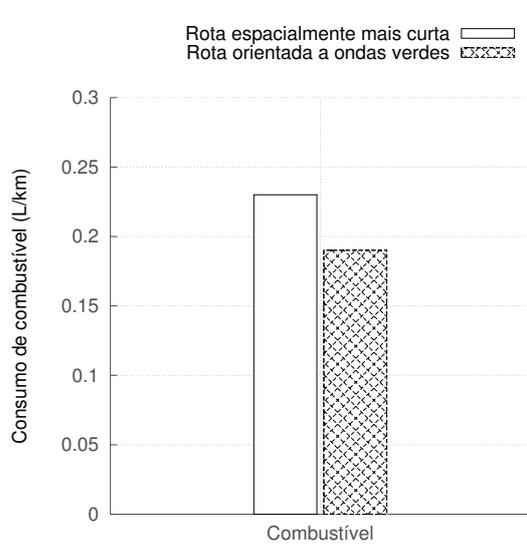
Figura 5.5: Resultados da comparação de desempenho das simulações com volume médio entre a rota espacialmente mais curta e a rota orientada a ondas verdes.



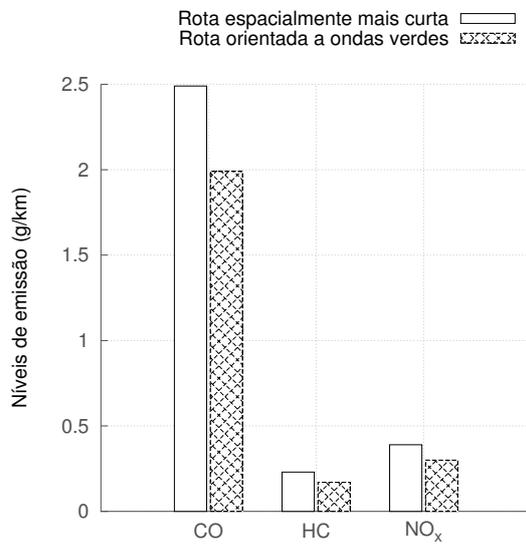
(a) Tempo médio de viagem e atraso médio.



(b) Velocidade média.



(c) Níveis de consumo de combustível.



(d) Níveis de emissão de gases.

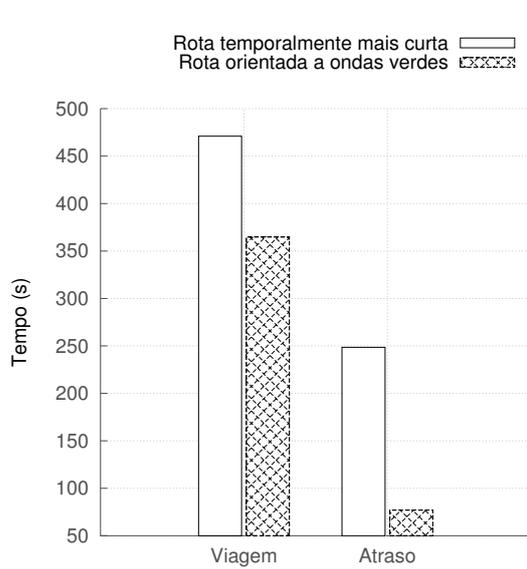
Figura 5.6: Resultados da comparação de desempenho das simulações com volume alto entre a rota espacialmente mais curta e a rota orientada a ondas verdes.

Comparação de Desempenho: Rota Temporalmente Mais Curta

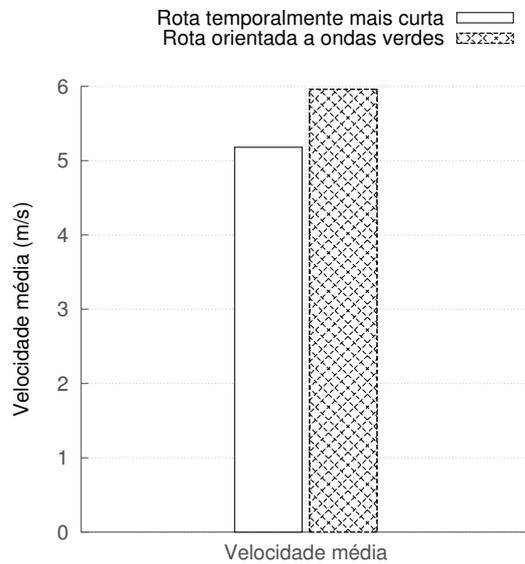
O desempenho do algoritmo de roteamento orientado a ondas verdes também deve ser avaliado e comparado ao do algoritmo de rota temporalmente mais curta, de forma análoga ao experimento anterior. Logo, foram realizados três experimentos nos quais os volumes utilizados foram o baixo, o médio e o alto. Os resultados destas simulações são apresentados na tabela 5.6 e também nas figuras 5.7, 5.8 e 5.9.

	Volumes		
	200/300 <i>vph</i>	300/450 <i>vph</i>	400/600 <i>vph</i>
Tempo médio de viagem (s)	470,96	566,42	495,13
Velocidade média (m/s)	5,18	4,38	4,36
Atraso médio (s)	248,59	350,54	293,87
Consumo de combustível (L/km)	0,20	0,22	0,22
Emissão de CO (g/km)	2,56	2,54	2,46
Emissão de HC (g/km)	0,19	0,22	0,21
Emissão de NO_x (g/km)	0,40	0,40	0,39

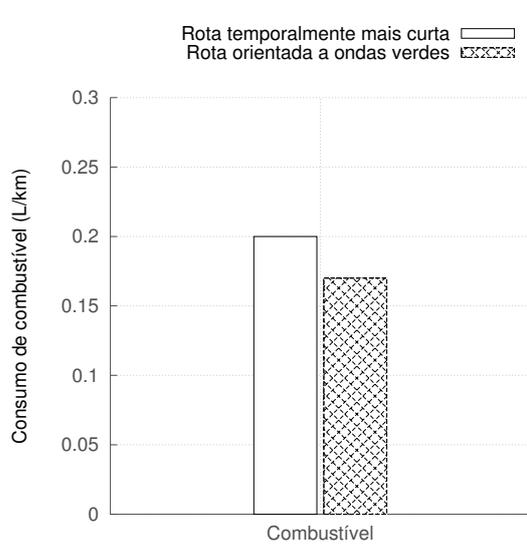
Tabela 5.6: Medidas de interesse para o algoritmo de rota temporalmente mais curta com volumes baixo, médio e alto.



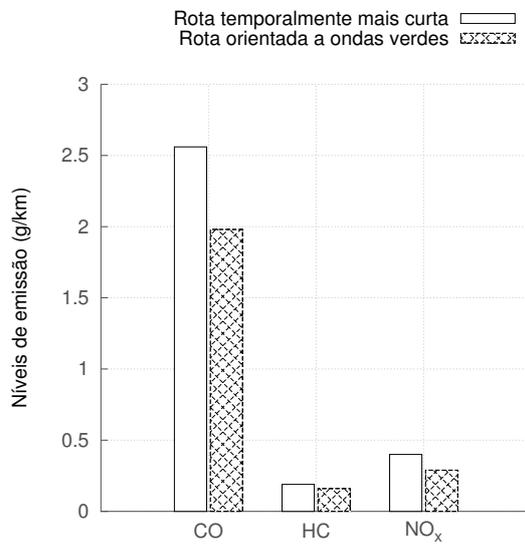
(a) Tempo médio de viagem e atraso médio.



(b) Velocidade média.

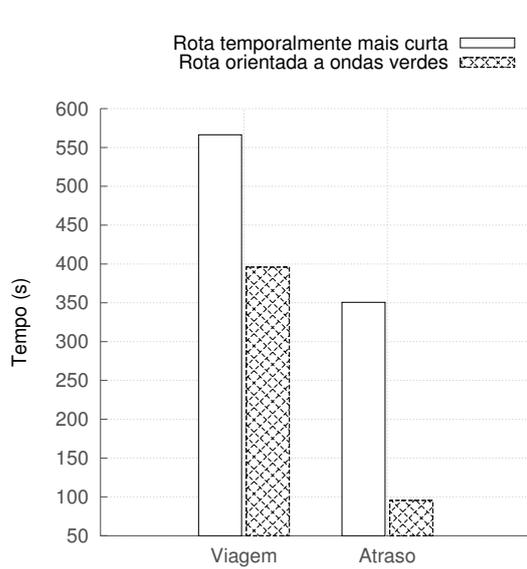


(c) Níveis de consumo de combustível.

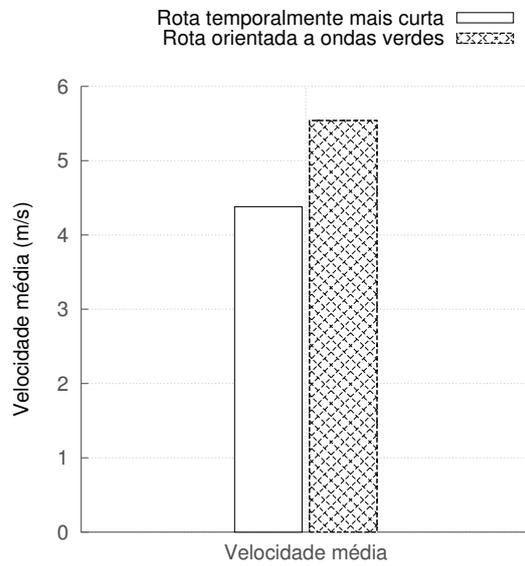


(d) Níveis de emissão de gases.

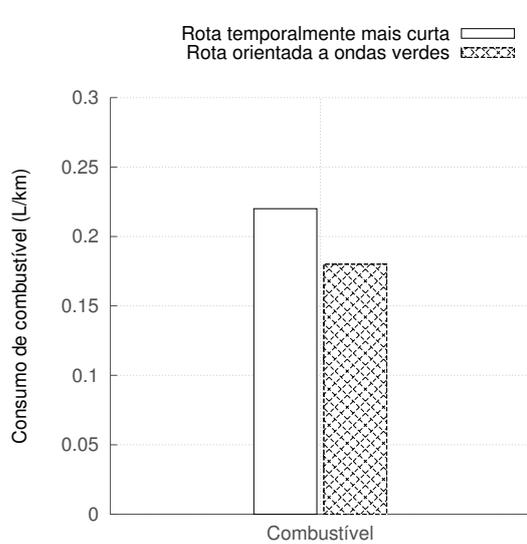
Figura 5.7: Resultados da comparação de desempenho das simulações com volume baixo entre a rota temporalmente mais curta e a rota orientada a ondas verdes.



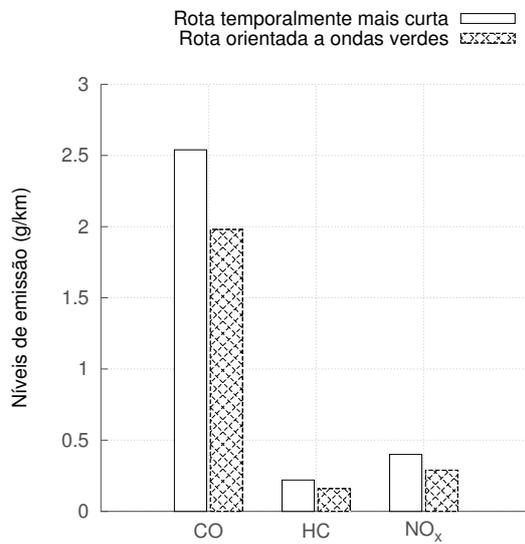
(a) Tempo médio de viagem e atraso médio.



(b) Velocidade média.

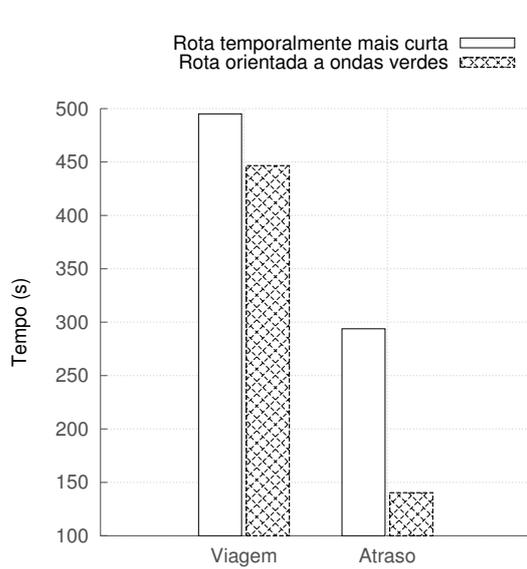


(c) Níveis de consumo de combustível.

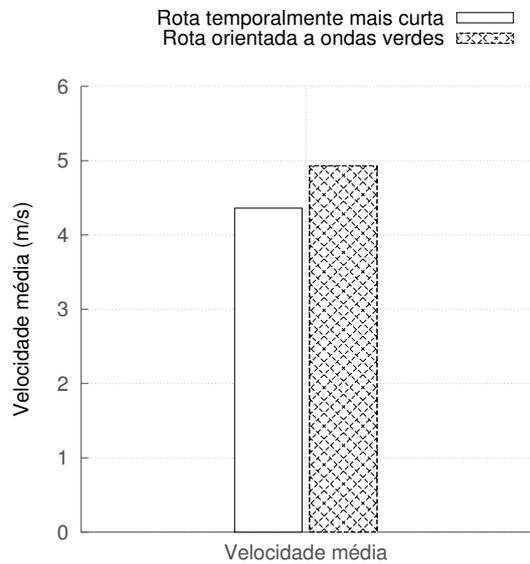


(d) Níveis de emissão de gases.

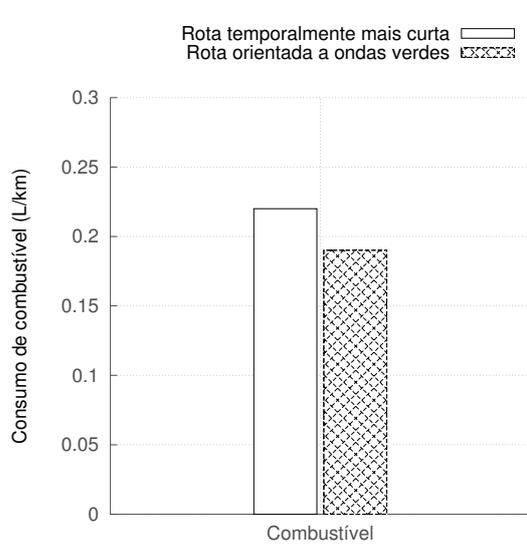
Figura 5.8: Resultados da comparação de desempenho das simulações com volume médio entre a rota temporalmente mais curta e a rota orientada a ondas verdes.



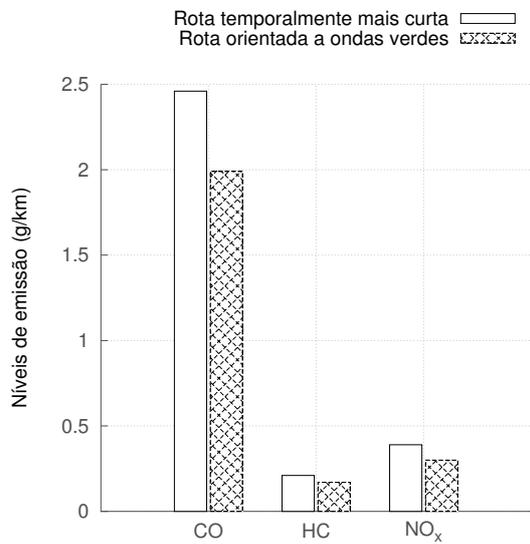
(a) Tempo médio de viagem e atraso médio.



(b) Velocidade média.



(c) Níveis de consumo de combustível.



(d) Níveis de emissão de gases.

Figura 5.9: Resultados da comparação de desempenho das simulações com volume alto entre a rota temporalmente mais curta e a rota orientada a ondas verdes.

Os resultados destes experimentos permitiram também a descoberta de um fenômeno que pode ter colaborado para os ganhos obtidos para as medidas de interesse. Foi observado que o algoritmo de roteamento orientado a ondas verdes oferece um melhor aproveitamento da capacidade do sistema rodoviário, pois os veículos evitam possíveis congestionamentos ao traçarem suas rotas levando em consideração a demanda de cada via a partir dos espaços reservados nas fases. Desta forma, surge espontaneamente um balanceamento de carga no sistema.

Para demonstrar este efeito, foram criados mapas de calor para os experimentos de volume alto realizados com os três algoritmos de roteamento testados. A medida considerada para colorir cada via foi a contagem de veículos, ou seja, a quantidade de veículos que atravessaram a via durante todo o tempo da simulação. Estes mapas de calor estão ilustrados nas figuras 5.10, 5.11 e 5.12. É possível observar que o mapa de calor da simulação do roteamento orientado a ondas verdes apresenta uma coloração mais homogênea, o que representa uma melhor distribuição dos fluxos no sistema.

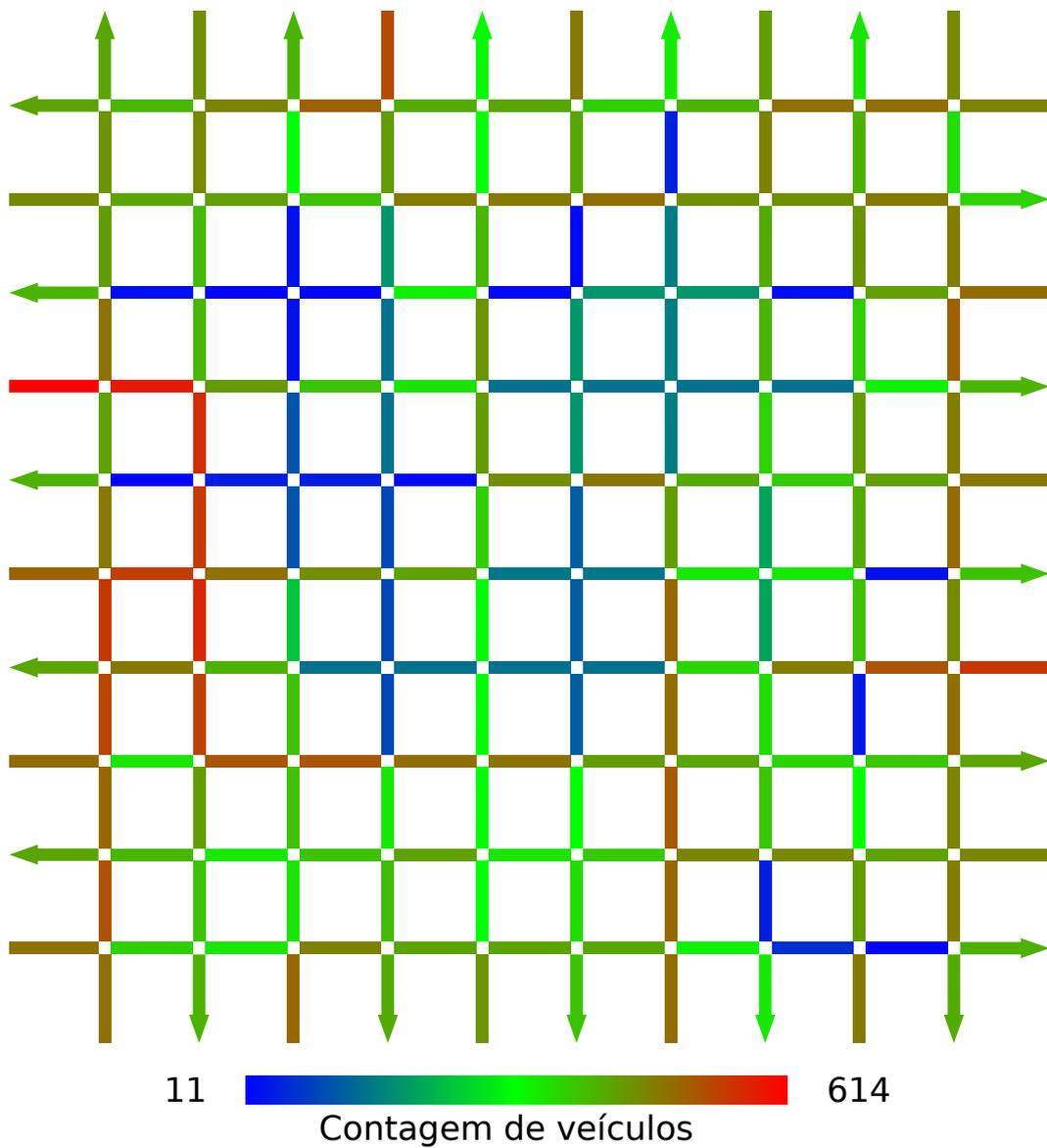


Figura 5.10: Mapa de calor da contagem de veículos na simulação do algoritmo de rota espacialmente mais curta com volume alto. As cores estão interpoladas em escala logarítmica.

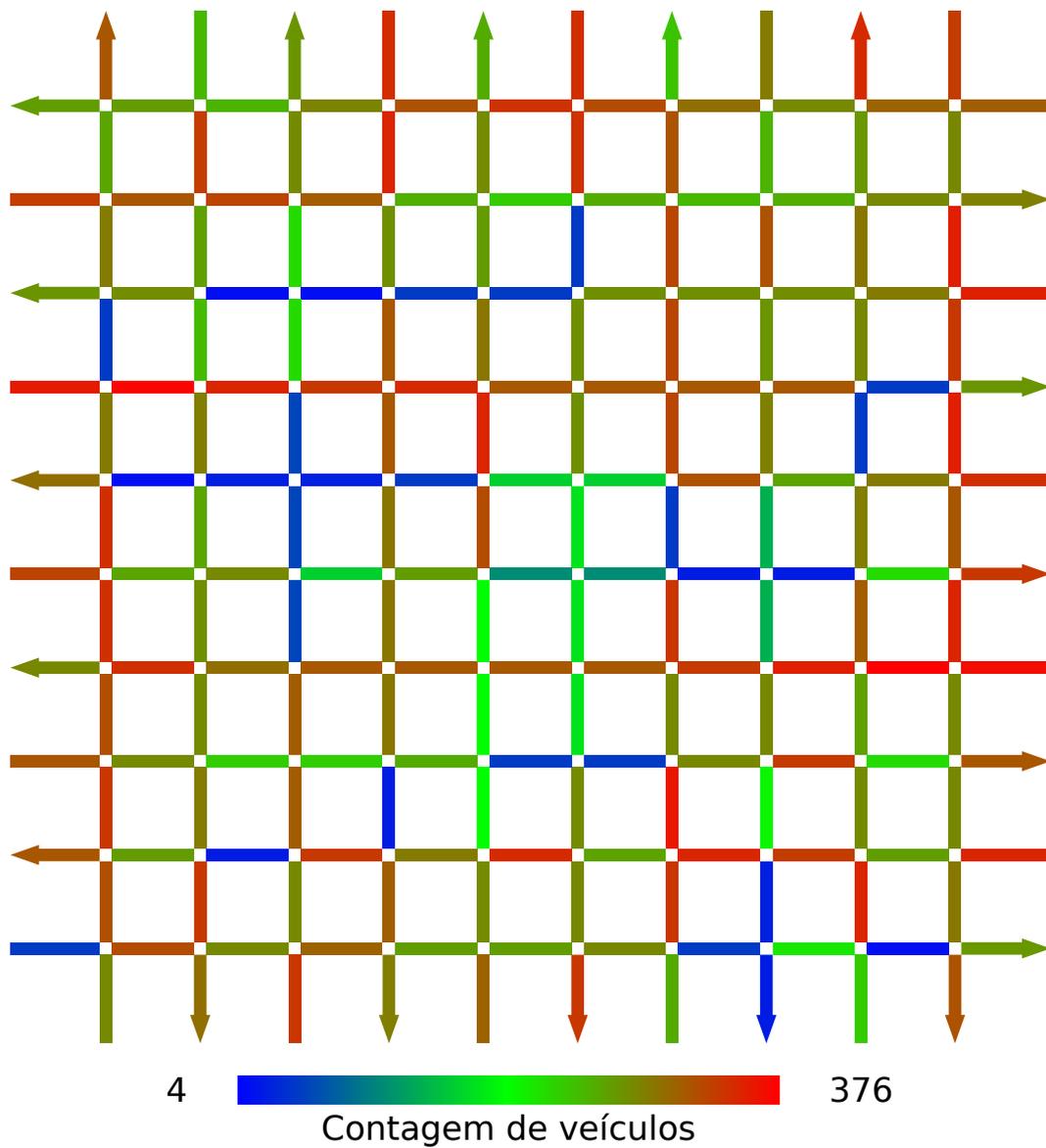


Figura 5.11: Mapa de calor da contagem de veículos na simulação do algoritmo de rota temporalmente mais curta com volume alto. As cores estão interpoladas em escala logarítmica.

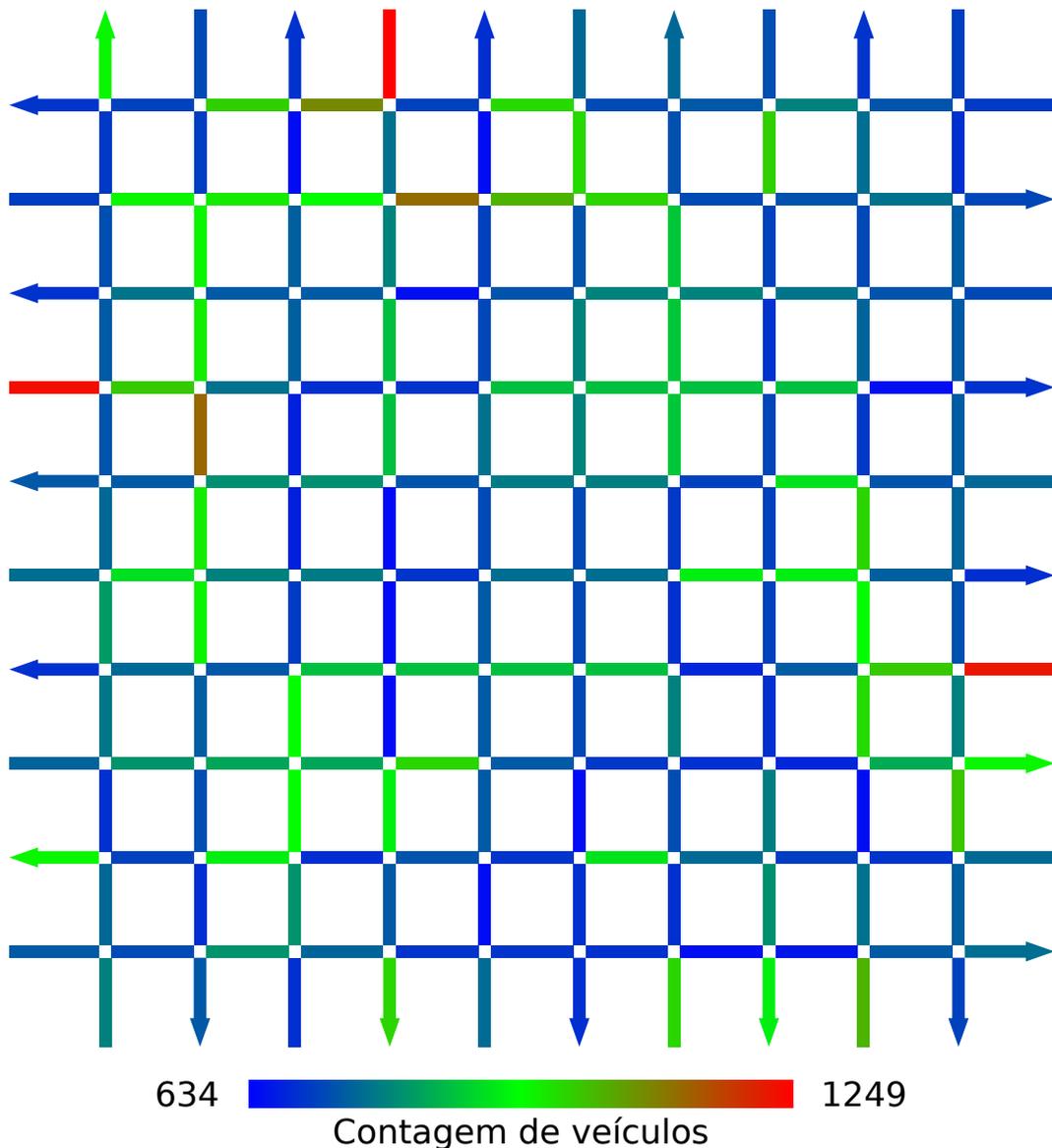


Figura 5.12: Mapa de calor da contagem de veículos na simulação do algoritmo de rota orientada a ondas verdes com volume alto. As cores estão interpoladas em escala logarítmica.

Também foi observado que os algoritmos de rota espacialmente e temporalmente mais curta estão mais vulneráveis ao surgimento de *deadlocks* em cenários de uma única faixa. Como não há, nestes algoritmos, um mecanismo que realize balanceamento de carga, as vias do cenário se tornam saturadas em poucas horas. Por conta disto, podem surgir dependências cíclicas de espaço nas vias. A figura 5.13 ilustra um exemplo no qual todos os veículos que encabeçam os pelotões querem virar à direita, porém, como não há espaço, nenhum pelotão pode se mover. Desta forma, veículos pertencentes aos pelotões que estão interessados em seguir em frente ficam também bloqueados. Isso não ocorreria em um cenário de múltiplas faixas, pois apenas nas faixas laterais seriam permitidas as conversões à direita e à esquerda.

Como efeito colateral, o algoritmo de roteamento inteligente confere ao sistema

uma maior resistência a situações de *deadlock*, como também uma capacidade de operar com volumes maiores.

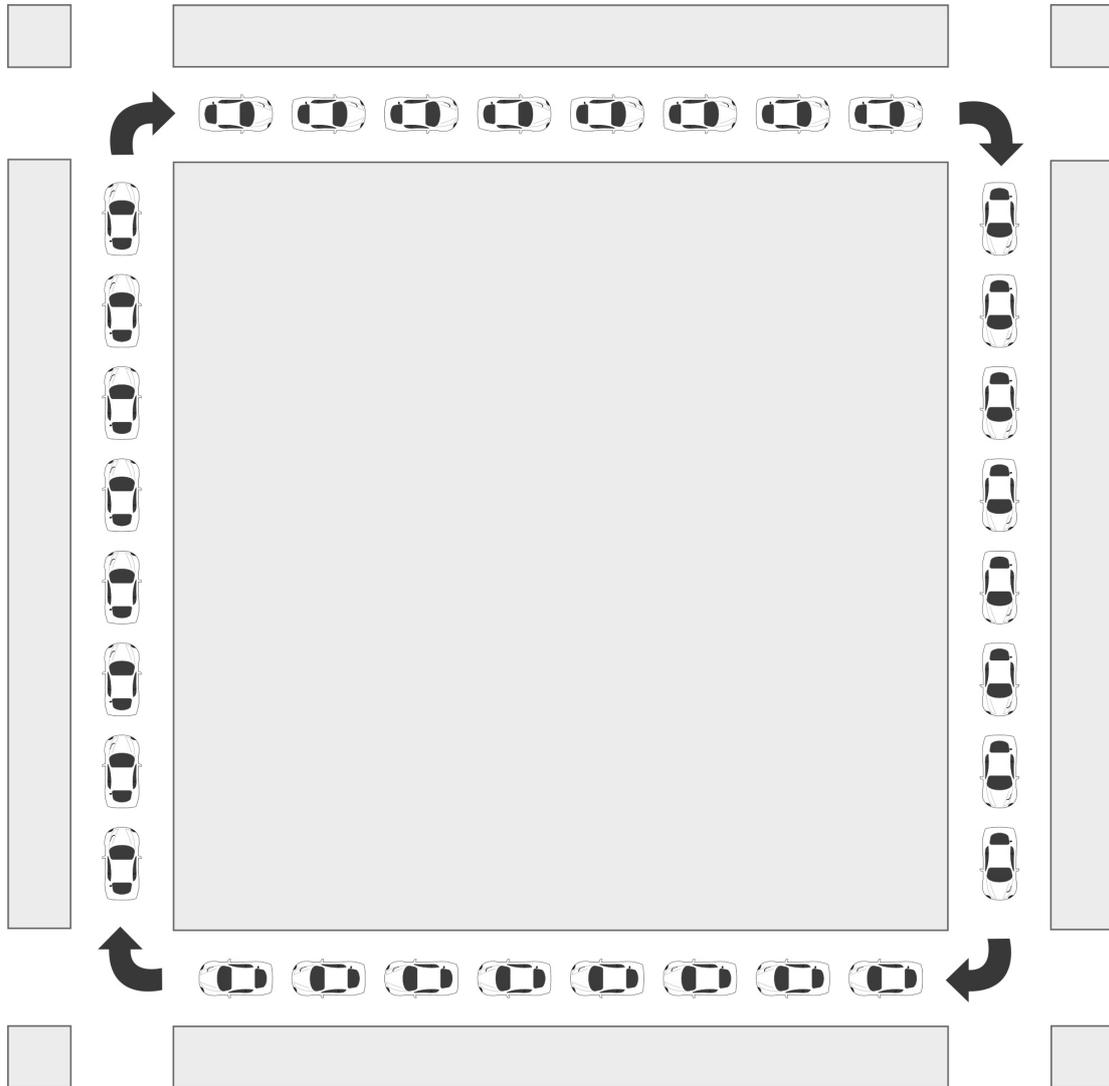


Figura 5.13: Deadlock.

5.2.2 Semáforos SMER

O desempenho do algoritmo de roteamento inteligente proposto neste trabalho foi avaliado também em cenários cujos semáforos operam com controladores e SMER. Entretanto, o uso destes controladores é mais apropriado em ambientes nos quais os volumes sejam variáveis para que haja a necessidade de reconfiguração dos tempos das fases, que ocorre de forma automática e periódica. Portanto, foram utilizados volumes que variam ao longo do tempo da simulação para cada interseção de entrada.

No MicroLAM, o volume de cada interseção de entrada é configurado de acordo com um intervalo. Este intervalo define os valores mínimo e máximo para o volume da sua respectiva interseção de entrada. Este volume irá variar ao longo do tempo e

de acordo com uma função senoidal. O comprimento do período desta senóide, em horas, também pode ser definido.

Os experimentos aqui descritos foram realizados por um período de duas horas. Foram também utilizados os volumes baixo, médio e alto, descritos na tabela 5.7. O comprimento do período utilizado para a senóide que oscila o volume entre os valores mínimo e máximo foi de duas horas.

Foram utilizados três corredores coordenados com SMER, descritos em maiores detalhes na seção 2.4.1. As vias que compõem estes corredores são três das quatro vias de maior velocidade, apresentadas na figura 5.1. A quarta via de maior velocidade não pôde ser utilizada, pois o coordenador SMER não admite que haja dependências cíclicas entre os corredores.

	Volumes ($[min, max]$)		
	Volume baixo	Volume médio	Volume alto
Vias de menor velocidade	[150, 200] <i>vph</i>	[225, 300] <i>vph</i>	[300, 400] <i>vph</i>
Vias de maior velocidade	[225, 300] <i>vph</i>	[338, 450] <i>vph</i>	[400, 600] <i>vph</i>

Tabela 5.7: Intervalos que definem os volumes variáveis utilizados nas simulações com semáforos SMER.

Dois grupos de experimentos foram realizados. No primeiro, o volume médio foi utilizado em todos os experimentos e variou-se apenas as durações dos intervalos entre as reconfigurações das fases dos semáforos e da prioridade dos corredores. No segundo, foi utilizado um tempo fixo para os intervalos de reconfiguração e avaliou-se o desempenho do algoritmo orientado a ondas verdes com os três volumes.

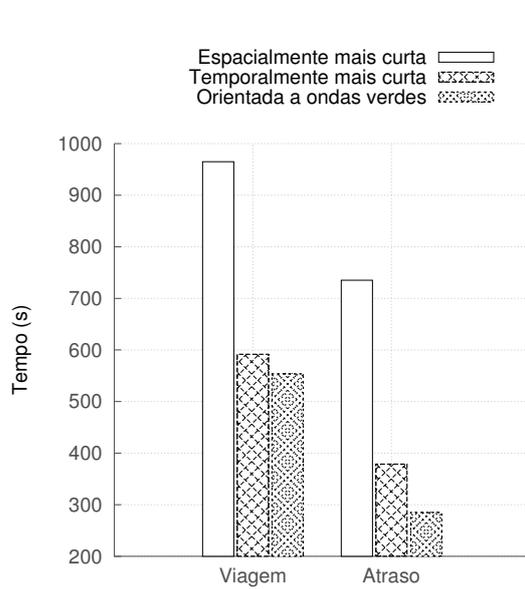
Volumes Fixos e Intervalos Variados entre as Reconfigurações dos Semáforos

Para os resultados apresentados a seguir, foi utilizado o volume médio definido na tabela 5.7. O primeiro experimento foi avaliar o desempenho do algoritmo de roteamento orientado a ondas verdes em relação aos demais quando um intervalo de 5 minutos é utilizado entre as reconfigurações dos controladores e coordenadores dos semáforos. Os valores resultantes para medidas de interesse após as simulações são detalhados na tabela 5.8. Para um melhor efeito de comparação, os gráficos da figura 5.14 ilustram estes mesmos resultados.

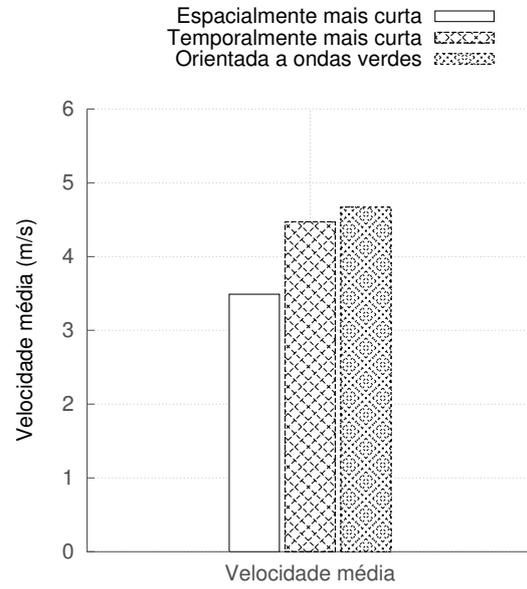
É possível observar que o algoritmo de roteamento inteligente levou vantagem em todas as medidas de interesse. Entretanto, o ganho no tempo médio de viagem não foi tão expressivo em relação ao algoritmo de rota temporalmente mais curta, que foi em torno de 10%, quando comparado com os experimentos anteriores.

	Tipos de rota		
	Espacialmente mais curta	Temporalmente mais curta	Orientada a ondas verdes
Tempo médio de viagem (<i>s</i>)	964,90	591,70	553,48
Velocidade média (<i>m/s</i>)	3,49	4,46	4,67
Atraso médio (<i>s</i>)	735,10	378,86	284,77
Consumo de combustível (<i>L/km</i>)	0,26	0,22	0,20
Emissão de CO (<i>g/km</i>)	2,84	2,59	2,18
Emissão de HC (<i>g/km</i>)	0,31	0,23	0,20
Emissão de NO_x (<i>g/km</i>)	0,44	0,41	0,33

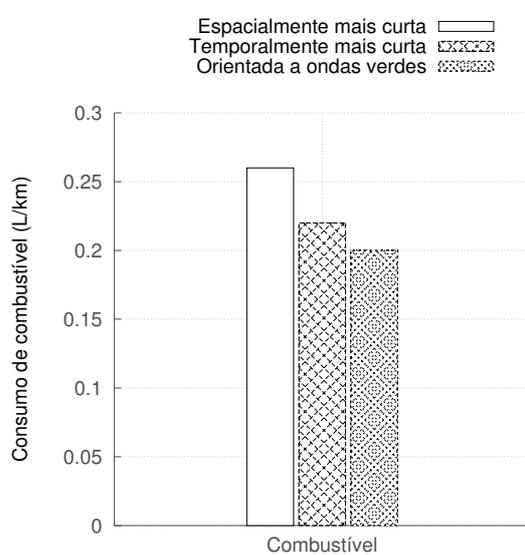
Tabela 5.8: Comparativo entre o desempenho das rotas espacialmente mais curta, temporalmente mais curta e orientada a ondas verdes em um cenário com semáforos SMER. O intervalo entre as reconfigurações das fases foi de 5 minutos.



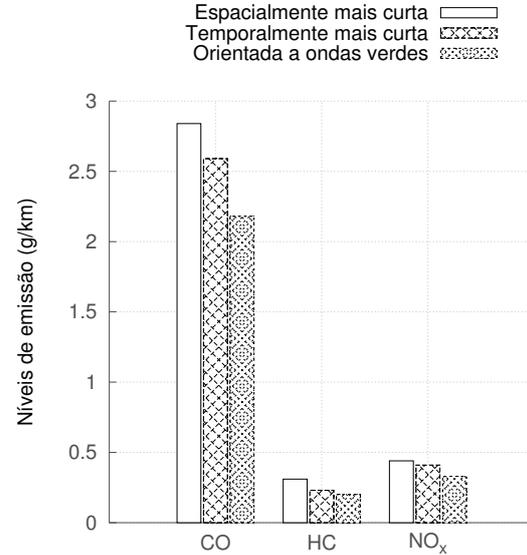
(a) Tempo médio de viagem e atraso médio.



(b) Velocidade média.



(c) Níveis de consumo de combustível.



(d) Níveis de emissão de gases.

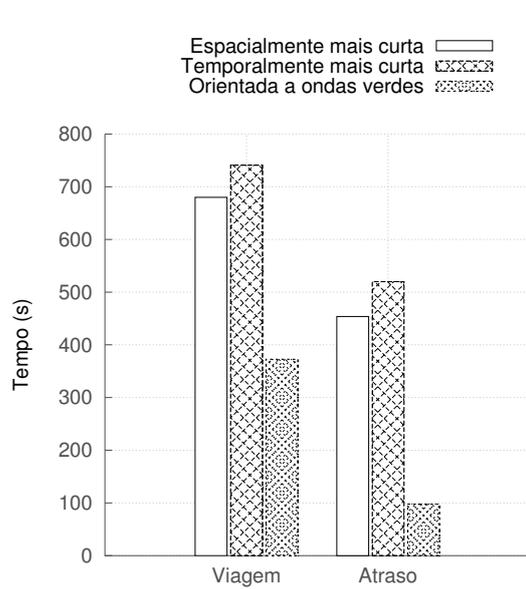
Figura 5.14: Resultados da comparação de desempenho das simulações com volume médio entre as rotas temporalmente mais curta, espacialmente mais curta e orientada a ondas verdes. O intervalo entre as reconfigurações das fases foi de 5 minutos.

O segundo experimento realizado foi bastante similar ao anterior e também utilizou a configuração de volume médio nas suas interseções de entrada. O intervalo entre as reconfigurações dos controladores e coordenadores SMER utilizado foi de 10 minutos, sendo este o único parâmetro que o difere do experimento anterior. Os resultados constam na tabela 5.9 e na figura 5.15.

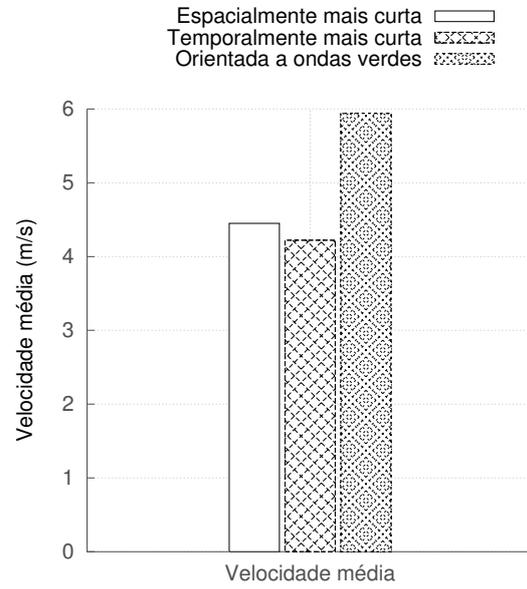
Neste experimento, os ganhos obtidos nas medidas de interesse pelo algoritmo de roteamento orientado a ondas verdes são mais expressivos do que no experimento anterior. O tempo de viagem foi reduzido a quase à metade e o atraso médio se mostrou mais de quatro vezes menor quando comparado à rota espacialmente mais curta.

	Tipos de rota		
	Espacialmente mais curta	Temporalmente mais curta	Orientada a ondas verdes
Tempo médio de viagem (<i>s</i>)	679,91	740,71	372,83
Velocidade média (<i>m/s</i>)	4,45	4,22	5,94
Atraso médio (<i>s</i>)	453,71	519,95	97,78
Consumo de combustível (<i>L/km</i>)	0,22	0,23	0,17
Emissão de CO (<i>g/km</i>)	2,51	2,76	1,99
Emissão de HC (<i>g/km</i>)	0,24	0,28	0,16
Emissão de NO_x (<i>g/km</i>)	0,40	0,43	0,30

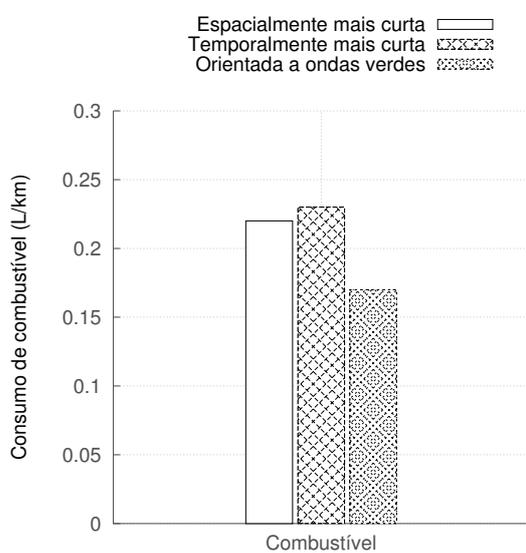
Tabela 5.9: Comparativo entre o desempenho das rotas espacialmente mais curta, temporalmente mais curta e orientada a ondas verdes em um cenário com semáforos SMER. O intervalo entre as reconfigurações das fases foi de 10 minutos.



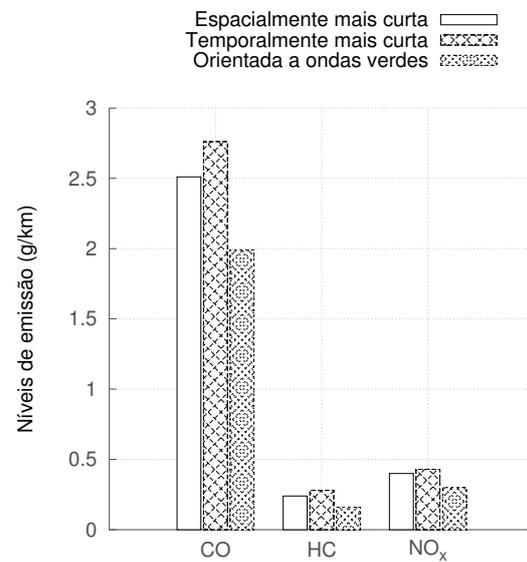
(a) Tempo médio de viagem e atraso médio.



(b) Velocidade média.



(c) Níveis de consumo de combustível.



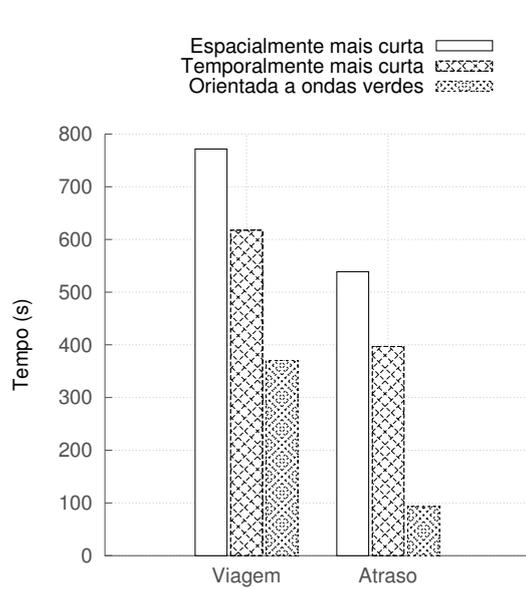
(d) Níveis de emissão de gases.

Figura 5.15: Resultados da comparação de desempenho das simulações com volume médio entre as rotas temporalmente mais curta, espacialmente mais curta e orientada a ondas verdes. O intervalo entre as reconfigurações das fases foi de 10 minutos.

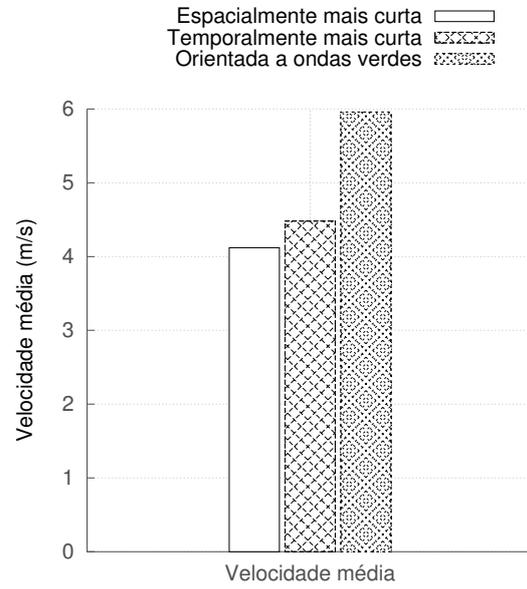
O último experimento com volume fixo utilizou um intervalo de 15 minutos entre as reconfigurações dos controladores e coordenadores de semáforos. A tabela 5.10 e a figura 5.16 apresentam os resultados obtidos a partir das simulações realizadas.

	Tipos de rota		
	Espacialmente mais curta	Temporalmente mais curta	Orientada a ondas verdes
Tempo médio de viagem (s)	771,67	617,38	370,50
Velocidade média (m/s)	4,12	4,48	5,96
Atraso médio (s)	538,60	396,93	93,24
Consumo de combustível (L/km)	0,23	0,22	0,17
Emissão de CO (g/km)	2,61	2,60	1,99
Emissão de HC (g/km)	0,26	0,24	0,16
Emissão de NO_x (g/km)	0,41	0,41	0,30

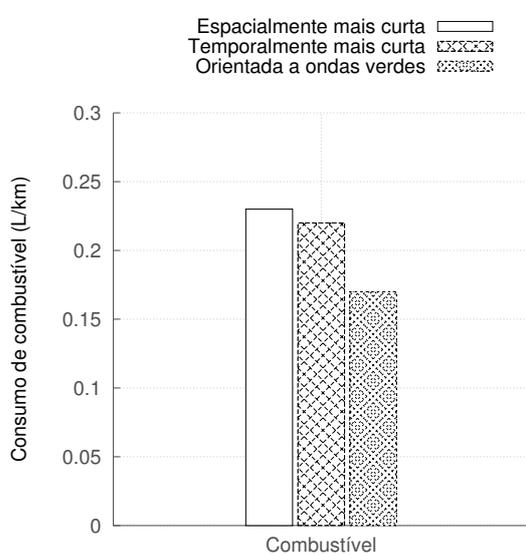
Tabela 5.10: Comparativo entre o desempenho das rotas espacialmente mais curta, temporalmente mais curta e orientada a ondas verdes em um cenário com semáforos SMER. O intervalo entre as reconfigurações das fases foi de 15 minutos.



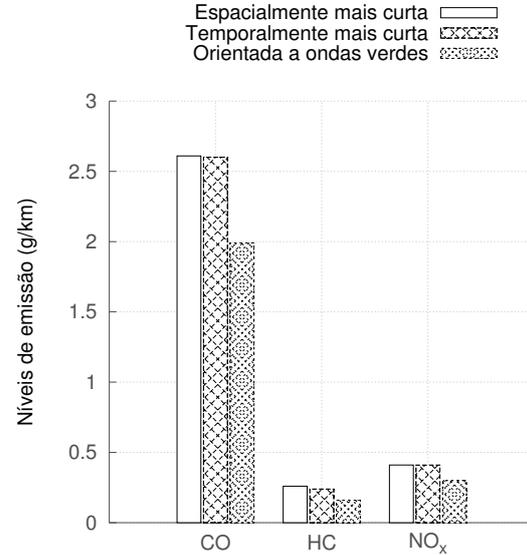
(a) Tempo médio de viagem e atraso médio.



(b) Velocidade média.



(c) Níveis de consumo de combustível.



(d) Níveis de emissão de gases.

Figura 5.16: Resultados da comparação de desempenho das simulações com volume médio entre as rotas temporalmente mais curta, espacialmente mais curta e orientada a ondas verdes. O intervalo entre as reconfigurações das fases foi de 15 minutos.

É possível observar que o algoritmo de roteamento orientado a ondas verdes obteve seus melhores resultados no último experimento, o qual utilizou um intervalo de 15 minutos entre as reconfigurações dos controladores e coordenadores. O segundo experimento teve o segundo melhor desempenho e o primeiro, o menor dos três. A partir destes resultados, pode-se afirmar que o algoritmo funciona melhor com intervalos maiores. Isso acontece porque à medida em que o intervalo aumenta, maior é a janela de previsibilidade dos estados dos semáforos. Desta forma, os veículos conseguem realizar uma maior fração das suas rotas (quando não as rotas inteiras) sem serem surpreendidos por novas temporizações nas fases dos sinais.

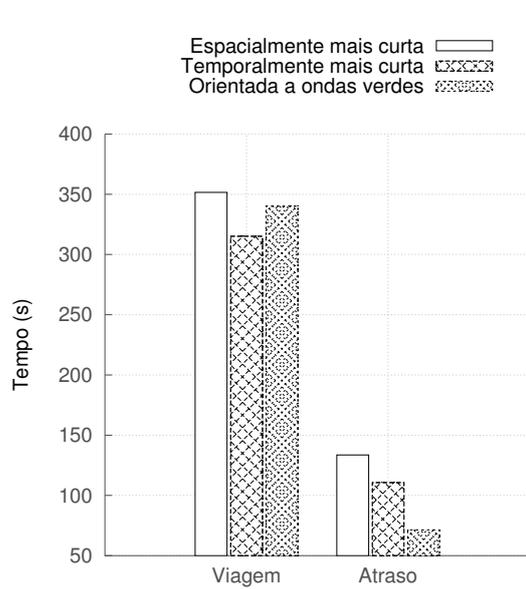
Volumes Variados e Intervalos Fixos entre as Reconfigurações dos Semáforos

Neste experimento, o intervalo entre as reconfigurações dos controladores e coordenadores de semáforos foi fixado em 10 minutos e os algoritmos de roteamento foram submetidos aos volumes baixo e alto. Um experimento com volume médio e com este mesmo intervalo já foi realizado e os seus resultados já foram apresentados na tabela 5.9 e na figura 5.15.

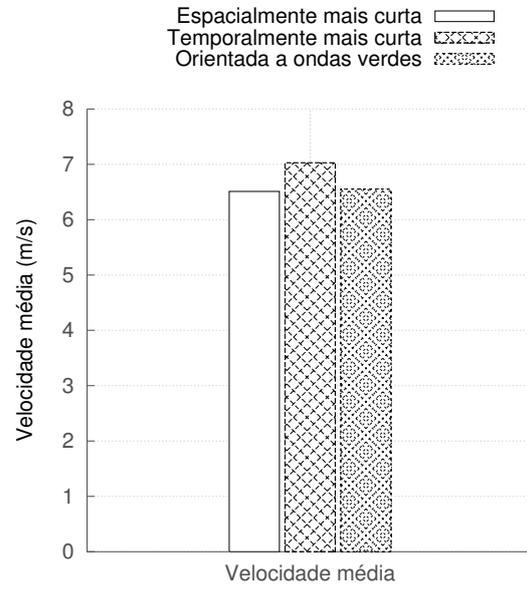
Os resultados obtidos nas simulações de volume baixo são detalhados na tabela 5.11. A figura 5.15 também apresenta os mesmos valores de forma gráfica.

	Tipos de rota		
	Espacialmente mais curta	Temporalmente mais curta	Orientada a ondas verdes
Tempo médio de viagem (s)	351,60	315,12	340,09
Velocidade média (m/s)	6,51	7,03	6,55
Atraso médio (s)	133,58	110,61	71,41
Consumo de combustível (L/km)	0,17	0,17	0,16
Emissão de CO (g/km)	2,28	2,36	1,97
Emissão de HC (g/km)	0,16	0,16	0,15
Emissão de NO_x (g/km)	0,36	0,38	0,29

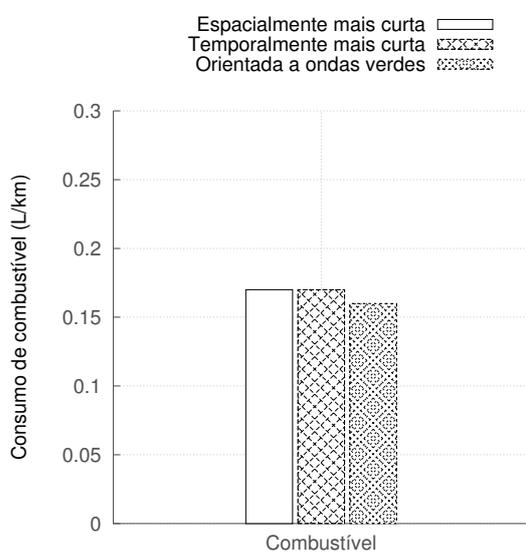
Tabela 5.11: Comparativo entre o desempenho das rotas espacialmente mais curta, temporalmente mais curta e orientada a ondas verdes em um cenário com semáforos SMER. Foi utilizada a configuração de volume baixo para estas simulações.



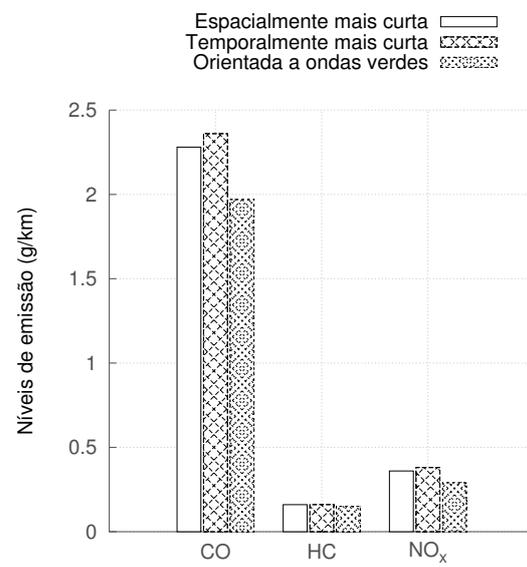
(a) Tempo médio de viagem e atraso médio.



(b) Velocidade média.



(c) Níveis de consumo de combustível.



(d) Níveis de emissão de gases.

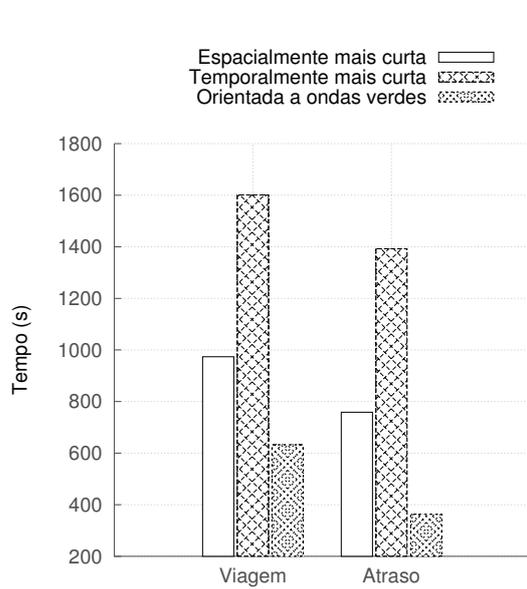
Figura 5.17: Resultados da comparação de desempenho das simulações com volume baixo entre as rotas temporalmente mais curta, espacialmente mais curta e orientada a ondas verdes.

O algoritmo de roteamento orientado a ondas verdes obteve vantagem em todas as medidas de interesse avaliadas, exceto no tempo de viagem, quando comparado ao algoritmo de rota temporalmente mais curta. Isso ocorre por conta do baixo volume aliado ao uso de semáforos SMER, nos quais há uma menor propensão para a formação de longas filas e de congestionamentos. Desta forma, o balanceamento de carga que o algoritmo de roteamento inteligente oferece acaba por não desempenhar um papel tão importante. Nestas circunstâncias, a escolha por vias de maior velocidade pode ser vantajosa em relação ao planejamento de rota orientado às fases dos semáforos, que se reconfiguram a cada 10 minutos.

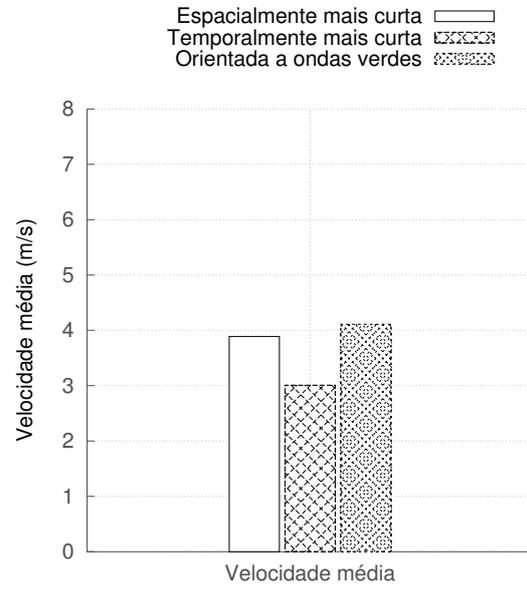
A seguir, são apresentados os resultados obtidos nas simulações que utilizaram o volume alto. É possível verificar que o algoritmo de roteamento inteligente levou vantagem sobre os demais neste último experimento. O tempo de viagem teve reduções a partir de 35% e o atraso médio foi reduzido em mais da metade.

	Tipos de rota		
	Espacialmente mais curta	Temporalmente mais curta	Orientada a ondas verdes
Tempo médio de viagem (<i>s</i>)	973,65	1600,97	632,02
Velocidade média (<i>m/s</i>)	3,89	3,01	4,11
Atraso médio (<i>s</i>)	758,55	1392,79	362,92
Consumo de combustível (<i>L/km</i>)	0,25	0,21	0,22
Emissão de CO (<i>g/km</i>)	3,00	3,88	2,26
Emissão de HC (<i>g/km</i>)	0,34	0,52	0,22
Emissão de NO_x (<i>g/km</i>)	0,47	0,59	0,34

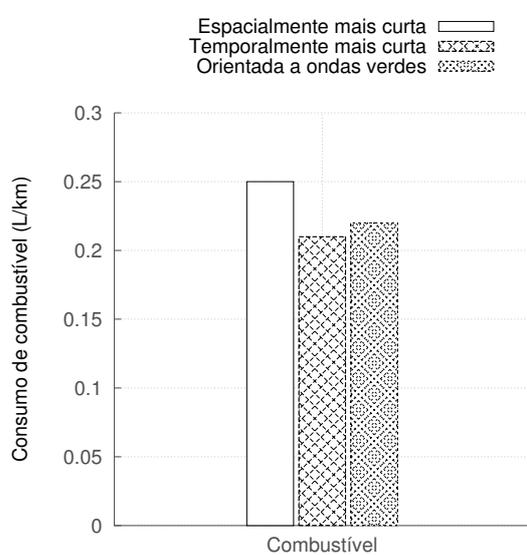
Tabela 5.12: Comparativo entre o desempenho das rotas espacialmente mais curta, temporalmente mais curta e orientada a ondas verdes em um cenário com semáforos SMER. Foi utilizada a configuração de volume alto para estas simulações.



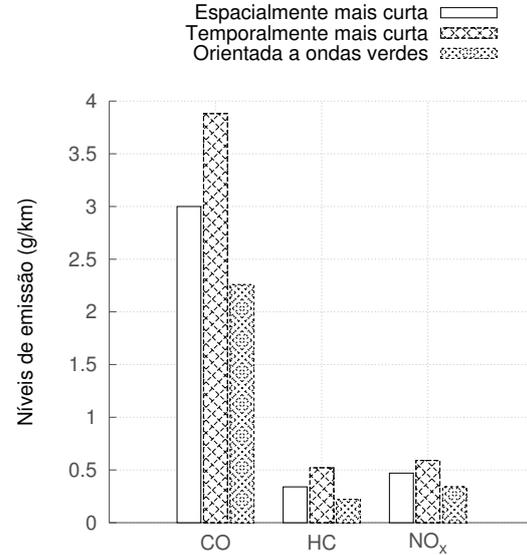
(a) Tempo médio de viagem e atraso médio.



(b) Velocidade média.



(c) Níveis de consumo de combustível.



(d) Níveis de emissão de gases.

Figura 5.18: Resultados da comparação de desempenho das simulações com volume alto entre as rotas temporalmente mais curta, espacialmente mais curta e orientada a ondas verdes.

Capítulo 6

Conclusões e Trabalhos Futuros

Neste trabalho, foi apresentado um algoritmo para traçar rotas de veículos em função das temporizações nas fases dos semáforos, de forma a garantir um bom aproveitamento das ondas verdes para minimizar o tempo de viagem, o atraso, o consumo de combustível e os níveis de emissão de gases poluentes. Foram também propostas extensões ao IDM de modo a garantir que o veículo tenha um perfil de aceleração mais uniforme, requisito necessário para assegurar o compromisso de viajar nos tapetes verdes, evitando paradas desnecessárias.

O desempenho da solução proposta foi avaliado juntamente com os algoritmos de rota espacialmente e temporalmente mais curta em redes fechadas com semáforos de tempo fixo e inteligentes SMER. Foi possível constatar que o algoritmo de roteamento orientado a ondas verdes apresentou ganhos substanciais em todos os casos e em quase todas as medidas de interesse avaliadas.

Descobriu-se também uma propriedade inerente a este algoritmo que proporciona naturalmente um balanceamento de carga no sistema, promovendo assim uma melhor distribuição de veículos ao longo das vias de todo o cenário. Isso evita a formação de pontos de gargalo e permite que o sistema opere com volumes maiores.

6.1 Trabalhos Futuros

O algoritmo de roteamento proposto se mostrou promissor e cria possibilidades para que seja dada continuidade a este trabalho, permitindo que sejam realizadas validações ainda mais rigorosas a partir de experimentos cujos parâmetros possam representar o mundo real com uma fidelidade ainda maior. A seguir, serão apresentadas algumas sugestões que ajudarão a concretizar estes novos experimentos.

6.1.1 Suporte a Múltiplas Faixas

O MicroLAM pode ser estendido para permitir a construção e a simulação de cenários com vias de múltiplas faixas. Durante o desenvolvimento da sua dissertação de mestrado, Gouvêa [25] deu início a esta implementação, que já se mostra funcional. Entretanto, ainda não foram implementados modelos de motorista que permitam que os veículos mudem de uma faixa para a outra. No contexto do trabalho aqui apresentado, este recurso é indispensável, pois sem ele, apenas os veículos que estiverem viajando na faixa mais à esquerda ou mais à direita das vias poderão realizar curvas nos sentidos das faixas que estão. Desta forma, os veículos não terão meios de se manter nas rotas por eles planejadas ao longo da viagem e não conseguirão chegar aos seus respectivos pontos de destino.

6.1.2 Pontos Intermediários de Origem e Destino

Na implementação atual, os únicos pontos pelos quais os veículos entram e saem do sistema são as interseções de entrada e saída. Entretanto, esta abordagem não abrange todas as maneiras em que os usuários dos sistemas de transporte rodoviário se deslocam. Os cenários que o MicroLAM suporta atualmente não contemplam entradas e saídas de veículos posicionadas no meio de quarteirões. Portanto, garagens e estacionamentos ainda não podem ser modelados.

Esta funcionalidade, quando implementada, permitirá que o algoritmo de roteamento orientado a ondas verdes seja avaliado em cenários cujas dinâmicas de movimentação urbana sejam mais realistas, pois os pontos de partida e de chegada não estarão restritos às extremidades do cenário.

6.1.3 Experimentos em Cenários Urbanos Reais

Neste trabalho, utilizou-se apenas redes fechadas para avaliar o algoritmo de roteamento orientado a ondas verdes. Há ainda o interesse em realizar experimentos em cenários urbanos de cidades reais. Entretanto, representar cidades inteiras em XML para utilizá-los no MicroLAM é uma tarefa praticamente inviável, pois seriam necessárias centenas de milhares de linhas, todas elas escritas manualmente.

O *Open Street Map* [26] é uma plataforma colaborativa na qual os seus usuários podem enriquecer as informações de um mapa que abrange todo o mundo. A sua base de dados contempla uma série de informações sobre a estrutura rodoviária de uma cidade, como por exemplo, as ruas com suas respectivas faixas e limites de velocidade, cruzamentos e semáforos. Todas estas informações são públicas, abertas e exportáveis.

A criação de uma ferramenta que permita converter mapas exportados do *Open*

Street Map para o formato aceito pelo MicroLAM viabilizaria a realização de experimentos em cenários mais realistas. O algoritmo de roteamento inteligente proposto neste trabalho, bem como os efeitos que lhe são inerentes, entre eles a redução do tempo de viagem, atraso, consumo de combustível, emissão de gases e também o balanceamento de carga poderiam ser avaliados em qualquer cenário urbano existente.

Referências Bibliográficas

- [1] DE PAIVA, L. M. *Controle Distribuído de Tráfego com Fluxos Heterogêneos*. Tese de Mestrado, COPPE-UFRJ, 2012.
- [2] *1º Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários*. Relatório técnico, Ministério do Meio Ambiente, 2011.
- [3] *Pesquisa CNI-IBOPE: Retratos da Sociedade Brasileira: Locomoção Urbana*. Relatório técnico, Confederação Nacional da Indústria, 2011.
- [4] “68% dos paulistanos levam até uma hora para ir de casa ao trabalho”. 2013. Disponível em: <<http://www.ibope.com.br/pt-br/noticias/Paginas/68-dos-paulistanos-levam-ate-uma-hora-para-ir-de-casa-ao-trabalho.aspx>>. Acesso em 3 de setembro de 2013.
- [5] “Programas de Controle de Emissões Veiculares”. 2013. Disponível em: <<http://www.ibama.gov.br/areas-tematicas-qa/programa-proconve>>. Acesso em 3 de setembro de 2013.
- [6] CHOWDHURY, M., SADEK, A. *Fundamentals of Intelligent Transportation Systems Planning*. 685 Canton Street, Norwood, MA 02062, Artech House Publishers, 2003.
- [7] TREIBER, M., HENNECKE, A., HELBING, D. “Congested traffic states in empirical observations and microscopic simulations”, *Physical Review E*, v. 62, n. 2, pp. 1805, 2000.
- [8] CHEN, Y.-L., YANG, H.-H. “Shortest paths in traffic-light networks”, *Transportation Research Part B: Methodological*, v. 34, n. 4, pp. 241–253, 2000.
- [9] DIJKSTRA, E. W. “A note on two problems in connexion with graphs”, *Numerische mathematik*, v. 1, n. 1, pp. 269–271, 1959.
- [10] AHN, K., RAKHA, H. “The effects of route choice decisions on vehicle energy consumption and emissions”, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, v. 13, n. 3, pp. 151–167, 2008.

- [11] SANCHEZ, M., CANO, J.-C., KIM, D. “Predicting traffic lights to improve urban traffic fuel consumption”. In: *ITS Telecommunications Proceedings, 2006 6th International Conference on*, pp. 331–336. IEEE, 2006.
- [12] ASADI, B., VAHIDI, A. “Predictive cruise control: Utilizing upcoming traffic signal information for improving fuel economy and reducing trip time”, *Control Systems Technology, IEEE Transactions on*, v. 19, n. 3, pp. 707–714, 2011.
- [13] ROESS, R. P., PRASSAS, E. S., MCSHANE, W. R. *Traffic Engineering*. 3 ed. Upper Saddle River, New Jersey, Prentice Hall, 2004.
- [14] BARBOSA, V. C., GAFNI, E. “Concurrency in heavily loaded neighborhood-constrained systems”, *ACM Trans. Program. Lang. Syst.*, v. 11, n. 4, pp. 562–584, out. 1989. ISSN: 0164-0925. doi: 10.1145/69558.69560. Disponível em: <<http://doi.acm.org/10.1145/69558.69560>>.
- [15] BARBOSA, V., BENEVIDES, M., FRANCA, F., et al. “Sharing resources at nonuniform access rates”, *Theory of Computing Systems*, v. 34, n. 1, pp. 13–26, 2001.
- [16] DALLMEYER, J., TAUBERT, C., LATTNER, A. D., et al. “Fuel Consumption and Emission Modeling for Urban Scenarios”. In: *Proceedings of the 26th EUROPEAN Conference on Modelling and Simulation*, pp. 567–573, 2012.
- [17] AHN, K., RAKHA, H., TRANI, A., et al. “Estimating vehicle fuel consumption and emissions based on instantaneous speed and acceleration levels”, *Journal of Transportation Engineering*, v. 128, n. 2, pp. 182–190, 2002.
- [18] POST, K., KENT, J., TOMLIN, J., et al. “Fuel consumption and emission modelling by power demand and a comparison with other models”, *Transportation Research Part A: General*, v. 18, n. 3, pp. 191–213, 1984.
- [19] BIGGS, D., OTHERS. “Models for estimation of car fuel consumption in urban traffic”, *ITE J.:(United States)*, v. 56, n. 7, 1986.
- [20] WEST, B. H., MCGILL, R. N., HODGSON, J. W., et al. *Development of Data-Based Light-Duty Modal Emissions and Fuel Consumption Models*. Oct 1997. doi: 10.4271/972910. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.4271/972910>>.
- [21] AHN, K. *Microscopic Fuel Consumption and Emission Modeling*. Tese de Mestrado, Virginia Polytechnic Institute and State University, 1998.

- [22] *Highway Capacity Manual*. Washington, DC, U.S. Transportation Research Board, 2000.
- [23] BRACKSTONE, M., MCDONALD, M. “Car-following: a historical review”, *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, v. 2, n. 4, pp. 181–196, 1999.
- [24] KRAFT, W. H., HOMBURGER, W. S., PLINE, J. L. *Traffic Engineering Handbook*. 1099 14th Street, NW, Suite 300 West, Washington, DC 20005 USA, Institute of Transportation Engineers, 2009.
- [25] GOUVÊA, D. D. *Microssimulação da Zona do Dilema*. Tese de Mestrado, COPPE-UFRJ, 2013.
- [26] HAKLAY, M. M., WEBER, P. “OpenStreetMap: User-Generated Street Maps”, *IEEE Pervasive Computing*, v. 7, n. 4, pp. 12–18, out. 2008. ISSN: 1536-1268. doi: 10.1109/MPRV.2008.80. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1109/MPRV.2008.80>>.
- [27] WIDODO, S., HASEGAWA, T., TSUGAWA, S. “Vehicle fuel consumption and emission estimation in environment-adaptive driving with or without inter-vehicle communications”. In: *Intelligent Vehicles Symposium, 2000. IV 2000. Proceedings of the IEEE*, pp. 382–386. IEEE, 2000.
- [28] LYONS, T., KENWORTHY, J., AUSTIN, P., et al. “The development of a driving cycle for fuel consumption and emissions evaluation”, *Transportation Research Part A: General*, v. 20, n. 6, pp. 447–462, 1986.
- [29] GRID-IA. “Grid-IA”. Disponível em: <<http://grid-ia.cos.ufrj.br:32593/>>. Acesso em 22 de agosto de 2013.
- [30] OAR. “OAR”. Disponível em: <<http://oar.imag.fr/>>. Acesso em 22 de agosto de 2013.
- [31] *Qualidade do Ar no Estado de São Paulo*. Relatório técnico, Companhia Ambiental do Estado de São Paulo, 2012.