



## CONTROLE DISTRIBUÍDO DE TRÁFEGO COM FLUXOS HETEROGÊNEOS

Lúcio Martins de Paiva

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.

Orientador: Felipe Maia Galvão França

Rio de Janeiro  
Setembro de 2012

# CONTROLE DISTRIBUÍDO DE TRÁFEGO COM FLUXOS HETEROGÊNEOS

Lúcio Martins de Paiva

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. Adilson Elias Xavier, D.Sc.

---

Prof. Antonio Alfredo Ferreira Loureiro, Ph.D.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL  
SETEMBRO DE 2012

Paiva, Lúcio Martins de

Controle Distribuído de Tráfego com Fluxos Heterogêneos/Lúcio Martins de Paiva. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2012.

XIV, 110 p.: il.; 29, 7cm.

Orientador: Felipe Maia Galvão França

Dissertação (mestrado) – UFRJ/COPPE/Programa de Engenharia de Sistemas e Computação, 2012.

Referências Bibliográficas: p. 80 – 83.

1. Controle de tráfego. 2. Sistemas Inteligentes de Transporte. 3. Escalonamento por Reversão de Múltiplas Arestas. I. França, Felipe Maia Galvão. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia de Sistemas e Computação. III. Título.

*“Todo conhecimento advém de  
uma série de peripécias”*

# Agradecimentos

Um agradecimento aos meus pais, Laura e Aridio, por terem me ajudado a chegar até aqui – e por todas as viagens que fizemos juntos.

Aos meus avós Joaquim, Júlia, Waltencyr e Ignez, pelas histórias, bons valores e sabedoria transmitidos.

À Priscila, uma pessoa realmente especial que tive a sorte de encontrar nesta vida – por tudo que vivemos até aqui, e por tudo que vamos viver daqui pra frente.

Aos amigos do BoaLista, pela compreensão e ajuda que me deram nos momentos finais deste trabalho, além do companheirismo diário: Bernardo, Bruno França, Bruno Goyanna, Daniel, Fabio Freitas, Fabio Souza, Flavio, Geninho, Horácio, Julinho, Pap e Roberto.

A todos os amigos que fiz no PESC, e também aos grandes amigos que trouxe do DCC. Ao Gabriel, que também abraçou a causa do trânsito e que está dividindo comigo os momentos finais desta saga. Um agradecimento especial ao Sardinha; pelas letras do Raul, pela “prestação que vai vencer” e, principalmente, por me servir como memória externa durante todos esses anos.

Aos professores Adilson e Loureiro, um agradecimento especial pela compreensão frente às minhas *peripécias* durante a reta final.

Ao Felipe, sem o qual este trabalho não seria possível; pela constante simpatia e por ter me salvado de algumas boas enrascadas... e, claro, por me ensinar a reverter arestas!

Ao CNPq, pela bolsa de estudo concedida durante minha estadia no PESC.

A todas as pessoas que fazem o PESC ser o que ele é; por todos os serviços prestados e por todo o aprendizado concedido.

Às comunidades do L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X, gnuplot, bash, awk, sed, perl, wget... – sem as quais meu trabalho teria sido muito mais difícil.

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

## CONTROLE DISTRIBUÍDO DE TRÁFEGO COM FLUXOS HETEROGÊNEOS

Lúcio Martins de Paiva

Setembro/2012

Orientador: Felipe Maia Galvão França

Programa: Engenharia de Sistemas e Computação

Em uma rede de sinais de trânsito, o correto ajuste dos tempos das fases é crucial para um aproveitamento eficiente da infraestrutura disponível para o tráfego de veículos. Sinais descoordenados são um problema muito comum encontrado nas redes viárias urbanas e ainda não há uma solução definitiva para a questão. Além disso, os controladores de sinais tradicionalmente utilizados nas cidades não estão devidamente preparados para lidar com as variações nas condições do tráfego ao longo do dia.

Como proposta para resolver o problema, são apresentados neste trabalho dois mecanismos baseados em técnicas de Sistemas Inteligentes de Transporte (ITS) aliadas ao modelo de Escalonamento de Reversão de Múltiplas Arestas (SMER).

O primeiro mecanismo proposto tem o intuito de controlar uma interseção sinalizada isoladamente e, através de sensores nas vias de chegada, é capaz de recalcular os tempos de verde de cada fase para que estas se adequem às condições atuais do tráfego.

O segundo mecanismo trata do caso de uma rede de sinais numa via que precisam trabalhar em cooperação para garantir um fluxo eficiente de pelotões de veículos, de modo que eles não sejam interrompidos durante a travessia. O mecanismo garante o funcionamento ininterrupto deste corredor, até mesmo quando ele concorre por interseções com outros corredores também coordenados, buscando ainda priorizar aqueles com maior volume de tráfego.

A operação dos dois mecanismos é avaliada no MicroLAM, um simulador de trânsito construído como parte do trabalho desta dissertação. Os resultados são analisados para avaliação de desempenho dos sistemas propostos.

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

## DISTRIBUTED TRAFFIC CONTROL WITH HETEROGENEOUS FLOWS

Lúcio Martins de Paiva

September/2012

Advisor: Felipe Maia Galvão França

Department: Systems Engineering and Computer Science

In a network of traffic signals, the correct adjustment of the signal phase timings is crucial for an efficient utilization of the available infrastructure to vehicle traffic. Uncoordinated signals are a very common problem encountered in urban roads and there is still no definitive solution to the issue. Furthermore, signal controllers traditionally used in cities are not properly prepared to handle variations in traffic conditions throughout the day.

As a proposal to solve the problem, two mechanisms are presented in this paper which are based on Intelligent Transportation Systems (ITS) techniques coupled with the Scheduling of Multiple Edge Reversal (SMER) model.

The first proposed mechanism is intended to control an isolated signalized intersection, and, using sensors in the incoming roads, it is able to recalculate the green times of each phase maintaining proportion to the traffic volumes that compete for access to the intersection.

The second mechanism handles the case of a network of signals in a road that must work together to ensure an efficient flow of platoons of vehicles so that they are not interrupted during the crossing. The mechanism ensures uninterrupted operation even when the corridor competes for intersections with other coordinated corridors, prioritizing those with greater traffic volumes.

Both mechanisms are tested in MicroLAM, a traffic simulator built as part of the work presented in this dissertation. The results are analyzed for performance evaluation of the proposed systems.

# Sumário

<b>Lista de Figuras</b>	<b>xi</b>
<b>Lista de Tabelas</b>	<b>xiv</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Objetivos do Trabalho . . . . .	2
1.2 Trabalhos Relacionados . . . . .	3
1.2.1 Escalonamento por Reversão de Arestas . . . . .	3
1.2.2 Simulação de Trânsito . . . . .	5
1.2.3 Controle e Coordenação de Semáforos . . . . .	6
1.3 Estrutura da Dissertação . . . . .	7
<b>2 Fundamentos de Engenharia de Tráfego</b>	<b>8</b>
2.1 Elementos Primários . . . . .	8
2.1.1 Vias . . . . .	8
2.2 Características do Fluxo de Tráfego . . . . .	9
2.2.1 Parâmetros Macroscópicos: Volume e Taxa de Fluxo . . . . .	9
2.2.2 Parâmetros Microscópicos: <i>Spacing</i> e <i>Headway</i> . . . . .	12
2.3 Controle de Sinais . . . . .	12
2.4 Coordenação de Sinais . . . . .	14
2.4.1 Tempo de Ciclo . . . . .	15
2.4.2 Largura de Banda . . . . .	15
2.5 Simulação . . . . .	15
<b>3 Fundamentos do Escalonamento por Reversão de Arestas</b>	<b>18</b>
3.1 SER . . . . .	18
3.2 SMER . . . . .	21
3.2.1 <i>Deadlocks</i> . . . . .	23
3.2.2 Mudança de Reversibilidade . . . . .	25
3.3 Geração de Estados Iniciais . . . . .	27
3.3.1 Alg-Arestas . . . . .	27
3.3.2 Alg-Cor . . . . .	27

<b>4</b>	<b>MicroLAM</b>	<b>29</b>
4.1	Motivação . . . . .	29
4.2	Características Gerais . . . . .	30
4.3	Vias e Interseções . . . . .	31
4.4	Modelos de Motorista . . . . .	31
4.5	Fluxos de Veículos . . . . .	32
4.6	Controlador de Sinais . . . . .	33
4.7	Coordenador de Sinais . . . . .	33
4.8	Sensores . . . . .	33
4.9	Extração de Relatórios . . . . .	34
<b>5</b>	<b>Controlador e Coordenador de Tráfego SMER</b>	<b>36</b>
5.1	A Interseção como um Recurso Compartilhado . . . . .	36
5.2	Controlador de Semáforo SMER . . . . .	39
5.2.1	Metodologia de Funcionamento . . . . .	40
5.2.2	Parâmetros e Sensoriamento . . . . .	41
5.3	Coordenador de Semáforos SMER . . . . .	42
5.3.1	A Interseção como um Recurso Compartilhado entre Corredores . . . . .	42
5.3.2	Metodologia de Funcionamento . . . . .	46
<b>6</b>	<b>Experimentos e Resultados</b>	<b>49</b>
6.1	Metodologia Experimental . . . . .	49
6.1.1	Medidas de interesse . . . . .	49
6.2	Cenários Avaliados . . . . .	50
6.2.1	Controlador SMER . . . . .	51
6.2.2	Coordenador SMER . . . . .	53
6.3	Apresentação dos Resultados . . . . .	57
6.3.1	Resultados do Controlador SMER . . . . .	57
6.3.2	Resultados do Coordenador SMER . . . . .	60
6.4	Avaliação dos Resultados . . . . .	69
6.4.1	Controlador SMER . . . . .	69
6.4.2	Coordenador SMER – Cenário “Dois Corredores” . . . . .	70
6.4.3	Coordenador SMER – Cenário “Grade Manhattan” . . . . .	71
<b>7</b>	<b>Conclusões e trabalhos futuros</b>	<b>77</b>
7.1	Trabalhos Futuros . . . . .	77
7.1.1	Controlador SMER . . . . .	78
7.1.2	Coordenador SMER . . . . .	78
7.1.3	MicroLAM . . . . .	79

<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>80</b>
<b>A Resultados das Simulações - Controlador SMER</b>	<b>84</b>
<b>B Resultados das Simulações - Dois Corredores</b>	<b>93</b>
<b>C Resultados das Simulações - Grade Manhattan</b>	<b>102</b>

# Lista de Figuras

2.1	Diagrama Fundamental do Fluxo de Tráfego. . . . .	11
3.1	Comparação de um estado acíclico com um estado em <i>deadlock</i> . . . . .	19
3.2	Exemplo da dinâmica do SER num grafo em anel com cinco vértices. . . . .	20
3.3	Exemplo de multigrafo SMER com as demandas explicitadas. . . . .	22
3.4	Exemplo de estado inicial e período do grafo. . . . .	23
3.5	Exemplo de multigrafo SMER em <i>deadlock</i> . . . . .	24
3.6	Exemplo do multigrafo SMER em operação sem <i>deadlock</i> . . . . .	24
3.7	Exemplo do mecanismo de mudança de reversibilidade em ação. . . . .	26
3.8	Exemplo de operação do Alg-Cor. . . . .	28
4.1	Interface gráfica do MicroLAM. . . . .	30
5.1	Interseção complexa modelada como um recurso. . . . .	37
5.2	Interseção complexa modelada como um conjunto de recursos atômicos. . . . .	37
5.3	Grafo representando as dependências entre os fluxos da interseção, sob a forma de processos. . . . .	38
5.4	Exemplo de escalonamento do cruzamento da figura 5.3. . . . .	39
5.5	Exemplo de corredores concorrendo por interseções sinalizadas. . . . .	43
5.6	Primeira aproximação para o problema dos corredores concorrentes. . . . .	44
5.7	Segunda aproximação, com $R_2$ deslocada no tempo. . . . .	45
5.8	Exemplo de funcionamento do algoritmo de geração de <i>offsets</i> . . . . .	48
6.1	Cenário de avaliação do Controlador SMER . . . . .	52
6.2	Cenário “Dois Corredores”. . . . .	54
6.3	Cenário “Grade Manhattan” . . . . .	55
6.4	Contagem de veículos para o cenário da tabela 6.1 . . . . .	58
6.5	Tempo médio de espera para o cenário da tabela 6.1 . . . . .	58
6.6	Contagem de veículos para o cenário da tabela 6.2 . . . . .	59
6.7	Tempo médio de espera para o cenário da tabela 6.2 . . . . .	59
6.8	Contagem de veículos para o cenário da tabela 6.3 . . . . .	61
6.9	Tempo médio de espera para o cenário da tabela 6.3 . . . . .	61

6.10	Contagem de veículos para o cenário da tabela 6.4 . . . . .	61
6.11	Tempo médio de espera para o cenário da tabela 6.4 . . . . .	62
6.12	Contagem de veículos para o cenário da tabela 6.5 . . . . .	62
6.13	Tempo médio de espera para o cenário da tabela 6.5 . . . . .	64
6.14	Contagem de veículos para o cenário da tabela 6.6 . . . . .	64
6.15	Tempo médio de espera para o cenário da tabela 6.6 . . . . .	64
6.16	Contagem de veículos para o cenário da tabela 6.7 . . . . .	65
6.17	Tempo médio de espera para o cenário da tabela 6.7 . . . . .	65
6.18	Contagem de veículos para o cenário da tabela 6.8 . . . . .	66
6.19	Tempo médio de espera para o cenário da tabela 6.8 . . . . .	66
6.20	Contagem de veículos para o cenário da tabela 6.9 . . . . .	68
6.21	Tempo médio de espera para o cenário da tabela 6.9 . . . . .	68
6.22	Evolução do tempo médio de espera. . . . .	72
6.23	Tempo médio de espera em vias coordenadas e não-coordenadas . . .	72
6.24	Variação da concorrência ao longo da simulação para o caso “Grade Manhattan” com variação de amplitude. . . . .	75
6.25	Contagem de veículos após melhoria no algoritmo. . . . .	75
A.1	Contagem de veículos para o cenário da tabela 6.1 . . . . .	85
A.2	Tempo médio de espera para o cenário da tabela 6.1 . . . . .	85
A.3	Tempo médio de viagem para o cenário da tabela 6.1 . . . . .	86
A.4	Velocidade média para o cenário da tabela 6.1 . . . . .	86
A.5	<i>Headway</i> para o cenário da tabela 6.1 . . . . .	87
A.6	Contagem de veículos para o cenário da tabela 6.2 . . . . .	87
A.7	Tempo médio de espera para o cenário da tabela 6.2 . . . . .	88
A.8	Tempo médio de viagem para o cenário da tabela 6.2 . . . . .	88
A.9	Velocidade média para o cenário da tabela 6.2 . . . . .	89
A.10	<i>Headway</i> para o cenário da tabela 6.2 . . . . .	89
A.11	Contagem de veículos para o cenário da tabela 6.3 . . . . .	90
A.12	Tempo médio de espera para o cenário da tabela 6.3 . . . . .	90
A.13	Tempo médio de viagem para o cenário da tabela 6.3 . . . . .	91
A.14	Velocidade média para o cenário da tabela 6.3 . . . . .	91
A.15	<i>Headway</i> para o cenário da tabela 6.3 . . . . .	92
B.1	Contagem de veículos para o cenário da tabela 6.4 . . . . .	94
B.2	Tempo médio de espera para o cenário da tabela 6.4 . . . . .	94
B.3	Tempo médio de viagem para o cenário da tabela 6.4 . . . . .	95
B.4	Velocidade média para o cenário da tabela 6.4 . . . . .	95
B.5	<i>Headway</i> para o cenário da tabela 6.4 . . . . .	96
B.6	Contagem de veículos para o cenário da tabela 6.5 . . . . .	96

B.7	Tempo médio de espera para o cenário da tabela 6.5 . . . . .	97
B.8	Tempo médio de viagem para o cenário da tabela 6.5 . . . . .	97
B.9	Velocidade média para o cenário da tabela 6.5 . . . . .	98
B.10	<i>Headway</i> para o cenário da tabela 6.5 . . . . .	98
B.11	Contagem de veículos para o cenário da tabela 6.6 . . . . .	99
B.12	Tempo médio de espera para o cenário da tabela 6.6 . . . . .	99
B.13	Tempo médio de viagem para o cenário da tabela 6.6 . . . . .	100
B.14	Velocidade média para o cenário da tabela 6.6 . . . . .	100
B.15	<i>Headway</i> para o cenário da tabela 6.6 . . . . .	101
C.1	Contagem de veículos para o cenário da tabela 6.7 . . . . .	103
C.2	Tempo médio de espera para o cenário da tabela 6.7 . . . . .	103
C.3	Tempo médio de viagem para o cenário da tabela 6.7 . . . . .	104
C.4	Velocidade média para o cenário da tabela 6.7 . . . . .	104
C.5	<i>Headway</i> para o cenário da tabela 6.7 . . . . .	105
C.6	Contagem de veículos para o cenário da tabela 6.8 . . . . .	105
C.7	Tempo médio de espera para o cenário da tabela 6.8 . . . . .	106
C.8	Tempo médio de viagem para o cenário da tabela 6.8 . . . . .	106
C.9	Velocidade média para o cenário da tabela 6.8 . . . . .	107
C.10	<i>Headway</i> para o cenário da tabela 6.8 . . . . .	107
C.11	Contagem de veículos para o cenário da tabela 6.9 . . . . .	108
C.12	Tempo médio de espera para o cenário da tabela 6.9 . . . . .	108
C.13	Tempo médio de viagem para o cenário da tabela 6.9 . . . . .	109
C.14	Velocidade média para o cenário da tabela 6.9 . . . . .	109
C.15	<i>Headway</i> para o cenário da tabela 6.9 . . . . .	110

# Lista de Tabelas

2.1	Variação da taxa do fluxo ao longo de uma hora. . . . .	10
6.1	Parâmetros do cenário do Controlador SMER – Volume Constante . .	57
6.2	Parâmetros do cenário do Controlador SMER – Variação da Amplitude	58
6.3	Parâmetros do cenário do Controlador SMER – Variação do Período .	60
6.4	Parâmetros do cenário “Dois Corredores” – Volume Constante . . . .	60
6.5	Parâmetros do cenário “Dois Corredores” – Variação da Amplitude .	62
6.6	Parâmetros do cenário “Dois Corredores” – Variação do Período . . .	63
6.7	Parâmetros do cenário “Grade Manhattan” – Volume Constante . . .	63
6.8	Parâmetros do cenário “Grade Manhattan” – Variação da Amplitude	65
6.9	Parâmetros do cenário “Grade Manhattan” – Variação do Período . .	67
6.10	Concorrência média observada da dinâmica SMER para cada cenário.	73

# Capítulo 1

## Introdução

Impulsionado pela política do governo Dilma de redução do Imposto sobre Produtos Industrializados (IPI), ao longo dos últimos meses o Brasil vem batendo recordes mensais consecutivos de venda e emplacamento de veículos. Dados da Federação Nacional da Distribuição de Veículos Automotores (FENABRAVE) mostram que, considerando todos os segmentos do setor automobilístico, a soma de veículos emplacados em agosto de 2012 chegou a mais de 580 mil [1], um recorde histórico.

Apesar do crescimento acelerado da frota de veículos do país, pouco é feito do ponto de vista de infraestrutura nas cidades para comportar tal crescimento. O autor deste trabalho teve a oportunidade de conhecer o Centro de Operações da Companhia de Engenharia de Tráfego do Rio de Janeiro (CET-Rio) em 2011 e pôde constatar a precária estrutura de controle e coordenação de tráfego que a cidade tem disponível, operando ainda hoje quase que totalmente de forma manual e ineficiente para o porte de uma cidade que vai sediar grandes eventos mundiais nos próximos anos.

A cada ano, os congestionamentos urbanos vêm se tornando um problema gradualmente crescente. Somado a isso, resolver tais problemas com uma expansão da capacidade do sistema é uma solução demorada, por conta da morosidade política e burocracia envolvidas, além de onerosa e ineficiente, quando não uma impossibilidade por conta da falta de espaço urbano. Na maioria dos casos é viável a adoção estratégias mais práticas para gerenciar a demanda tanto no tempo quanto no espaço, de modo a aproveitar a infraestrutura previamente existente e torná-la mais eficiente.

Para solucionar deficiências como estas, algumas cidades pelo mundo vêm adotando técnicas de tecnologia mais avançada, empregando o que na área se conhece pelo nome de *Intelligent Transportation Systems*, ou simplesmente ITS [2].

A área de ITS compreende uma gama de ferramentas, geralmente embasadas em tecnologias de computação e telecomunicação, que podem ser aplicadas com o objetivo de melhorar a eficiência de um sistema de transporte. Esta eficiência pode

se refletir de diversas formas, como, por exemplo, através da redução de congestionamentos, número de paradas desnecessárias, da queda do número de acidentes, da melhoria da qualidade do ar urbano por redução da emissão de gases poluentes, menor gasto com consumo de combustíveis, transporte mais rápido de cargas, etc.

Este trabalho tem seu foco na criação de ferramentas de ITS que contribuam para otimizar determinadas medidas de interesse de um sistema de trânsito. Tais medidas serão apresentadas e explicadas em maior detalhe ao longo do texto. Na seção 1.1 são apresentados os objetivos almejados no trabalho que culminou nesta dissertação. São levantados e discutidos, na seção 1.2, trabalhos relacionados ao tema e que influenciaram e contribuíram para a concretização dos objetivos almejados. Finalmente, na seção 1.3 é apresentada a estrutura geral de capítulos da dissertação.

## 1.1 Objetivos do Trabalho

A proposta desta dissertação é a de dar continuidade ao trabalho começado em [3], evoluí-lo e estendê-lo para compreender o tratamento de fluxos dinâmicos e heterogêneos de veículos. O intuito é verificar a hipótese, através de microssimulação, de que é possível utilizar o mecanismo de Escalonamento por Reversão de Múltiplas Arestas (ou SMER, como é comumente mencionado na sigla em inglês) para controlar e coordenar um sistema viário de maneira mais eficiente que os métodos tradicionais.

Dois objetivos são almejados. Ambos estão concentrados na utilização eficiente do sistema de sinalização de um sistema urbano de trânsito. Esta eficiência é buscada através de técnicas de ITS, como será abordado na explicação de cada objetivo a seguir.

O primeiro objetivo toma forma numa interseção sinalizada isolada, isto é, num cenário onde não há preocupação com o comportamento do sistema ao redor da interseção. Para este cenário, o interesse é o de desenvolver um mecanismo que seja capaz de medir a demanda de cada via que injeta algum fluxo de veículos na interseção em questão e, através desta aferição, seja capaz de atuar no controle dos semáforos daquele cruzamento de forma a otimizar o uso segundo determinados parâmetros a serem discutidos mais adiante. Este primeiro objetivo também leva em conta que a demanda de cada via pode variar ao longo do tempo, tratando assim o caso prático dos sistemas de tráfego da vida real onde a demanda varia segundo a hora do dia e também de acordo com o dia da semana, por exemplo.

O segundo objetivo trata da coordenação de um sistema de interseções sinalizadas. Para determinadas vias de um sistema de trânsito, é importante que exista um fluxo continuado e ininterrupto de veículos, que tenha início na entrada da via

e se estenda ao longo dela, promovendo alta mobilidade e redução do número de veículos que necessitam parar em sinais vermelhos. Este paradigma é popularmente conhecido como “onda verde” e é bem explorado na literatura básica da Engenharia de Tráfego [4]. O propósito deste trabalho é o de tratar os casos mais complexos de coordenação, onde dois ou mais corredores verdes disputam pelo uso de cruzamentos. Além disso, assim como no primeiro objetivo, também se tem como meta o funcionamento eficiente deste sistema levando em conta a variação dos fluxos ao longo do tempo.

Ambas as propostas serão apresentadas em maior detalhe ao longo do restante do texto. Serão apresentados cenários de teste para pôr à prova os mecanismos propostos e ao fim do texto serão apresentados os resultados de cada um destes cenários avaliados.

Apesar de não ter sido o foco da exploração inicial do tema, um objetivo indireto apareceu como consequência dos dois primeiros. Por conta da complexidade do sistema almejado, foi necessária a construção de um simulador de trânsito capaz de reproduzir o comportamento do mecanismo proposto e avaliar seu desempenho. Este simulador, por ter se tornado grande parte do esforço para conseguir a obtenção de resultados, acabou ganhando importância no trabalho e é explicado em mais detalhes no capítulo 4.

## 1.2 Trabalhos Relacionados

A seguir é feito um apanhado sobre trabalhos que têm relação com os temas envolvidos nesta dissertação e que serviram de estudo a título de comparação e de pesquisa do estado da arte. Na seção 1.2.1 são apresentados trabalhos que exploraram o tema do SER e de sua forma mais generalizada, o SMER, aplicados em áreas diversas. Em seguida, na seção 1.2.2 é feito um levantamento sobre o que existe no campo da simulação de trânsito, tanto de cunho comercial, quanto acadêmico. Estas fontes serviram de estudo para a construção do simulador desenvolvido para este trabalho. Finalmente, são abordados na seção 1.2.3 trabalhos acadêmicos relacionados com o controle e a coordenação de sinais de trânsito, sempre com foco na área de ITS.

### 1.2.1 Escalonamento por Reversão de Arestas

O Escalonamento por Reversão de Arestas (do inglês, *Scheduling by Edge Reversal* – SER) é um mecanismo de controle de acesso a recursos compartilhados totalmente distribuído, baseado na dinâmica de um grafo com arestas que representam os recursos e nós que simbolizam os processos requerendo acesso a estes recursos num sistema restrito por vizinhança trabalhando em alta carga [5] [6].

O SER fornece, entre outros pontos, a garantia de justiça, no sentido de que todos os processos executam necessariamente o mesmo número de vezes durante um período do grafo. Em outro trabalho [7], foi apresentada uma generalização do modelo (o SMER) em que é permitido que os processos sejam escalonados para acessar os recursos compartilhados com frequências relativas distintas. Esta generalização tornou possível priorizar-se determinados processos em relação aos demais, aplicação de interesse para este trabalho.

O mecanismo de reversão de arestas, ferramenta principal utilizada para alcançar os objetivos propostos neste trabalho, já teve seu uso em temas variados (exemplos em [8], [9]). Dois deles, porém, merecem uma citação especial por terem relação direta com o trabalho desta dissertação.

O primeiro, diretamente ligado ao presente trabalho, é seminal ao fazer uso do SER numa proposta de ITS para controlar o acesso de veículos a um cruzamento sinalizado [3]. No trabalho citado, é aplicada pela primeira vez a dinâmica do SER com os processos representando vias de chegada de veículos e os recursos sendo áreas da interseção disputadas por estes recursos. Também é proposto um sistema básico de coordenação onde o grafo SER se estende para toda uma rede de interseções, em que arestas podem, por sua vez, representar uma requisição de sincronia entre dois sinais. O grafo era inicialmente configurado manualmente e, uma vez posto em execução, operava com o propósito de gerar os *offsets* necessários entre as interseções participantes de modo que pudesse se criar uma onda verde com alguma *largura de banda* (conceito explicado na seção 2.4) ao longo de um segmento de via. Como a proposta do sistema era a de garantir um sistema generalizado de ondas verdes, o mecanismo não podia garantir que a largura de banda se manteria ao longo de mais de um segmento de via. Como trabalho futuro, uma das propostas envolvia o uso do mecanismo SMER para permitir a priorização de determinados fluxos de veículos em detrimento de outros.

O segundo trabalho, fazendo uso do SMER, tem como proposta a criação de uma rede de sensores sem fio com um gerenciamento de comunicação distribuído entre eles [10]. Alguns sensores, por terem mais dados a transmitir, operavam com uma frequência relativa maior que os outros, e daí a necessidade de utilização de um mecanismo como o SMER. Porém, a citação do trabalho cabe aqui por conta da utilização de um novo mecanismo que permite aos vértices do grafo SMER alterarem suas frequências relativas de execução durante seu funcionamento. Este mecanismo é usado no trabalho atual para que o controlador de semáforo possa responder em tempo real às variações recentes de tráfego.

## 1.2.2 Simulação de Trânsito

O campo da simulação de trânsito hoje é bastante fértil, principalmente por conta do crescente poder computacional disseminado durante os últimos anos. Alguns simuladores comerciais se destacam bastante atualmente e são amplamente usados por agências de trânsito por todo o mundo.

O VISSIM [11], um simulador microscópico que acompanha uma suíte de ferramentas, é muito poderoso e capaz de modelar cenários com diversos tipos de veículos, contando com simulação de pedestres e ciclistas. Possibilita também simulações em vias sem faixas definidas e permite modelar corredores de priorização de tráfego de transporte público. A suíte conta com uma ferramenta especificamente desenvolvida para simulação de pedestres usando o *Social Force Model* [12]. Uma licença gratuita pode ser obtida para pesquisas acadêmicas através do site.

O Synchro [13] é outra suíte comercial com simulação microscópica. Ele é mais conciso que o VISSIM, mas possibilita realizar otimizações dos tempos de sinais em corredores levando em conta volumes e outros parâmetros especificados pelo usuário. Este simulador foi testado pelo autor da dissertação durante a etapa de busca de um simulador que permitisse o teste de controles inteligentes de semáforo. Apesar de ser possível simular através dele sinais atuados, assim como em todos os outros simuladores comerciais não é factível realizar experimentações com novos mecanismos de ITS, pois o foco destes simuladores é o teste de cenários tradicionais da Engenharia de Tráfego. A licença para uma estação de trabalho custa hoje cerca de U\$ 4100,00.

O TRANSYT [14], do centro de pesquisas britânico *Transport Research Laboratory*, é um simulador macroscópico e seu principal foco é o cálculo *off-line* de medidas que otimizem os tempos de uma interseção isolada ou de um corredor coordenado. O fabricante explica que ele usa as técnicas de *Hill Climbing* e *Simulated Annealing* para obter boas otimizações para os sistemas. Custa atualmente cerca de £1600,00, porém é disponibilizada uma versão de estudante por £70,00.

Existe uma variante do TRANSYT, o TRANSYT-7F [15], desenvolvido no *McTrans Center* da Universidade da Florida e que mantém o foco macroscópico de seu ancestral. Possui também um otimizador de tempos chamado CORSIM (*Corridor Simulator*), que opera usando *Hill Climbing* e *algoritmos genéticos*. Custa U\$ 1500,00 e possui desconto de 50% para pesquisas acadêmicas.

Entrando no ramo acadêmico e de pesquisa, o SUMO [16] é um simulador microscópico de código aberto sob licença GNU desenvolvido, em sua maior parte, por funcionários de um instituto de transportes alemão. Como o foco é a pesquisa de novos modelos para a área de trânsito, ele é muito mais simples que os simuladores comerciais. Ele é capaz de importar cenários do VISSIM e também mapas no

formato do *Open Street Map* [17].

Finalmente, cita-se um simulador de menor porte, o *Microsimulation of Road Traffic Flow* [18]. Apesar de não ser um simulador tão completo quanto os outros (por exemplo, não é capaz de simular interseções entre vias e a criação de novos cenários envolve desenvolvimento de código), serviu de fonte de estudo para a implementação do modelo de perseguição veicular usado no MicroLAM: o IDM [19].

### 1.2.3 Controle e Coordenação de Semáforos

Existem muitos trabalhos abrangendo a área de ITS das formas mais diversas. Alguns serão citados abaixo e ao fim outras referências serão enumeradas.

O REALBAND [20] é um sistema de coordenação que se diferencia por operar *on-line*, isto é, coletando dados em tempo real de uma rede viária e atuando nos tempos dos sinais de acordo. Os autores comparam o mecanismo com um método centralizado e *on-line* muito popular e utilizado em algumas cidades chamado SCOOT [21] [22] (*Split Cycle and Offset Optimization Technique*), que atua no sistema de forma adaptativa, baseando-se em dados obtidos previamente por análise *off-line*. O REALBAND emprega um método de árvores decisórias para escalonar ondas verdes conflitantes ao longo do tempo. Com este método, ele realiza previsões a respeito do tempo de atraso provocado por cada uma das possibilidades e escolhe a que fornecer melhor estado global.

Dos mesmos autores do REALBAND, o RHODES [23] é também um mecanismo adaptativo, porém para controle de uma interseção isolada. Ambos foram projetados para operar em conjunto numa rede de interseções.

Balan e Luke [24] propõem um sistema de controle distribuído de sinais num ITS que opera com veículos identificados e que possuem um sistema de crédito. O sistema de crédito visa premiar veículos que tiveram sua mobilidade mais prejudicada no passado da simulação. Os controladores de sinais então julgam qual via devem privilegiar de acordo com a avaliação dos créditos dos veículos que aguardam em cada fila de entrada.

Bazzan propõe dois sistemas distribuídos. No primeiro [25], é usada teoria de jogos evolucionária, onde cada interseção sinalizada é um jogador que prioriza seu objetivo local. O sistema necessita de um tempo de aprendizado para chegar a um estado de coordenação, que não é garantido ocorrer. O segundo, de Bazzan e Oliveira [26], também é baseado em multi-agentes, porém implementando a técnica de *swarm*, modelando cada interseção como um inseto numa colônia.

## 1.3 Estrutura da Dissertação

Este trabalho encontra-se organizado da seguinte forma: no capítulo 2, é feito um apanhado geral sobre o tema Engenharia de Tráfego, abrangendo todos os conceitos necessários para o entendimento do modelo proposto; no capítulo 3, explica-se o mecanismo de Reversão de Arestas, primeiro no caso restrito e em seguida no caso generalizado, usado nesta dissertação; no capítulo 4, é especificada a arquitetura do simulador MicroLAM e alguns detalhes de sua implementação; no capítulo 5, os modelos de controle e coordenação são apresentados; no capítulo 6, são apresentados os testes realizados no simulador, bem como discutidos os resultados experimentais obtidos; por fim, no capítulo 7, são expostas as conclusões do trabalho, bem como as propostas de trabalhos futuros em torno dos assuntos apresentados.

# Capítulo 2

## Fundamentos de Engenharia de Tráfego

Neste capítulo, são apresentados alguns elementos essenciais de Engenharia de Tráfego, necessários para compreensão dos mecanismos propostos neste trabalho. Este conhecimento também foi importante na construção do simulador MicroLAM, servindo de base para tornar confiáveis os resultados obtidos durante as simulações.

### 2.1 Elementos Primários

Existem quatro elementos básicos que compõem um sistema de tráfego. Os dois primeiros, os *usuários* e os *veículos*, são os que o engenheiro de tráfego possui pouco ou nenhum controle direto. Para contornar esse problema, ele se usa do projeto correto e eficiente dos dois elementos restantes: as *vias* e os *dispositivos de controle de tráfego*.

A seguir é feito um breve comentário sobre classes de vias, que serão referenciadas ao longo do texto da dissertação. Mais adiante, na seção 2.3, é feito um apanhado sobre controladores de sinais, um dos principais dispositivos de controle de tráfego nas vias urbanas e foco principal deste trabalho. Os demais elementos básicos podem ser consultados na referência [4].

#### 2.1.1 Vias

As vias urbanas se encaixam em três classes primárias: *artérias*, *coletoras* e *locais*. Elas proveem dois tipos distintos de função: *mobilidade*, que diz respeito ao rápido e eficiente deslocamento por médias e grandes distâncias; e *acesso*, ao fornecer conexão com instalações urbanas como prédios residenciais e comerciais.

As vias locais são basicamente projetadas para capilarizar o acesso a instalações urbanas e o tráfego em alta velocidade é desencorajado, tanto pela maneira como

são projetadas quanto pelo controle de sinalização. Estas vias são normalmente menores e oferecem baixa capacidade, feitas sob medida para comportar pequenos fluxos.

Vias coletoras tem um papel tanto de intermediar o tráfego que deixa vias locais buscando mobilidade para alcançar distâncias maiores com maior rapidez, quanto de prover o movimento no sentido oposto. Viagens urbanas geralmente têm início e fim em vias locais, e os usuários se utilizam de vias coletoras para viagens de média distância ou quando buscam acesso a artérias para viagens maiores. Evita-se que vias locais injetem veículos diretamente em artérias, pois as velocidades em vias locais tendem a ser muito inferiores e o choque de fluxos com velocidades distintas, além de ineficiente, pode comprometer a segurança do sistema. As vias coletoras são usadas para interfacear este acesso, coordenando os fluxos locais da melhor maneira possível.

As artérias são concebidas para proporcionar alta mobilidade. O projeto da via e todos os controles de tráfego são usados com a intenção de prover movimento eficiente de grandes quantidades de veículo. Geralmente existe um número reduzido de pontos de acesso, visando mínimo impacto na mobilidade do fluxo que atravessa a artéria. Além disso, outros aspectos são encontrados, como: proibição de entradas ou saídas de estacionamentos, coordenação de sinais e limites de velocidade mais relaxados para encorajar a mobilidade.

## 2.2 Características do Fluxo de Tráfego

Os parâmetros de um fluxo de tráfego se agrupam em duas categorias: os *parâmetros macroscópicos* caracterizam o fluxo de tráfego como um todo; os *parâmetros microscópicos* caracterizam o comportamento de um veículo individualmente num fluxo.

### 2.2.1 Parâmetros Macroscópicos: Volume e Taxa de Fluxo

Um fluxo de tráfego pode ser descrito de maneira macroscópica por três parâmetros: volume (ou taxa de fluxo), velocidade e densidade. Estes parâmetros são amplamente referenciados durante toda a dissertação e seu aprendizado foi de suma importância para a evolução do trabalho. A seguir, os três serão brevemente descritos.

#### Volume

*Volume* é definido como o número de veículos que cruzam um ponto numa via durante um período especificado de tempo. Uma unidade de tempo bastante comum nesse caso é a hora. Volumes variam consideravelmente ao longo do curso de um

Intervalo de tempo	Volume (veículos)	Taxa de Fluxo (vph)
16:00–16:15	400	1600
16:15–16:30	500	2000
16:30–16:45	650	2600
16:45–17:00	800	3200
16:00–17:00	2350	= volume horário

Tabela 2.1: Variação da taxa do fluxo ao longo de uma hora.

dia, costumeiramente com picos ocorrendo nos deslocamentos para o trabalho no início da manhã e para casa no final da tarde – os chamados ‘horários de rush’.

Apesar do volume ser medido comumente em períodos de uma hora, a variação dentro deste período também requer atenção. Uma via pode ter capacidade para servir um determinado volume dentro de uma hora de operação, porém o volume não é distribuído de maneira uniforme pelo tempo e picos de curta duração podem ocorrer e excederem momentaneamente a capacidade da via, criando um colapso.

Esta variações de curta duração são medidas em veículos por hora (vph) e ganham o nome de *taxa de fluxo*. Por exemplo, um volume de 800 veículos observados num período de 15 minutos seriam expressados com uma taxa de

$$\frac{800v}{0,25h} = 3200vph$$

O que não implica necessariamente que serão contados 3200 veículos ao longo de uma hora de observação; este valor é apenas usado como uma indicação a respeito das condições da via. Um exemplo de situação que retrata este cenário é a da tabela 2.1, mostrando um comportamento hipotético para uma via com 2800 vph de capacidade. Apesar do volume horário entre 16h e 17h estar dentro da capacidade da via, a taxa de fluxo entre 16h45min e 17h00min ultrapassa a capacidade em quase 15%, acarretando certamente num colapso da via e gerando congestionamento.

## Velocidade

*Velocidade* é definida como a taxa de movimento, em distância por unidade de tempo. Num fluxo de tráfego, cada veículo possui uma velocidade distinta; assim, o fluxo não possui uma velocidade característica, mas uma distribuição de velocidades individuais. A partir desta distribuição, usa-se um valor médio ou típico para caracterizar o fluxo como um todo, baseada na média das velocidades individuais.

## Densidade

*Densidade*, o terceiro parâmetro, é uma medida do tráfego definida como o número de veículos ocupando uma determinada região da via. É expressada em veículos por

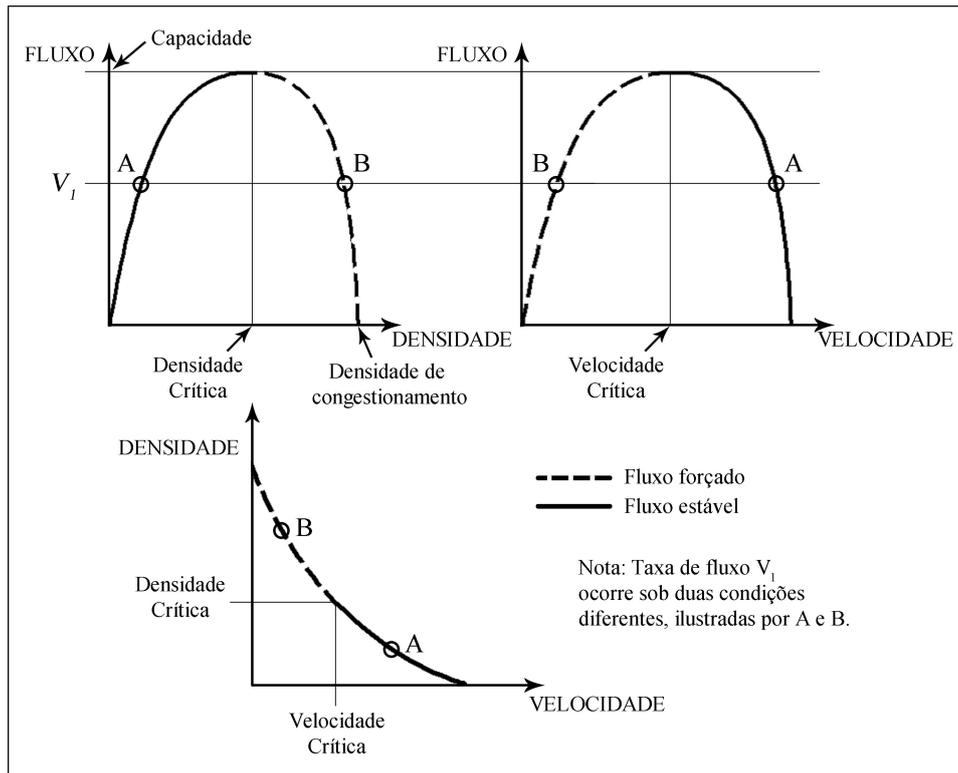


Figura 2.1: Diagrama Fundamental do Fluxo de Tráfego. O *fluxo* é comumente medido em veículos por hora, a *densidade* em veículos por unidade de área e a *velocidade* em metros por segundo. Imagem retirada de [27].

unidade de distância. Ela é difícil de se medir diretamente, porém pode ser obtida a partir da velocidade e do volume. Os três parâmetros estão relacionados da seguinte forma:

$$F = S * D \quad (2.1)$$

Onde  $F$  é a taxa de fluxo,  $S$  é a velocidade média e  $D$  é a densidade.

### Diagrama Fundamental do Fluxo de Tráfego

A figura 2.1 mostra as relações entre as três medidas macroscópicas vistas anteriormente. Este gráfico é tradicionalmente conhecido como *Diagrama Fundamental do Fluxo de Tráfego* e é de suma importância para compreensão de como podem se comportar as condições de tráfego numa via.

O gráfico densidade-fluxo revela que existem duas situações em que o fluxo é zero. Na primeira, quando não há nenhum veículo circulando na via, a densidade é zero, e por isso nenhum fluxo é observado; na segunda, a via atingiu a chamada *densidade de engarrafamento* (do inglês, *jam density*) e está tão congestionada que o movimento cessa completamente.

O entendimento destes dois casos é importante, pois é comum cometer-se o erro

de basear a tomada de decisões puramente no fluxo observado através de sensores de passagem, que apenas detectam a passagem de um veículo, mas não conseguem observar a ocupância da via. Um agente pode ter a falsa impressão de que uma via está vazia, quando na verdade está completamente congestionada.

O ponto chamado de *densidade crítica* no gráfico identifica o momento em que a densidade atingiu a capacidade da via. Este é um estado instável que deve ser evitado, pois pode levar facilmente ao colapso do sistema e ao aparecimento de efeitos indesejáveis, como, por exemplo, tempos de espera elevados e o chamado “trânsito fantasma”. Neste ponto, os espaços na via são nulos e o *headway* chega ao seu mínimo valor; qualquer perturbação no fluxo inicia uma reação em cadeia que não pode ser facilmente dissipada.

### 2.2.2 Parâmetros Microscópicos: *Spacing* e *Headway*

Os parâmetros microscópicos descrevem comportamentos individuais dos veículos em relação a seus vizinhos. Serão definidos aqui dois parâmetros importantes: *spacing* e *headway*.

#### *Spacing*

*Spacing* é a distância entre sucessivos veículos na faixa de uma via, medida a partir de um ponto referencial nos veículos (usualmente, o para-choque traseiro do veículo mais adiantado e o para-choque dianteiro do seguinte).

#### *Headway*

*Headway* é o tempo entre sucessivos veículos na medida em que passam num dado ponto referencial na via.

## 2.3 Controle de Sinais

De suma importância para este trabalho, a tarefa do controle dos tempos de um sinal é tradicionalmente atribuída a um mecanismo que utiliza valores pré-calculados, baseados no histórico dos volumes observados para a interseção ou região onde a interseção se encontra. Porém, nas últimas décadas, outros tipos têm se tornado comuns. Segue abaixo um breve resumo dos tipos comumente encontrados na literatura:

- Pré-temporizados. No controle pré-temporizado, cada fase do controlador é servida numa sequência programada que se repete ao longo do dia. Assim, cada fluxo incidente ao cruzamento recebe um tempo fixo de verde, amarelo

e vermelho (*clearance time*) e o somatório destes tempos para cada fluxo é referido como o comprimento de ciclo daquele controlador. Os tempos e o comprimento de ciclo podem variar seguindo mais de um regime ao longo do dia. É habitual que no *horário de pico* se trabalhe com um regime diferenciado do resto do dia, compreendendo um comprimento de ciclo maior para comportar volumes de tráfego mais pesados. Controladores pré-temporizados podem oferecer uma eficiência razoável para os períodos de pico, assumindo que sua temporização reflita as condições atuais de tráfego. Entretanto, durante o restante do dia, o tráfego pode ser frequentemente interrompido sem necessidade, já que, mesmo que uma via conflitante não possua veículos a serem servidos, o controlador não tem outra escolha a não ser percorrer todas as fases pré-programadas. Outro caso problemático é o de mudanças causadas no comportamento do tráfego por conta de eventos imprevistos, como acidentes ou saídas de jogos em estádios; o controlador pré-temporizado não é capaz de se adaptar nestes casos;

- Semi-atuados e totalmente atuados. No controle atuado, os tempos de verde de cada via incidente podem variar de acordo com o fluxo atual de veículos. Sensores na via são usados para estender o tempo de verde de uma fase de modo a garantir a completa passagem de um pelotão que se aproxima, enquanto garante que tempo de verde não será desperdiçado caso não haja fluxo a servir. Devido à sua natureza dinâmica, o comprimento do ciclo pode variar livremente. O controle semi-atuado se diferencia do totalmente atuado por utilizar sensores apenas na via transversal; neste método, todo o tempo é, por padrão, alocado para a via principal. Quando o sensor é acionado na via transversal, o controle identifica que há uma chamada a ser atendida e aloca uma fase para atendimento pontual daquele movimento;
- Inteligentes. Baseados em técnicas de ITS, são controladores mais modernos que utilizam ferramentas de computação e telecomunicações para responder ou se adaptar de maneira sensível às mudanças das condições do trânsito. O controlador proposto neste trabalho se encaixa nesta classificação. Diversas técnicas computacionais são comumente encontradas na literatura e na produção acadêmica: redes neurais, lógica fuzzy, algoritmos genéticos, *hill climbing*, etc. Alguns exemplos podem ser vistos na seção 1.2.3.

Alguns parâmetros devem ser considerados no estudo do controle de sinais em interseções sinalizadas. Os seguintes termos são comumente usados para descrever a operação de um sinal de tráfego:

**Fase** Tempo alocado para uma combinação de movimentos de tráfego recebendo o

direito de passagem simultaneamente pela interseção. Tradicionalmente possui um intervalo de verde, um de amarelo e um tempo de vermelho (este último chamado de *clearance time*);

**Intervalo** Período de tempo durante o qual as indicações de um semáforo permanecem constantes;

**Intervalo de mudança** O tempo de amarelo e/ou vermelho que ocorre no final de uma fase, reservado para prover o ‘esvaziamento’ da interseção, permitindo que veículos que passaram no último instante de movimento permitido tenham a chance de cruzar completamente o cruzamento;

**Ciclo** Uma sequência completa de fases do controlador até que o padrão de ocorrências se repita, quando então inicia-se um novo ciclo;

**Comprimento do ciclo** Tempo total que o controlador leva para completar um ciclo, simbolizado por  $C$  (em segundos);

**Tempo perdido** Do inglês *lost time*, tempo durante o qual a interseção está efetivamente sem uso por qualquer movimento. Estes tempos ocorrem durante uma parcela do *intervalo de mudança* (a parcela do tempo em que o cruzamento é ‘esvaziado’ – ver acima) e no início de cada fase, devido ao *start-up lost time* (ver 2.2.2);

**Tempo de verde** tempo de uma fase durante o qual o sinal verde está sendo indicado; dado pelo símbolo  $G_i$  para a fase  $i$  (em segundos);

**Tempo de verde efetivo** Tempo durante o qual uma fase está efetivamente disponível para o deslocamento estável de pelotões de veículos dos movimentos permitidos; este tempo é computado como o tempo de verde menos o tempo perdido para aquela fase; dado pelo símbolo  $g_i$  para a fase  $i$  (segundos);

**Taxa de verde** Razão entre o tempo efetivo de verde e o comprimento do ciclo, dado por  $g_i/C$  para a fase  $i$ .

Para um maior aprofundamento no entendimento destes parâmetros, ver [4].

## 2.4 Coordenação de Sinais

Uma situação muito comum no dia-a-dia de um motorista transitando por uma cidade é a de estar parado num sinal vermelho e observar que a interseção logo à frente possui sinal verde, apesar de não haver nenhum veículo se utilizando desse

tempo, por conta do fluxo estar retido no sinal vermelho anterior. Este é um caso típico de uma rede de sinais descoordenada.

Assim, idealmente, seria interessante que interseções consecutivas dispusessem de uma temporização sincronizada que facilitasse o escoamento do fluxo de veículos, tentando minimizar medidas como o tempo médio de espera dos veículos e o número médio de paradas. Isso é viável para interseções que estejam próximas umas das outras, pois um pelotão que seja criado numa interseção é mantido coeso até a chegada na interseção seguinte. Normalmente um pelotão se mantém agrupado por pelo menos 300m de distância entre interseções [4], podendo se estender ainda por distâncias maiores. A velocidade máxima da via é um fator importante para a manutenção do pelotão. Quanto maior o limite da via, maior a chance do pelotão se dissipar.

### 2.4.1 Tempo de Ciclo

Um pré-requisito para que a sincronia entre sinais funcione é que todos possuam o mesmo tempo de ciclo. Sinais trabalhando em frequências distintas apresentarão um comportamento não-harmônico e a largura de banda (subseção 2.4.2) resultante será imprevisível e pouco eficiente. Há situações complexas em que uma interseção opera com o dobro do tempo de ciclo da vizinha, o que permite um comportamento harmônico, porém este é um caso com pouca chance de obtenção de algum benefício salvo raras exceções de cenário.

### 2.4.2 Largura de Banda

Parâmetro importante em coordenação de sinais, a *largura de banda* pode ser interpretada como o comprimento do “tapete verde”; este, por sua vez, representa a abstração de uma janela que se desloca pelo corredor no sentido do fluxo, acompanhando os tempos de abertura dos sinais e permitindo que os veículos prossigam sem paradas em cruzamentos. A largura de banda é ditada pelo menor valor dentre os tempos de verde dos cruzamentos sendo atravessados pelo corredor. Por isso, como foi dito na subseção anterior, é interessante que todas as interseções possuam o mesmo tempo de verde, de modo que não haja desperdício de banda. O caso exemplificado na seção 5.3 ilustra o conceito de largura de banda e sua aplicação com mais detalhes.

## 2.5 Simulação

Modelos de simulação são usados para descrever como o tráfego se comporta em um determinado sistema com determinados parâmetros de entrada. Ele pode ser

comparado com modelos mais antigos e que caíram em desuso, como o empírico e o analítico. No modelo de simulação, a performance de um sistema é medida iterando-se pelo tempo e espaço, rastreando a ocorrência de eventos na medida em que o sistema evolui.

O *Highway Capacity Manual* (HCM) [28] define as classificações mais usuais de simuladores de trânsito, citando propriedades observadas comumente. Eles podem ser *estocásticos* ou *determinísticos*, sendo o *output* do primeiro imprevisível por conta de algum fator desconhecido na execução, enquanto o do segundo fornece sempre o mesmo resultado para o mesmo conjunto de variáveis de entrada.

O HCM também classifica quanto ao método usado para iterar os estados da simulação. No método *baseado em eventos*, o simulador passa da execução de um evento diretamente para o tempo em que o próximo evento acontece, enquanto o oposto, *baseado em tempo*, itera com intervalos fixos de tempo entre o cálculo de um estado e o seu sucessor.

Quanto à granularidade da representação dos fluxos, encontramos três tipos. No modelo *microscópico*, a simulação calcula particularmente a aceleração, velocidade e posição de cada veículo a cada iteração do sistema. Este é o modelo que permite maior precisão e controle da simulação, porém é o mais custoso do ponto de vista do processamento. O modelo *macroscópico* faz o contraponto e modela os fluxos analogamente ao comportamento de fluidos, usando-se de variáveis de taxa de fluxo e outros parâmetros mais abstratos para ter uma noção geral de como o tráfego está se movendo. Ele permite menor flexibilidade e controle dos parâmetros que modelam o comportamento do tráfego, porém é menos oneroso do ponto de vista do processamento. Existe ainda um tipo menos popular e pouco usado em simulações, chamado *mesoscópico*, que busca modelar um grão intermediário, representando cada pelotão como uma unidade móvel.

Quanto ao tipo de fluxo de entrada dos veículos, o HCM cita os de fluxo estático, cuja taxa de chegada de veículos permanece constante ao longo da simulação, e os de taxa variável, que buscam representar variações na chegada de veículos por conta de horários de pico, eventos como saídas de estádios esportivos ou variações no trânsito urbano por conta de feriados.

Outro parâmetro a ser ressaltado diz respeito ao tipo de objetivo que se espera com a execução do simulador. No tipo *descritivo*, a análise dos resultados mostra como o tráfego se comportou diante de um determinado cenário especificado como entrada; no tipo *normativo*, o propósito é o de obter, através do simulador, um conjunto de parâmetros com valores calculados de modo a melhorar a performance de um sistema. Um bom exemplo deste último é um simulador que provê como saída os tempos dos sinais de um sistema de modo que eles operem em coordenação de uma forma mais eficiente que a atualmente em uso.

Finalmente, os simuladores podem ser classificados, ainda segundo o HCM, como *on-line* ou *off-line*. Nos *off-line*, não existe preocupação a respeito da relação do tempo de simulação com o tempo real. Nestes casos geralmente busca-se agilidade de processamento, logo é de se esperar que o simulador processe num passo mais rápido que o do tempo real. O caso *on-line* se faz necessário quando a simulação está diretamente ligada a um sistema real de controladores operando interseções sinalizadas. Neste caso, a simulação deve ser capaz de acompanhar o andamento do sistema real e pode possuir atuadores que interferem no funcionamento deste sistema, normalmente em reposta a sensores colocados nas vias.

# Capítulo 3

## Fundamentos do Escalonamento por Reversão de Arestas

O problema do *Jantar dos Filósofos* (*Dining Philosophers Problem*, DPP [29]) de Dijkstra é um exemplo clássico que levanta questões sobre o acesso concorrente de processos a recursos compartilhados, tais como *deadlock*, justiça, *liveness*, exclusão mútua e *starvation*. Nele, um filósofo divide seu tempo entre pensar e comer, e para comer necessita de dois garfos<sup>1</sup>, cada garfo sendo compartilhado com um de seus filósofos vizinhos que estão sentados à mesa com ele.

Desde sua formulação, diversos algoritmos distribuídos foram propostos para garantir a exclusão mútua no acesso a recursos atômicos, isto é, recursos que não podem ser acessados por mais de um processo ao mesmo tempo. Em particular, o algoritmo de Chandy e Misra [30] é uma solução paradigmática para o problema de exclusão mútua levantado no DPP.

Entretanto, o custo de comunicação do algoritmo de Chandy e Misra se torna potencialmente alto na medida em que os processos passam a trabalhar em alta carga, isto é, quando eles estão continuamente exigindo acesso a um subconjunto fixo de recursos para poder operar.

Neste cenário, o algoritmo de Escalonamento por Reversão de Arestas (do inglês *Scheduling by Edge Reversal*, SER) se torna uma simples e poderosa ferramenta, pois foi idealizada especificamente para escalonar processos trabalhando em alta carga.

### 3.1 SER

O SER é um algoritmo distribuído e baseado na manipulação de orientações acíclicas de um grafo dirigido  $G = (V, E)$ , onde  $V$  é o conjunto de vértices (cada vértice representando um processo que deseja executar) e  $E$  é o conjunto de arestas direcionadas

---

<sup>1</sup>segundo Dijkstra, “o prato servido é um tipo muito difícil de espaguete” [29].

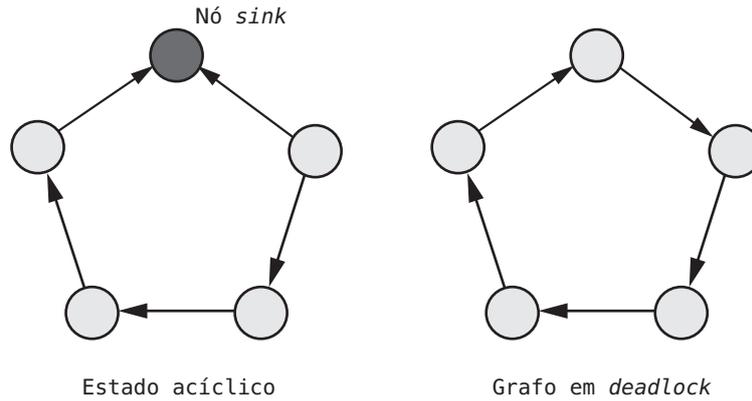


Figura 3.1: Comparação de um estado acíclico com um estado em *deadlock*.

(cada aresta representando a exclusão mútua que deve existir no acesso a um recurso entre os dois vértices conectados). Dois vértices são conectados por uma aresta se, e somente se, ambos requerem acesso a um mesmo recurso. As arestas podem ter suas direções mudadas dinamicamente e a direção corrente da aresta indica qual vértice tem a vez para acessar o recurso compartilhado representado por esta.

Por definição, um processo, para poder operar, requer acesso simultâneo a todos os recursos dos quais depende. Por isso, um vértice no grafo SER precisa ter todas as suas arestas direcionadas para si para poder executar. Um vértice nesta condição é chamado de *nó-sumidouro*, ou simplesmente *sink*. Em decorrência disso, existe uma restrição por vizinhança, já que vértices vizinhos não podem executar ao mesmo tempo.

Um vértice *sink*, após executar, passa a vez aos seus vizinhos. Isso significa que todas as suas arestas são revertidas tão logo ele termine de operar – como sugere o nome do algoritmo. Neste estado, ele é dito um *nó-fonte*, ou *source*. Para efeitos práticos desta dissertação, admite-se que os vértices *sink* operam sincronamente, isto é, seu tempo de processamento é idêntico<sup>2</sup>.

O correto funcionamento do SER requer que o estado inicial do grafo direcionado seja acíclico, caso contrário haveria uma dependência cíclica e os vértices estariam em *deadlock* (ilustrado na figura 3.1). Além disso, a partir de um estado inicial sem ciclos, pode-se garantir que não haverá *deadlock* ou *starvation* durante toda a operação do algoritmo, pois o algoritmo de reversão de arestas garante o não surgimento destas condições; para demonstração e prova desta e das demais propriedades, ver [6].

Existem métodos específicos para se gerar este estado inicial acíclico que serão detalhados mais adiante, na seção 3.3. Além disso, o SER garante também que a dinâmica de reversões convergirá para um *período*, isto é, uma sequência de estados do grafo que tornará a se repetir em tempo finito. Finalmente, de sua dinâmica

<sup>2</sup>O SER pode, entretanto, operar assincronamente. Consultar [5] para mais detalhes.

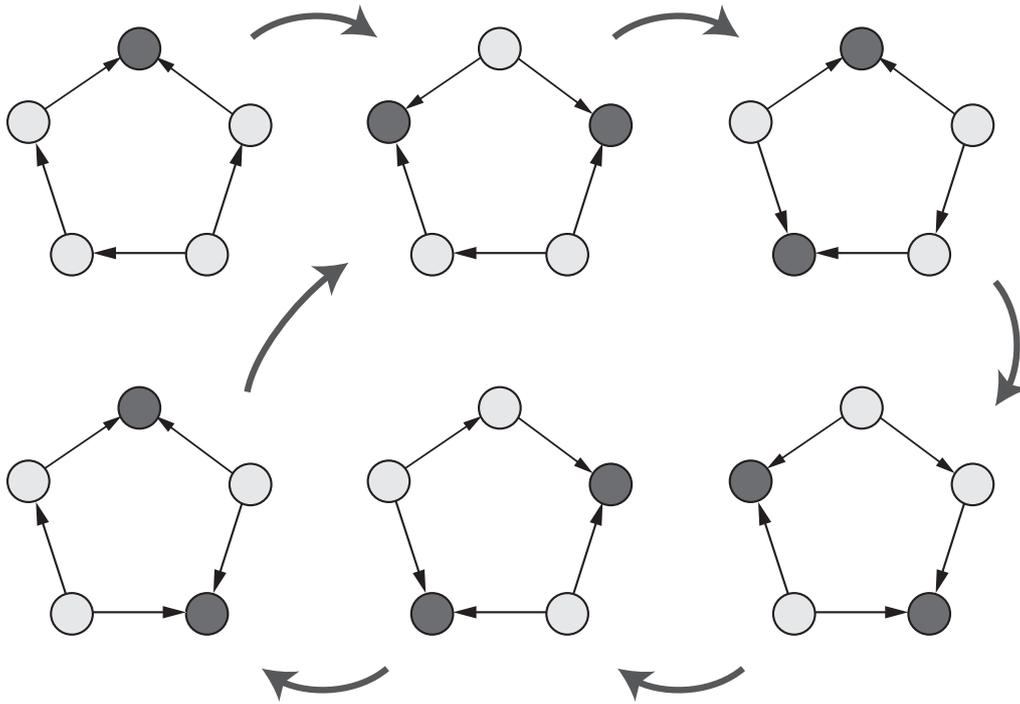


Figura 3.2: Exemplo da dinâmica do SER num grafo em anel com cinco vértices.

resulta que todos os vértices executarão o mesmo número de vezes durante um período, o que garante o conceito de *justiça*.

De maneira sucinta, o SER funciona da seguinte forma:

- Inicialmente,  $G$  é orientado de forma que não haja ciclos formados pelas arestas direcionadas;
- Vértices que são *sink* no estado atual executam;
- Ao fim da execução, todos os vértices *sink* revertem suas arestas;
- Devido à garantia da ausência de *deadlocks*, haverá pelo menos um vértice *sink* resultante da reversão; o novo conjunto de *sinks* executa, reverte suas arestas e, assim, o ciclo se repete.

A figura 3.2 ilustra a dinâmica do SER em funcionamento. Neste exemplo, dois detalhes são interessantes: primeiro, o fato de que o estado inicial do grafo não participa do período do grafo – o grafo nunca mais voltará a este estado; segundo, dentro do período, cada nó opera exatamente duas vezes, observando a justiça imposta pelo algoritmo<sup>3</sup>.

<sup>3</sup>Apesar de um dos vértices ter executado uma vez a mais que os outros no estado inicial, dado um número suficiente de execuções do período do grafo, a contribuição desta execução para a taxa média de operação daquele vértice será insignificante, prevalecendo a justiça.

A justiça do SER garante que todos os processos operem com a mesma frequência. Porém, esta condição pode ser indesejável, dependendo da especificidade da aplicação submetida. A seguir será apresentada uma generalização do SER, cuja proposta é garantir taxas de execução específicas para cada processo: o SMER.

## 3.2 SMER

O Escalonamento por Reversão de Múltiplas Arestas (do inglês, *Scheduling by Multiple Edge Reversal* – SMER) é uma generalização do SER, no sentido em que permite que se defina uma frequência de execução relativa específica para cada processo do sistema. De forma sucinta, isso significa que a justiça deixa de ser uma restrição para que seja possível mudar as taxas e determinados processos possam executar mais frequentemente que outros.

Diferentemente do SER, em um multigrafo SMER  $\mathcal{M} = (\mathcal{V}, \mathcal{E})$ , pode existir um número qualquer de arestas  $e_{i,j} \in \mathcal{E}$  ligando dois vértices  $v_i$  e  $v_j$  ( $v_i, v_j \in \mathcal{V}$ ); a esse conjunto de arestas dá-se o nome de *arco*.

Além disso, a cada vértice  $v \in \mathcal{V}$  do multigrafo, é associado um parâmetro  $r_v$  chamado *reversibilidade*. Para ser *sink*, um vértice  $v_i$  precisa possuir, para cada arco com um vizinho, pelo menos  $r_i$  arestas direcionadas para si. Após executar,  $v_i$  reverte  $r_i$  arestas para cada um de seus vizinhos.

Por conta da multiplicidade de arestas, surge uma restrição: entre  $v_i$  e  $v_j$  não deve haver mais que  $r_i + r_j - 1$  arestas. Isso garante que em nenhum momento os dois poderão executar simultaneamente. Mais precisamente, a fórmula usada para gerar o exato número mínimo necessário de arestas entre dois vértices  $v_i$  e  $v_j$  é

$$e_{i,j} = r_i + r_j - \gcd(r_i, r_j)$$

Onde  $\gcd(a, b)$  é o *máximo denominador comum* entre  $r_i$  e  $r_j$ . A demonstração pode ser vista em [7].

Para quaisquer vizinhos  $v_i$  e  $v_j$  em  $\mathcal{M}$ , a razão entre o número de vezes que  $v_i$  tem prioridade sobre  $v_j$  converge para  $r_j/r_i$ , que é a taxa relativa de execução entre os dois vértices. Dessa maneira, o SER é um caso particular do SMER onde todos os vértices possuem mesma reversibilidade, de modo que a razão das frequências será sempre 1, caso em que a justiça vigora.

Uma preocupação inicial em aplicar o SMER para controlar um semáforo era a de que ele deixasse em longa espera um dos vértices, de forma que a distribuição dos tempos de execução não estivesse bem “permeada” no tempo. Isso prejudicaria o funcionamento do controlador, potencializando a formação de filas. Porém, foi visto que o SMER faz um bom trabalho em alternar as execuções de vértices vizinhos e que

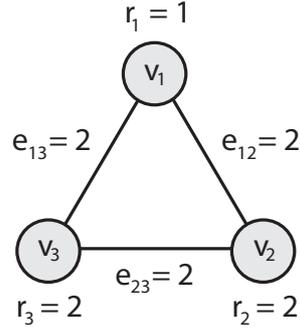


Figura 3.3: Exemplo de multigrafo SMER com as demandas explicitadas.

suas taxas de execução rapidamente convergem para o esperado. Mais precisamente, para dois vértices  $v_i, v_j \mid r_i \geq r_j$ , são alternadas  $\lfloor r_i/r_j \rfloor$  ou  $\lceil r_i/r_j \rceil$  execuções de  $v_j$  com uma de  $v_i$ , até que tal alternância tenha ocorrido  $r_j/\gcd(r_i, r_j)$  vezes. Além disso,  $\lceil r_i/r_j \rceil$  ocorre exatamente  $(r_i \bmod r_j)/\gcd(r_i, r_j)$  vezes, enquanto no restante das  $(r_j - r_i \bmod r_j)/\gcd(r_i, r_j)$  vezes, ocorre  $\lfloor r_i/r_j \rfloor$ . A demonstração pode ser vista em [7].

A figura 3.3 ilustra um grafo SMER com três vértices, em que um deles deve ter uma frequência duas vezes maior de execução que a dos outros dois. Diz-se que sua *demand*a é duas vezes maior. Para calcular as reversibilidades, o primeiro passo consiste em obter o *mínimo múltiplo comum* de todas as demandas. As demandas são:

$$\begin{aligned} d_1 &= 2 \\ d_2 &= 1 \\ d_3 &= 1 \end{aligned}$$

O mínimo múltiplo comum vale:

$$lcm(d_1, d_2, d_3) = 2$$

As reversibilidades são, então, calculadas dividindo o mínimo múltiplo comum por cada uma das demandas:

$$\begin{aligned} r_1 &= lcm(d_1, d_2, d_3)/d_1 = 1 \\ r_2 &= lcm(d_1, d_2, d_3)/d_2 = 2 \\ r_3 &= lcm(d_1, d_2, d_3)/d_3 = 2 \end{aligned}$$

Com as reversibilidades, resta calcular quantas arestas serão necessárias em cada arco:

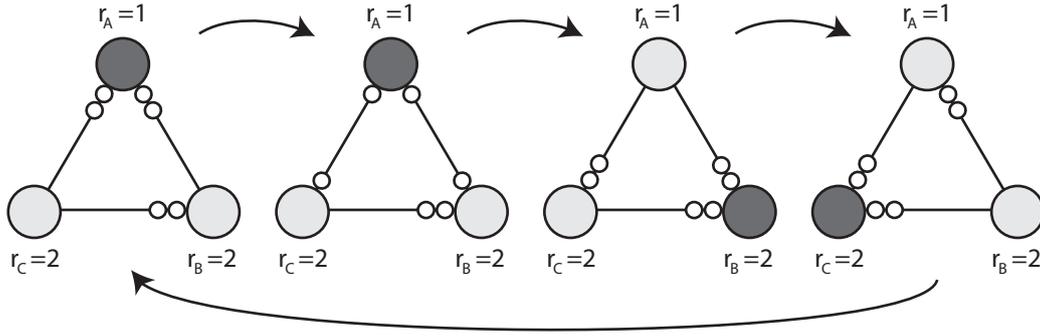


Figura 3.4: Exemplo de estado inicial e período do grafo.

$$e_{12} = r_1 + r_2 - \gcd(r_1, r_2) = 1 + 2 - 1 = 2$$

$$e_{13} = r_1 + r_3 - \gcd(r_1, r_3) = 1 + 2 - 1 = 2$$

$$e_{23} = r_2 + r_3 - \gcd(r_2, r_3) = 2 + 2 - 2 = 2$$

A figura 3.4 mostra um possível estado inicial, bem como o período que decorre dele. Como pretendido, o vértice  $v_1$  executa duas vezes mais por período que os outros vértices.

### 3.2.1 Deadlocks

Existe uma questão em aberto que é a de como encontrar um estado inicial para um multigrafo SMER qualquer, com a garantia de que o sistema não entrará em *deadlock*. Para multigrafos simples, é possível saber se um estado inicial  $s$  incorrerá em *deadlock* com a seguinte regra: para cada ciclo  $k$  no grafo equivalente não-direcionado, o número de arestas  $\sigma(k)$  apontadas num sentido do ciclo no grafo direcionado não pode ser maior ou igual que a soma das reversibilidades dos vértices daquele ciclo,  $\rho(k)$ .

Para exemplificar o funcionamento da regra, a figura 3.5 mostra o caso de um grafo SMER cujo estado inicial levará a um *deadlock*. A soma das reversibilidades dos três vértices participantes do ciclo é:

$$\rho(k) = \sum_{v_i \in k} r_i = r_A + r_B + r_C = 3 + 2 + 2 = 7$$

A soma das arestas direcionadas no sentido anti-horário é:

$$\sigma^-(k) = \sum_{(v_i, v_j) \in k^-} a_s^{ij} = a^{AC} + a^{CB} + a^{BA} = 2 + 0 + 0 = 2$$

Já a soma das arestas direcionadas no sentido horário vale:

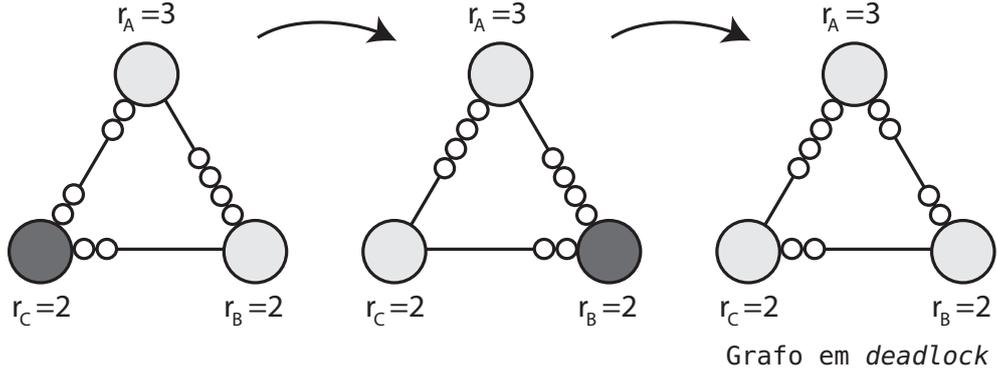


Figura 3.5: Exemplo de multigrafo SMER em *deadlock*.

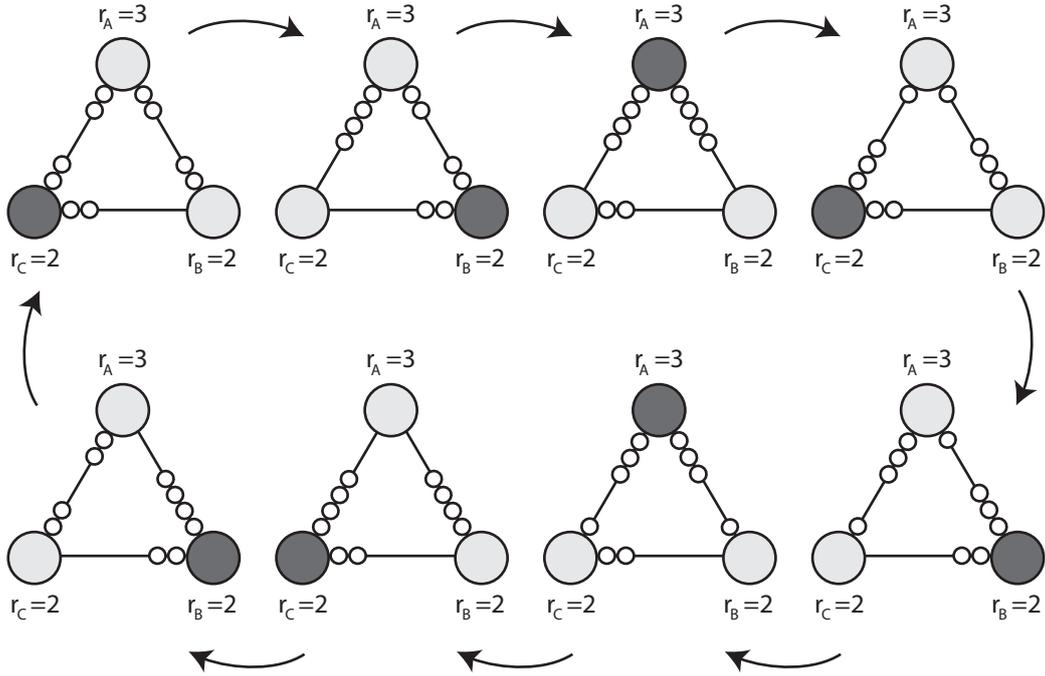


Figura 3.6: Exemplo do multigrafo SMER em operação sem *deadlock*.

$$\sigma^+(k) = \sum_{(v_i, v_j) \in k^+} a_s^{ij} = a^{CA} + a^{AB} + a^{BC} = 2 + 4 + 2 = 8$$

Para garantia de ausência de *deadlock*:

$$\max \{ \sigma^+(k), \sigma^-(k) \} < \rho(k) \quad (3.1)$$

O que não é verdade para o grafo do exemplo, pois  $\sigma^+(k) > 7$ . Por outro lado, se o estado inicial do exemplo fosse ligeiramente alterado para garantir a regra, um período seria observado, como pode ser visto na figura 3.6. A única modificação são duas arestas no arco  $(v_A, v_B)$  que foram revertidas para  $v_A$ , de forma a fazer valer a regra supracitada.

Apesar disso, a detecção de *deadlocks* torna-se difícil para grafos mais complexos,

além de ser muito custosa a comunicação entre os vértices para detecção desses estados indesejados. Por isso, foi proposto na tese de Santos [10] um novo método utilizando a *mudança de reversibilidades*.

### 3.2.2 Mudança de Reversibilidade

No trabalho de Santos anteriormente citado, foi demonstrado ser factível que vértices num multigrafo SMER mudem suas taxas relativas de execução, mesmo durante a operação do mecanismo de escalonamento. A um vértice, é permitida esta mudança **apenas quando ele se encontra na condição de *sink***; com isso, há garantia de que o grafo não será levado para um estado em *deadlock*. Esta possibilidade torna-se interessante para resolver a questão de como encontrar o estado inicial para o grafo.

A ideia consiste em iniciar o grafo na condição específica de que todos os vértices possuem a mesma frequência de execução; nesta condição, o grafo incide no caso especial do SER, em que é possível, através de um estado inicial acíclico, assegurar a operação sem *deadlocks* (a geração de estados iniciais acíclicos para o SER será vista na seção 3.3). A partir daí, na medida em que os vértices forem tornando-se *sinks*, estes têm o direito de alterar suas reversibilidades de modo a ajustar sua frequência de execução em acordo com a demanda desejada. Após todos os vértices terem tido chance de executar uma vez, tem-se que o multigrafo SMER conseguiu ser inicializado com a garantia de ausência de *deadlock*.

A mudança é possível, pois, um vértice *sink*, tendo conhecimento das reversibilidades de seus vizinhos, é capaz de recalcular o número de arestas em cada arco incidente a si para levar em conta a nova demanda. Seus vizinhos não sofrem nenhuma mudança, entretanto o sistema automaticamente sofrerá um redimensionamento de seu período a partir da nova reversibilidade.

O *modus operandi* do mecanismo de mudança de reversibilidade garante que a ausência de *deadlocks* será mantida, seja a reversibilidade alterada para mais ou para menos. A inequação 3.1 continua sendo respeitada, já que qualquer alteração na reversibilidade do vértice *sink* é reproduzida em ambas as parcelas.

Para demonstrar o mecanismo de mudança de reversibilidade na prática, a figura 3.7 ilustra um grafo com dois vértices, onde se deseja que, ao final da inicialização,  $v_1$  trabalhe com uma demanda de valor 3, enquanto a de  $v_2$  seja de 2. Assim,  $r_1$  valerá 2, enquanto  $r_2$  valerá 3. Para isso o grafo é iniciado num estado acíclico, com ambos os vértices possuindo reversibilidade 1.

No estado inicial escolhido,  $v_1$  começa como *sink*. Como ele tem a vez e deseja mudar sua reversibilidade para 2, assim o faz, recalculando o novo número de arestas que devem existir entre ele e  $v_2$ :

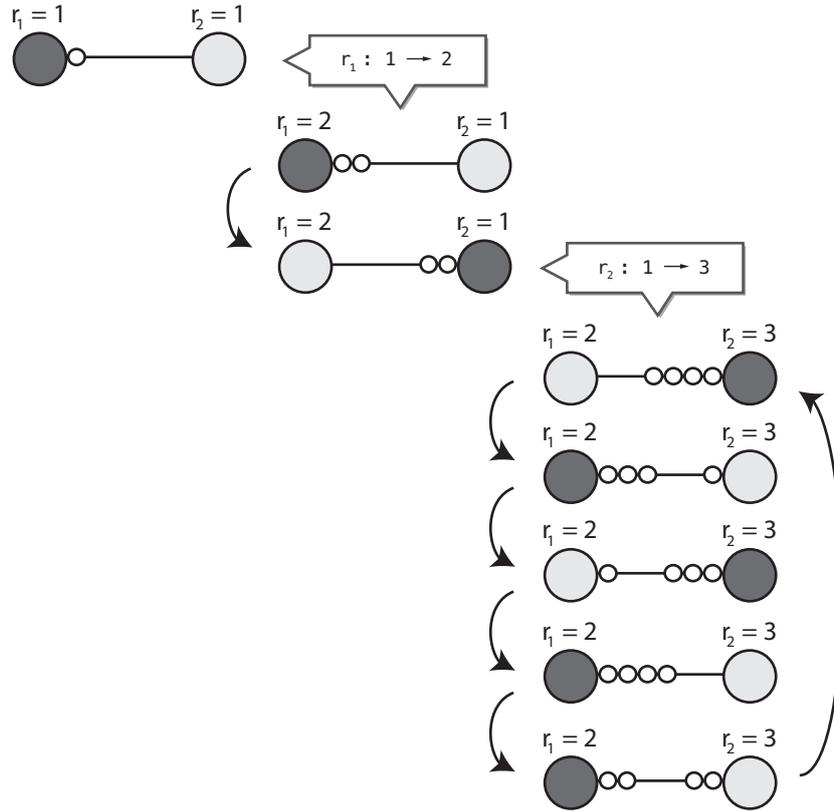


Figura 3.7: Exemplo do mecanismo de mudança de reversibilidade em ação.

$$e_{12} = r_1 + r_2 - \gcd(r_1, r_2) = 2 + 1 - 1 = 2$$

Dessa maneira, o arco passa agora a ter duas arestas, que  $v_1$  reverte assim que termina sua execução. Em seguida,  $v_2$  torna-se *sink*, passando pelo mesmo processo. No caso dele, sua nova reversibilidade será 3, e o arco deve ser recalculado mais uma vez:

$$e_{12} = r_1 + r_2 - \gcd(r_1, r_2) = 2 + 3 - 1 = 4$$

Assim, agora o arco possui quatro arestas, das quais três serão revertidas ao final da execução de  $v_2$ . A partir deste momento, o grafo SMER passa a ter um período estável e segue sua operação normal.

Para concluir o assunto, vale observar que este trabalho, além de utilizar o algoritmo de mudança de reversibilidade para inicializar o grafo SMER, usa-o pela primeira vez para adaptar periodicamente as reversibilidades, de maneira a acompanhar a variação de demanda na chegada de veículos em interseções sinalizadas.

## 3.3 Geração de Estados Iniciais

Uma pré-condição para o funcionamento tanto do SER, quanto do SMER, é a necessidade do grafo possuir uma orientação inicial que não leve a um estado de *deadlock*. Isso garante que pelo menos um vértice *sink* entrará em execução a cada início de estado do grafo. Além disso, quanto maior o número de *sinks* operando simultaneamente, maior será a concorrência, o que evidencia a importância do algoritmo responsável por gerar a orientação acíclica inicial. Dois algoritmos são descritos abaixo: o *Alg-Arestas* e o *Alg-Cor*, apresentados inicialmente em [31] e [32].

Ambos os algoritmos operam de forma distribuída, são de extrema simplicidade e progressivamente determinam a orientação de cada aresta no grafo. Para ambos os casos, fala-se em nós *probabilísticos* e *determinísticos*. No início dos algoritmos, todos os nós começam como probabilísticos; isso significa que todos estão participando do algoritmo. Na medida em que os algoritmos evoluem, os nós que têm todas as suas arestas já direcionadas passam a ser determinísticos e deixam de participar das próximas iterações. Ambos os algoritmos terminam quando todos os nós passam a ser determinísticos.

### 3.3.1 Alg-Arestas

Em cada passo do algoritmo, os nós probabilísticos escolhem um número aleatório com distribuição uniforme no intervalo  $[0, f[$ , como se estivessem jogando um dado de  $f$  faces. Assim que todos escolhem, cada um compara seu número com o número de seus vizinhos. Caso seu número seja maior que o de seu vizinho, o nó orienta a aresta que compartilha com aquele vizinho para si. Em caso de empate, nada é feito e é aguardada a próxima rodada. Um nó que tenha todas as suas arestas orientadas, torna-se determinístico e não participa da próxima iteração. Quando todos os nós forem determinísticos, todas as arestas terão sido orientadas.

### 3.3.2 Alg-Cor

O Alg-Cor tem o objetivo de aumentar a concorrência da orientação acíclica inicial do grafo, tendendo a produzir um maior número de *sinks* no estado inicial. O passo inicial é idêntico ao Alg-Arestas, onde cada nó escolhe um número inteiro aleatoriamente num intervalo  $[0, f[$ . A diferença é que, quando o nó ganha uma disputa, ele escolhe para si uma cor, que aqui é representada por um número inteiro maior ou igual a zero. Esta cor deve ser tal que não seja igual a nenhuma cor dos vizinhos já coloridos e seja a de menor valor possível. Em caso de empate, assim como no Alg-Arestas, um novo sorteio é feito. Cada nó que for colorido orienta as arestas que compartilha com vizinhos previamente coloridos na direção da maior cor

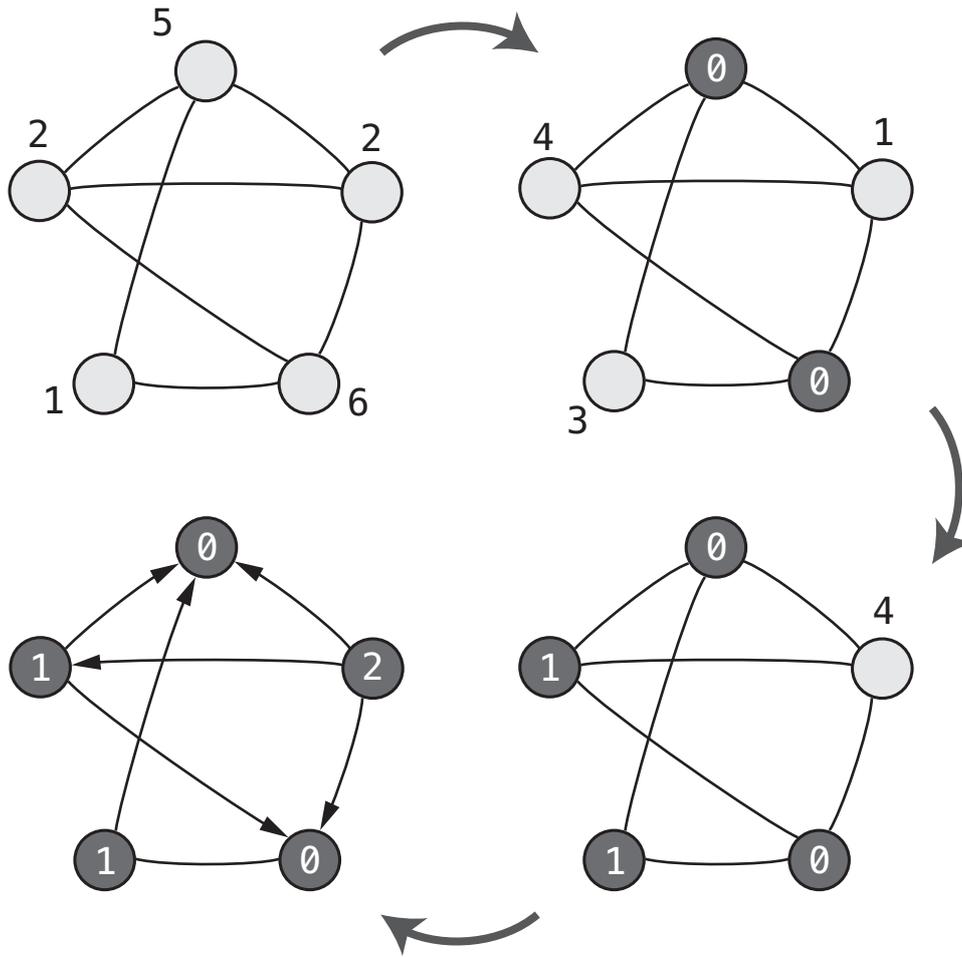


Figura 3.8: Exemplo de operação do Alg-Cor.

para a menor. Quando o algoritmo termina, todas as arestas estão orientadas.

A figura 3.8 mostra um exemplo de funcionamento do algoritmo. Na primeira rodada, os vértices jogam dados e dois deles conseguem resultados maiores que seus vizinhos, escolhendo então a cor zero para si. Dos outros três vértices, dois empataram e um perdeu, portanto continuam sendo não-determinísticos. No passo seguinte, o vértice que tirou 3 não tinha mais competidores, portanto automaticamente se pinta com a menor cor disponível, 1. O vértice que tirou 4 vence a disputa com o último nó, que na próxima rodada não vai ter competidores e automaticamente escolherá a cor 2. Ao final da etapa de dados, as arestas são direcionadas apontando para as cores de menor valor.

# Capítulo 4

## MicroLAM

MicroLAM é o simulador microscópico de trânsito construído como parte do trabalho para a presente dissertação, especificamente com o intuito de avaliar o mecanismo proposto de controle e coordenação de sinais. Todos os resultados deste trabalho foram obtidos através de cenários processados por este simulador. A figura 4.1 ilustra sua interface gráfica.

### 4.1 Motivação

Inicialmente foi avaliada a possibilidade de se fazer uso de um simulador pré-existente. Diversos simuladores foram avaliados (vide seção 1.2.2). O maior impedimento encontrado foi a impossibilidade de se poder desenvolver módulos personalizados para estes simuladores, já que o foco deles não é voltado para pesquisa acadêmica, mas sim para auxiliar engenheiros de tráfego na construção e avaliação de cenários tradicionais de trânsito. Fugindo à regra, alguns simuladores como o *Microsimulation of Road Traffic Flow* [18] e o *SUMO* [16] foram desenvolvidos no meio acadêmico e possuem código-fonte aberto. A opção por não usá-los foi a dificuldade encontrada em estender o código já existente, que não foi construído de forma modularizada e mostrou-se ser confuso e pouco comentado. Além disso, há pouco conforto na geração de resultados, pois as medidas de interesse a serem extraídas para as conclusões deste trabalho não eram de fácil obtenção nestes simuladores.

Neste momento, o desenvolvimento do MicroLAM ganhou um viés tal que o produto final pudesse ser facilmente estendido, de forma que outros trabalhos pudessem ser construídos a partir dele sem grande esforço. No momento da escrita deste trabalho, outros dois trabalhos começam a ser desenvolvidos utilizando este simulador como base de testes.

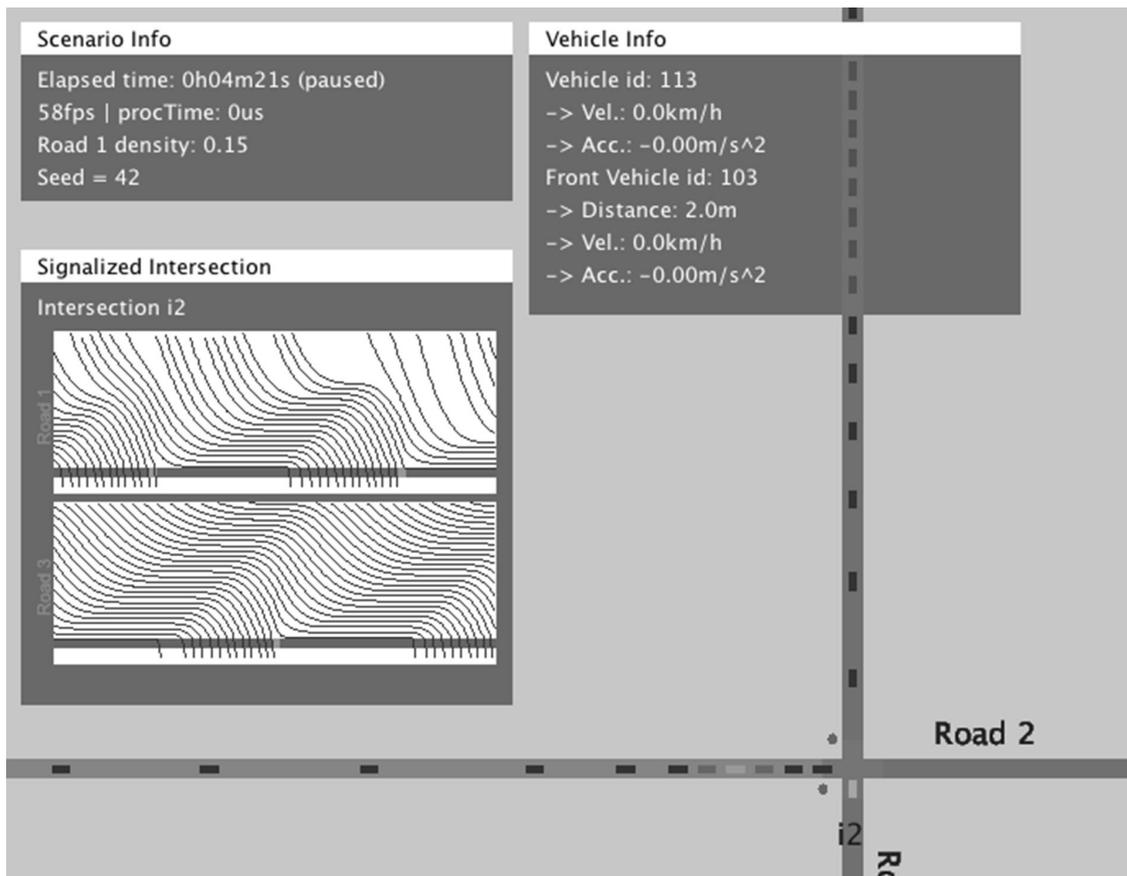


Figura 4.1: Interface gráfica do MicroLAM.

## 4.2 Características Gerais

Segundo as classificações usuais dadas a um simulador de trânsito, o MicroLAM é microscópico, modelando cada veículo e seu comportamento individualmente. Além disso, também é determinístico, pois, dado um conjunto determinado de valores para os parâmetros de entrada, ele produz sempre a mesma saída. O simulador implementa taxas variáveis de fluxo de entrada de veículos, permitindo testar cenários com fluxos que se intensificam ou abrandam durante o decorrer do tempo. Finalmente, é um simulador descritivo, no sentido de que seu intuito não é o de fornecer na saída uma solução que optimize determinada medida de interesse, mas sim o de processar passivamente o comportamento dos agentes fornecidos como parâmetros de entrada. Para mais detalhes sobre essas classificações, consultar a seção 2.5.

Do ponto de vista do *software*, por ser implementado para operar numa máquina virtual *Java*, ele oferece suporte a múltiplas plataformas. Além disso, o MicroLAM não possui dependências externas e pode inclusive ser executado através de um *browser*.

Quanto ao modo de execução, ele possui um modo *off-line*, executando a simulação no menor tempo possível e gerando relatórios ao final da execução; também

pode ser operado com um visualizador gráfico em tempo real, que permite ao usuário acompanhar a evolução da simulação e visualizar com mais facilidade os dados obtidos através dos relatórios.

### 4.3 Vias e Interseções

Um cenário no MicroLAM é modelado como um grafo, onde os vértices representam interseções e as arestas que os conectam representam segmentos de via. Como num grafo em que um vértice pode possuir um grau qualquer, uma interseção pode receber e escoar fluxos de veículos por um ou mais segmentos de via. No que diz respeito à direção e ao sentido destes fluxos, os segmentos de via podem ser visualizados como arestas direcionadas, apontando no sentido de escoamento dos veículos.

No estágio atual de desenvolvimento do simulador, somente é possível criar vias de mão única <sup>1</sup>. Além disso, as vias só podem possuir uma faixa. Em um dos trabalhos em andamento que estão se utilizando do MicroLAM, está sendo feita a implementação de múltiplas faixas.

As interseções podem ser do tipo sinalizada ou não-sinalizada. Quando do tipo sinalizada, a interseção possui um módulo controlador (análogo ao *hardware* utilizado em controladores reais) com a função de ditar a sequência de execução dos movimentos permitidos e os não-permitidos em cada fase do sinal. Atualmente estão implementados o modelo clássico (pré-temporizado) e o controlador SMER com sua variante coordenada (a serem vistas em detalhe no capítulo 5).

Quando a interseção não possui sinalização, ela deixa a cargo do modelo de motorista tomar a decisão de como e quando deve atravessar um cruzamento que está sendo compartilhado com fluxos concorrentes. O IDM, apesar de ter sido concebido para vias isoladas, foi ajustado experimentalmente neste trabalho para detectar fluxos concorrentes de modo a evitar colisões irreais.

Há ainda dois casos especiais de interseção: as de entrada e as de saída do sistema. Apesar de não serem interseções propriamente ditas (são nós que possuem uma e apenas uma via ligada a eles), elas são responsáveis por alimentar e escoar os fluxos de veículos que vão trafegar pelo cenário.

### 4.4 Modelos de Motorista

Baseado no modelo clássico de perseguição veicular [33], o simulador permite a implementação de qualquer tipo de modelo de motorista (do inglês, *driver models*), inclusive possibilitando a simulação de diversos modelos atuando concomitantemente.

---

<sup>1</sup>Isso, todavia, não impede a simulação de vias de mão dupla, bastando tão somente a criação de duas vias paralelas correndo em sentidos opostos.

Atualmente, existem dois modelos em funcionamento: o IDM [19] (*Intelligent Driver Model*) e o SDM (*Smart Driver Model*, este último em desenvolvimento por um aluno de mestrado do PESC/UFRJ). O modelo usado em todos os cenários desta dissertação foi o IDM.

## 4.5 Fluxos de Veículos

Aos nós de entrada estão associados parâmetros que ditam as propriedades do fluxo que será introduzido através deles. Esses parâmetros ditam a taxa de chegada, a distribuição das chegadas e dos intervalos entre elas, os tipos de modelos de motorista que serão gerados e como a taxa varia ao longo do tempo de simulação.

A distribuição entre as chegadas pode funcionar com intervalos constantes (a chegada do próximo veículo acontece num intervalo determinado e constante após a chegada do atual) ou seguindo um *Processo de Poisson*. Nesta última, o intervalo entre as chegadas é dado por uma distribuição exponencial, comportamento tipicamente encontrado em vias de longa extensão em que não há nenhum tipo de formação de pelotões de qualquer forma. É possível também construir um gerador de pelotões, simplesmente adicionando uma interseção sinalizada que receba um fluxo constante em sua entrada.

Além disso, o simulador também permite a variação da volume de tráfego em função do tempo da simulação. Atualmente dois modelos são possíveis. No primeiro, a taxa de chegadas se mantém constante durante toda a execução; no segundo, ela varia segundo uma senóide que possui um valor máximo e um mínimo (medidos em veículos por hora), bem como um período (em minutos ou horas). Esta variação é essencial para representar cenários reais em que o volume varia ao longo do dia, particularmente importante para a simulação de momentos de pico (conhecidos popularmente como “*horário de rush*”). Os resultados deste trabalho mostram uma aplicação da variação senoidal para testar a eficiência dos mecanismos de controle a serem vistos no capítulo 5.

O MicroLAM executa uma simulação determinística das chegadas de veículos, baseada numa semente fornecida através do arquivo que representa o cenário a ser processado. Isso significa que, apesar das chegadas seguirem um processo pseudo-aleatório, é possível reproduzir a mesma sequência de chegada para diversos cenários distintos sem enviesar o comportamento de chegada dos veículos. Assim, é possível obter dados com alta fidelidade ao se variar outros componentes do cenário, tendo a garantia de que a sequência de chegadas será a mesma.

## 4.6 Controlador de Sinais

Interseções sinalizadas tradicionalmente possuem uma sequência de *fases* que se repete ao longo de seu funcionamento. A essa sequência, dá-se o nome de *ciclo* (ver o capítulo 2). Em cada fase, um conjunto de *movimentos legais* ganha permissão para travessia da interseção com garantia de segurança de que seus veículos não encontrarão fluxos concorrentes atravessando concomitantemente, evitando assim acidentes.

No controlador tradicional, uma sequência bem determinada se mantém operando durante todo o tempo. Cada fase possui um tempo pré-calculado de verde, amarelo e vermelho e o ciclo possui uma sequência fixa de execução dessas fases.

No MicroLAM, entretanto, é possível definir qualquer tipo de comportamento para as fases. Essa liberdade de implementação foi utilizada para construir o controlador SMER, que não trabalha com o conceito de um ciclo, já que a sua sequência de fases não segue uma ordem pré-determinada, mas sim ditada em resposta ao comportamento dos próprios fluxos de veículos que chegam à interseção.

Além disso, o controlador também pode interagir com sensores instalados nas vias, tornando-se assim um controlador atuado (ver 2.3 e 4.8).

## 4.7 Coordenador de Sinais

Foi criado um coordenador de sinais genérico, cujo trabalho é o de computar, baseado na velocidade limite da via, o tempo que leva para que um veículo, deixando uma determinada interseção, cruze a via e chegue na interseção *downstream*. A esse valor dá-se o nome *offset*, como pode ser visto na seção 5.3. O trabalho principal do sistema de coordenação é garantir que estes *offsets* sejam computados ao longo de uma sequência de interseções sinalizadas, por onde um determinado fluxo vai passar. Essa coordenação forma um corredor por onde os passam sem interrupção, assim ganhando o nome popular de “onda verde”.

No simulador, um corredor coordenado pode ter, genericamente, o formato de um grafo em árvore. No arquivo de entrada da simulação são especificadas as interseções que participam de determinado corredor. A partir dessa informação, o coordenador automaticamente computa os *offsets* baseado num tempo fixo de ciclo para todos os sinais, condição básica para funcionamento do sistema coordenado.

## 4.8 Sensores

O MicroLAM implementa atualmente três tipos de sensores: de passagem, de presença e de área.

**Sensor de Passagem** O sensor de passagem é uma implementação dos sensores tradicionais que detectam a passagem de um veículo por um determinado ponto da via. Estes sensores tipicamente detectam veículos que estejam andando com velocidades maiores que 8 km/h [34].

**Sensor de Presença** Também uma implementação de um sensor tradicional, o sensor de presença detecta veículos que repousem sobre ele, ou que estejam andando abaixo da velocidade limite de reconhecimento, que, assim como o limite do sensor de passagem, costuma ser de cerca de 8km/h.

**Sensor de Área** Este detetor afere a densidade de uma determinada região de via, produzindo diversas amostras ao longo de um determinado período. A cada iteração do sensor, o número de veículos na via é capturado e somado num acumulador. Ao final do período, o resultado acumulado é normalizado pelo comprimento da via e sua média é extraída. O resultado final é uma média da contagem de veículos por metro de via, por unidade de tempo. O controlador semafórico pode utilizar a extração do valor comparado de cada via para ter uma dimensão das demandas requeridas em cada fase.

O sensor de área não é a implementação de um sensor tradicional, mas sim uma abstração de um sensor capaz de medir a ocupação da via. Alguns exemplos de implementação existem na área de ITS, comumente utilização o uso de câmeras de vídeo e técnicas de computação visual (ver [27] para detalhes).

## 4.9 Extração de Relatórios

O simulador possui ainda um módulo de extração de relatórios, capaz de aferir diversas medidas do sistema. O relatório pode ser programado ainda para tirar *snapshots* durante o processo de simulação, de forma a poder se observar como as medidas evoluíram ao longo da execução. O arquivo de saída também detalha cada uma das medidas analisadas isoladamente em cada segmento de via, tornando possível tirar conclusões a respeito de regiões específicas do sistema.

As medidas atualmente passíveis de extração são: contagem de veículos, tempo de viagem, tempo de espera, velocidade e *headway*. Para cada uma dessas medidas, são extraídas a média, valor máximo, mínimo e desvio padrão da amostra. Cada um desses valores é extraído tanto para o escopo global (sistema como um todo) quanto para o local (cada segmento de via analisado individualmente).

O arquivo de saída segue o formato CSV, porém foi criado um *script BASH* capaz de converter a saída e gerar automaticamente gráficos no *GNUPlot* [35]. Exemplos

dessa geração podem ser visto no capítulo 6, quando são apresentados os resultados do trabalho.

## Capítulo 5

# Controlador e Coordenador de Tráfego SMER

Neste capítulo, são apresentados os dois mecanismos propostos no trabalho. Na seção 5.1 é introduzido o conceito da interseção como um recurso compartilhado, abstração necessária para o entendimento dos mecanismos; na seção 5.2, um novo controlador de semáforo inteligente é descrito, capaz de se reajustar às condições de tráfego mais recentes, utilizando a dinâmica do SMER para balancear volumes de veículos concorrentes de maneira proporcional. Na seção 5.3, aborda-se um novo mecanismo coordenador, também sensível às variações do tráfego, incumbido de gerenciar, de forma distribuída, uma rede de corredores que se cruzam e competem pela travessia de interseções sinalizadas.

### 5.1 A Interseção como um Recurso Compartilhado

A área de uma interseção entre vias pode ser pensada como um recurso a ser compartilhado entre os fluxos de tráfego concorrentes que por ela passam; estes fluxos, por sua vez, podem ser considerados processos que, para poder operar, necessitam de acesso a este recurso. A figura 5.1 ilustra essa analogia aplicada a uma interseção complexa.

Um processo, ao executar, toma para si o recurso, que fica temporariamente indisponível para os demais até que a execução termine. Baseado nesse conceito, no exemplo da figura citada, se  $f_A$  estiver acessando o cruzamento, nenhum outro fluxo poderia acessá-lo. É importante notar, porém, que  $f_A$  não está se usando de toda a área disponível;  $f_D$ , por exemplo, poderia operar conjuntamente, sem causar conflitos. Percebe-se que haverá um desperdício de recursos caso apenas um processo possa executar por vez, pois teremos um longo comprimento de ciclo na interseção

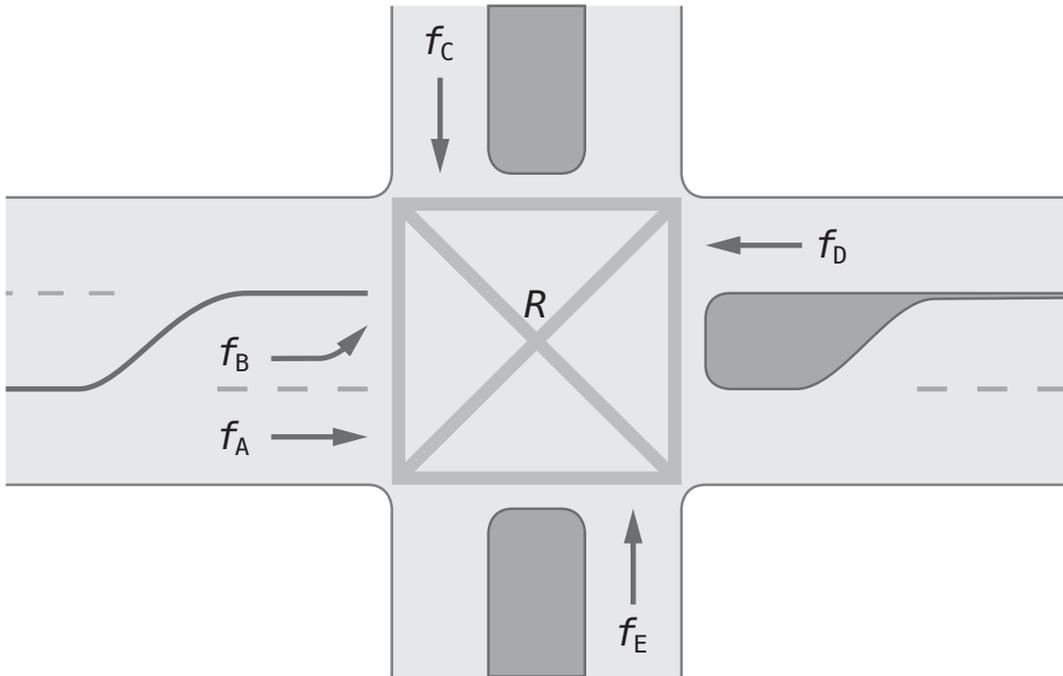


Figura 5.1: Interseção complexa modelada como um recurso.

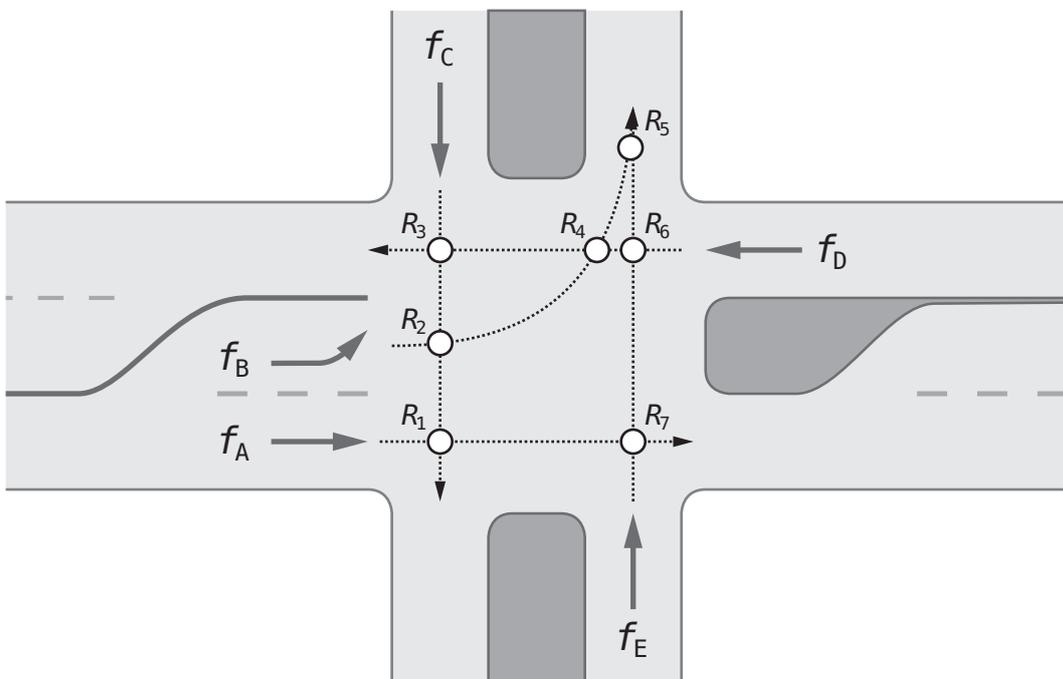


Figura 5.2: Interseção complexa modelada como um conjunto de recursos atômicos.

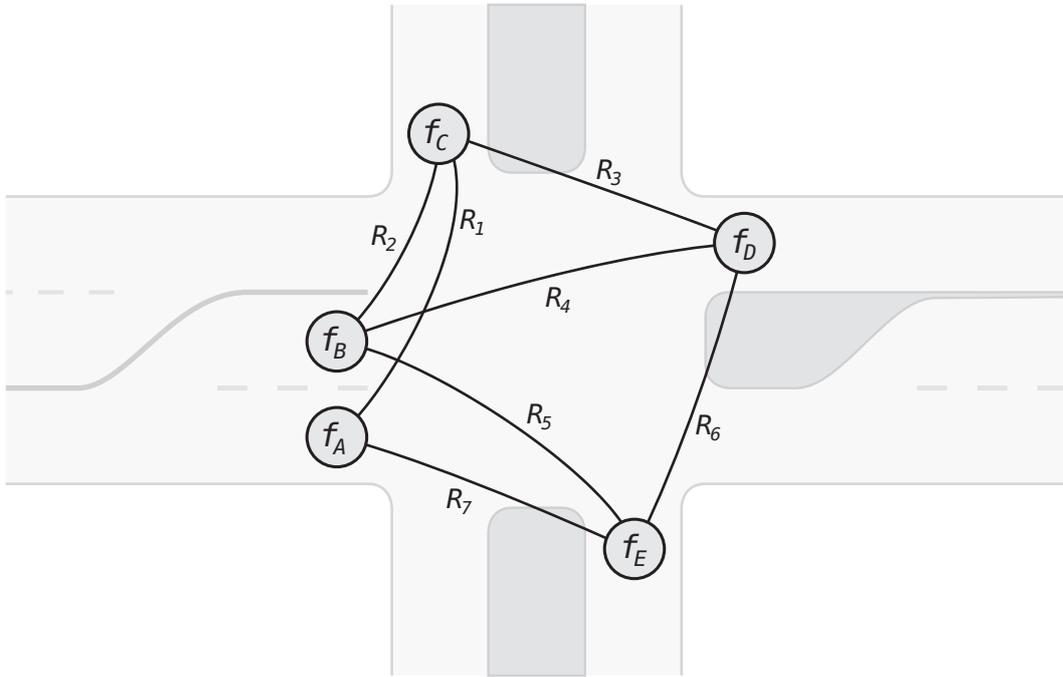


Figura 5.3: Grafo representando as dependências entre os fluxos da interseção, sob a forma de processos.

e uma baixa vazão geral.

Assim, de maneira genérica, uma interseção poderia ser ainda subdividida em regiões que mapeiam conflitos específicos entre os fluxos que trafegam por ela. Na figura 5.2, um melhoramento da abstração inicial pode ser visto, onde a área da interseção foi partilhada em recursos de menor grão.

Pode-se agora observar claramente as regiões de conflito e estabelecer com maior precisão onde devem ocorrer exclusões mútuas de forma a se evitar conflitos, porém, ao mesmo tempo, aproveitando a área da interseção de maneira mais eficiente. Por exemplo, para  $f_A$  poder operar, ele precisa dos recursos  $R_1$  e  $R_7$ ;  $R_1$  também é utilizado por  $f_C$ , logo, para que  $f_A$  possa atravessar, deve-se assegurar que  $f_C$  não irá operar; o mesmo vale para  $f_E$ , por conta do recurso  $R_7$ . Por outro lado, a execução de  $f_A$  não impede a travessia dos fluxos de  $f_B$  ou  $f_D$ .

A partir deste esquema, um grafo pode ser construído. Representando-se os fluxos (ou *processos*) como vértices, podemos relacioná-los de forma que cada par de processos que necessite de acesso ao mesmo recurso esteja ligado por uma aresta. A figura 5.3 ilustra o exemplo da interseção modelada anteriormente, agora representada por um grafo de dependências.

No trabalho de Brito [3], foi visto como se utilizar deste modelo da interseção como recurso compartilhado para construir um controlador de semáforo, baseado no modelo do SER, capaz de gerenciar e escalonar no tempo o acesso dos diferentes movimentos que concorrem pelo cruzamento, com a observação de que são assumidos

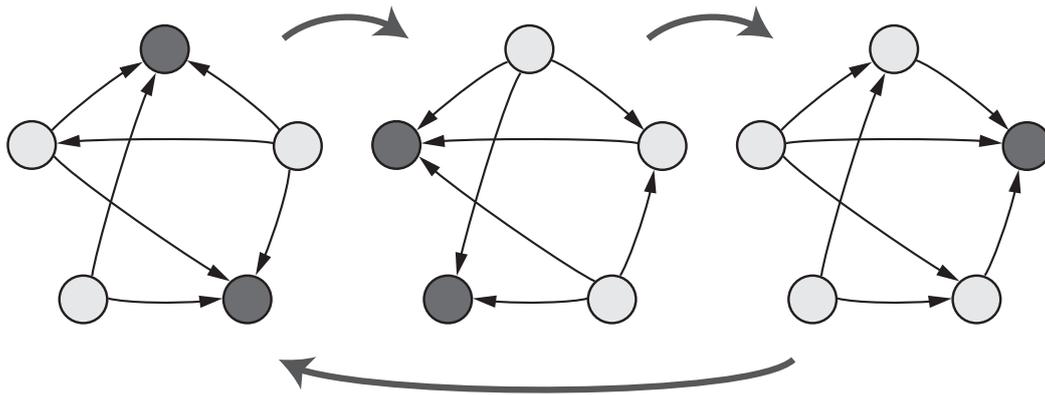


Figura 5.4: Exemplo de escalonamento do cruzamento da figura 5.3.

volumes de tamanhos iguais vindos de cada movimento.

A figura 5.4 ilustra um exemplo de utilização do SER para escalonar o exemplo visto acima. Um estado inicial é escolhido segundo o Alg-Cor. O exemplo visto na seção 3.3.2 gera o estado inicial para a interseção sendo exemplificada na figura. A partir dele, forma-se um período de repetições na sequência de fases, criando automaticamente um ciclo para o semáforo em que cada movimento é servido o mesmo número de vezes.

Cabe ressaltar, porém, que em exemplos reais de cruzamentos sinalizados, os volumes incidentes são normalmente distintos. Boa parte das interseções de uma cidade são formadas por cruzamento de vias com volumes de portes distintos, em que uma maior porcentagem do tempo útil do ciclo é alocado para a via com maior demanda. Além disso, vale lembrar que, ao longo de um dia, os volumes horários costumam variar sensivelmente em cada via, ocorrendo inclusive inversões de volume, onde, na parte da manhã, uma via requer maior demanda, enquanto na parte da tarde, a via concorrente passa a operar com maior volume.

Em vista disso, na seção 5.2 é apresentada uma evolução do controlador SER, capaz de levar em conta as variações recentes de demanda das vias.

## 5.2 Controlador de Semáforo SMER

O controlador SMER é um controlador semaforico inteligente, capaz de responder de maneira sensível às variações das condições de tráfego nas vias de chegada de uma interseção. Para isso, ele utiliza sensores instalados nas vias que sejam capazes de lhe fornecer parâmetros comparativos entre os volumes correntes de chegadas. Estes parâmetros podem ser os mais variados e alguns possíveis serão descritos na seção 5.2.2. Antes, na seção 5.2.1, será descrita a arquitetura geral do sistema, expondo o mecanismo de resposta a variações medidas nos sensores. Um exemplo ilustrará o funcionamento do mecanismo para uma interseção simples.

## 5.2.1 Metodologia de Funcionamento

Inicialmente, a cada movimento permitido pelo cruzamento é associado um vértice num grafo SMER, de forma que cada chegada de veículos seja representada por um processo no modelo. Além disso, as regiões de conflito no movimento destes fluxos são mapeadas em recursos, aos quais o acesso por cada par de processos fica representado no grafo como um aresta. Quando um vértice for *sink* no grafo SMER, seus movimentos de veículos relacionados ganharão sinal verde para atravessar o cruzamento.

No início da operação, como ainda não se possui informação sobre a demanda de cada via, o grafo começa com todos seus vértices possuindo reversibilidade 1. Tão logo comece a operar, os sensores instalados nas vias começam a aferir alguma medida de interesse à escolha do arquiteto de trânsito responsável pela implantação do sistema.

Durante a primeira etapa, cada movimento ganha acesso ao cruzamento com taxas iguais e, enquanto isso, os sensores continuam acumulando informação sobre as demandas.

Após um determinado intervalo de tempo, também a ser decidido no momento da implantação, cada dispositivo representando um processo recolhe os dados acumulados por seus sensores, utilizando algum método de agregação dos resultados afim de obter uma medida que representa unicamente a demanda daquela via para o último período observado. Feito isso, cada vértice compartilha com os demais a sua demanda, utilizando algum algoritmo genérico de propagação de informação.

Uma vez que todos conheçam as novas demandas do sistema, o grafo SMER entra numa etapa de transformação, em que, gradualmente, cada vértice torna-se apto a mudar sua reversibilidade de forma a refletir a nova condição de tráfego. Neste momento, entra em vigor o algoritmo de mudança de reversibilidade descrito na seção 3.2.2.

O cálculo das novas reversibilidades começa normalizando-se cada demanda aferida numa faixa de valores inteiros bem definida. Na implementação utilizada nos testes, esta faixa compreende os valores inteiros positivos menores que 100. Como formalizado na equação 5.1, para um vértice  $v_i$ , o valor aferido da demanda desnormalizada  $D_i$  é dividido pelo somatório de todos os valores aferidos para cada vértice do grafo e em seguida multiplicado por 100 e arredondado para o valor inteiro mais próximo, chegando-se em então ao valor normalizado da demanda  $d_i$  que será usado no algoritmo de mudança de reversibilidade.

$$d_i = \lfloor 100 * \frac{D_i}{\sum_{v \in V} D_v} + 0.5 \rfloor \quad (5.1)$$

O valor 100 foi escolhido arbitrariamente; porém, caso este valor seja de menor

grandeza, pode-se perder resolução durante o processo de normalização das demandas. Por exemplo, se o teto fosse fixado num valor igual a 5, a demanda normalizada estaria restrita a passos equivalentes a 20%, enquanto, ao manter o valor em 100, o sistema consegue precisão de variação de 1% na demanda observada. Em alguns casos, entretanto, este comportamento poderia até ser desejado para funcionar como um filtro *passa-baixa*, de forma a ignorar variações muito bruscas na demanda entre um período de aferição e o próximo.

Normalizadas as demandas, o algoritmo de mudança de reversibilidade visto anteriormente entra em funcionamento e, a partir dele, as novas reversibilidades passam a vigorar globalmente. Os sensores zeram seus acumuladores, entram numa nova etapa de aferição e o processo se repete.

## 5.2.2 Parâmetros e Sensoriamento

Um controlador atuado, de modo geral, utiliza-se de um conjunto de sensores para que possa conhecer as condições de tráfego atuais. Através do conhecimento destas condições, e baseado em regras internas, ele é capaz de tomar decisões a respeito dos tempos de fase e de ciclo em uma interseção sinalizada. Assim, é importante obter dados de boa fidelidade, de modo que o algoritmo consiga responder de maneira eficiente às condições atuais.

Para o funcionamento do Controlador SMER, foi escolhido o sensor de área 4.8 como fonte da informação sobre demanda. O interesse em usar este tipo de sensor reside na existência do problema exposto no capítulo 2, onde foi vista a importância do conhecimento da densidade para avaliação correta das condições de tráfego.

O sensor de área constantemente avalia a ocupação da via, observando o número de veículos presentes em uma determinada região fixa da via, acumulando essa informação para posterior processamento. No momento em que o controlador de semáforo requisita os dados, o sensor gera a média de ocupação observada ao longo do último ciclo e envia os dados agregados para o controlador, que usará este valor, após a normalização, para calcular as novas reversibilidades dos vértices no grafo.

Apesar disso, podem ser ainda experimentados outros métodos de aferição. Um deles consiste em colocar um sensor de passagem na via de chegada dos veículos, distante o suficiente da interseção de modo que não seja afetado por veículos parados em filas, e então realizar uma contagem de veículos que passam durante um determinado período de aferição. Este dado seria enviado para o controlador e usado como valor de demanda. Um ponto potencialmente negativo desta abordagem é que, caso a demanda aumente consideravelmente, é possível que a saturação da via seja atingida, quando então o fluxo observado começará a decrescer. O controlador então terá uma falsa impressão de que a demanda está caindo, quando na realidade

a via precisa urgentemente de mais tempo de verde para poder resolver o congestionamento formado.

Há ainda uma classe de medidas de interesse incomuns e especialmente difíceis de se obter de forma prática, mas que podem trazer *insights* a respeito de possíveis soluções alternativas para o problema. Um exemplo é a medida usada em [25], em que são aferidos os tempos de espera acumulados de cada veículo na medida em que trafegam pelo sistema. O controlador usa então a informação a respeito destes tempos para os veículos que se encontram na fila de espera para atravessar o cruzamento de forma a favorecer os que passaram mais tempo esperando desde que entraram no sistema.

## 5.3 Coordenador de Semáforos SMER

Embora o Controlador SMER seja capaz de balancear os movimentos de chegada levando em conta o volume relativo entre eles, seu comportamento numa rede de sinalização com interseções muito próximas umas das outras pode não ser ainda tão eficiente. Para estes casos, a distribuição da chegada de veículos não é mais exponencial, mas sim numa formação de ondas de pelotões separados por tempos com poucos ou nenhum veículo. Isso se dá por conta da interação com os sinais *upstream*, que enviam veículos condensados em grupamentos, devido à periodicidade de aberturas e fechamentos durante seu ciclo de funcionamento.

Caso a interseção não observe este padrão, alguns efeitos indesejados começam a aparecer; por exemplo, uma elevação média do tempo de espera, devido ao fato de que diversos veículos chegam e encontram o sinal fechado para si, sendo obrigados a parar, iniciando a formação de filas.

Além disso, mesmo que uma interseção observe o funcionamento de suas interseções vizinhas *upstream*, ela tem ainda um dilema: as interseções podem não operar harmonicamente, fazendo-se necessário que se tome uma escolha de privilegiar uma rota em detrimento da outra.

Para responder a estes dois problemas, o segundo mecanismo proposto neste trabalho é um coordenador distribuído de interseções sinalizadas, operando com taxas relativas segundo o algoritmo já visto do SMER. O mecanismo será descrito em detalhes a seguir, juntamente com sua metodologia de funcionamento.

### 5.3.1 A Interseção como um Recurso Compartilhado entre Corredores

Assim como no caso do controlador, em que foi feita uma abstração da interseção modelada como uma série de regiões de recursos compartilhados, aqui faz-se uma

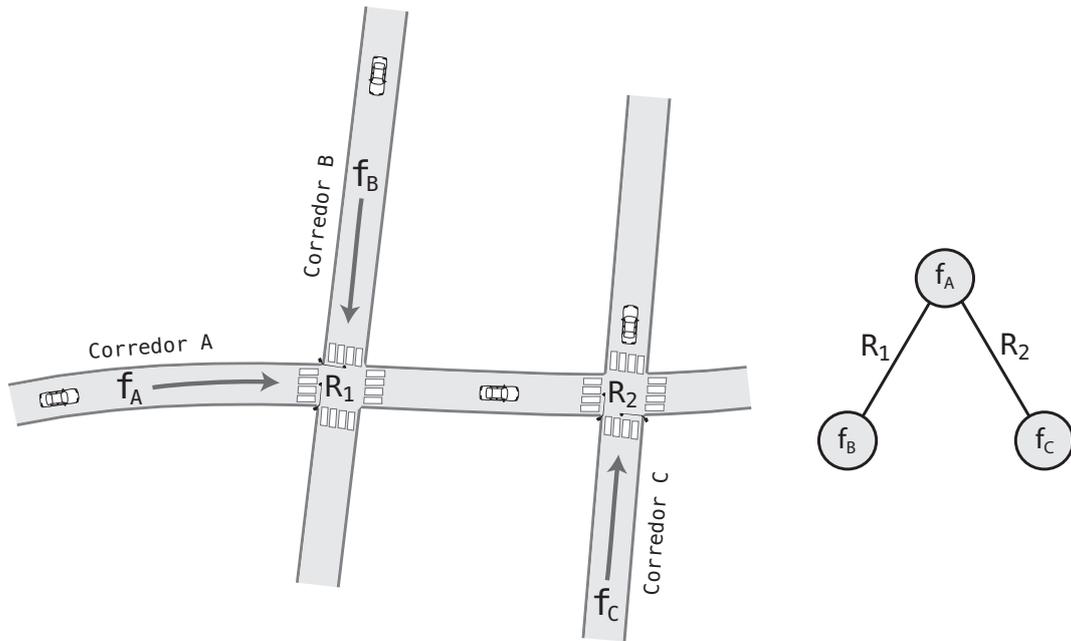


Figura 5.5: Exemplo de corredores concorrendo por interseções sinalizadas.

abstração análoga, porém estendida para corredores. Dá-se o nome de *corredor* a uma sequência de segmentos de via por onde escoam uma rota de tráfego, normalmente compreendendo a travessia de uma série de interseções sinalizadas. Dentro de um corredor com grande volume, geralmente é desejável que os pelotões que por ele cruzam, façam-no sem interrupções (ou seja, sem paradas em sinais vermelhos, uma vez que tenham entrado no corredor).

Dada uma interseção sinalizada por onde cruzam dois ou mais corredores, o desafio está em garantir que todos consigam escoar seus pelotões de forma alternada, sem que haja interrupções ou atrasos desnecessários. A figura 5.5 ilustra um exemplo de tal situação.

Nesta figura, mostra-se em detalhe um segmento do corredor A onde se deseja que veículos trafeguem ininterruptamente. Para isso, os veículos de A precisam encontrar a interseção  $R_1$  verde e, logo em seguida,  $R_2$  também precisa estar liberada. Por outro lado, existem dois outros corredores, B e C, que também requerem acesso a estas interseções de forma a operar ininterruptamente. A questão reside em como sincronizar ambas as interseções de modo que A passe sem sem parado, mas ao mesmo tempo sincronize também o acesso dos corredores B e C.

A modelagem da solução começa pelo grafo mostrado na figura 5.5. O vértice  $f_A$  representa o fluxo vindo do corredor A, enquanto  $f_B$  e  $f_C$  representam, respectivamente, os fluxos de B e C. Quando  $f_A$  é *sink*, os veículos vindos do corredor A podem estar seguros de que encontrarão todas as interseções de que precisam, livres.

Assim, uma primeira aproximação seria a do exemplo da figura 5.6, onde, num determinado tempo  $t_0$ ,  $f_A$  é *sink* e ambas as interseções  $R_1$  e  $R_2$  encontram-se verdes

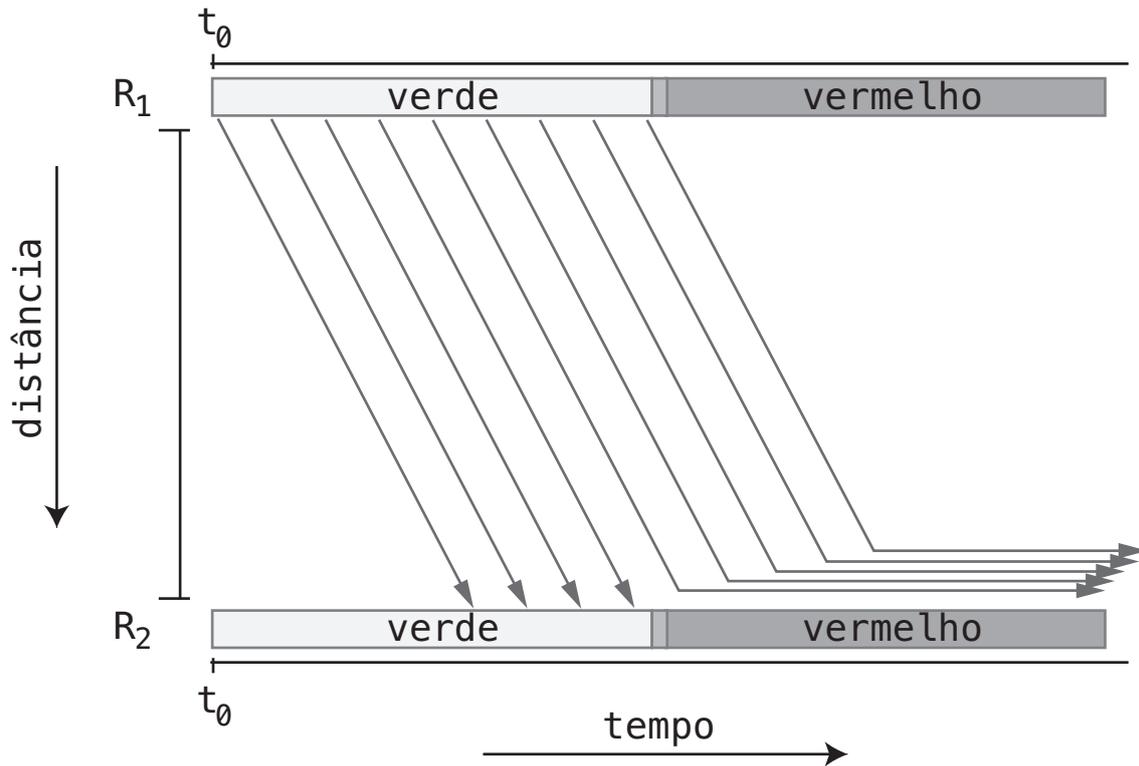


Figura 5.6: Primeira aproximação para o problema dos corredores concorrentes.

para o fluxo vindo de A.

Cada seta descendo na diagonal representa um veículo vindo do Corredor A, que, no tempo  $t_0$ , encontrou o sinal em  $R_1$  verde e começou seu movimento. Eles viajam em direção à interseção  $R_2$ , que se encontra na parte inferior da figura. O deslocamento é ilustrado em ângulo na imagem, pois um veículo que sai de  $R_1$  em  $t = t_0$  leva um certo tempo  $t_d$  para alcançar  $R_2$ .

O que pode ser observado nesta primeira aproximação foi que, por conta da interseção  $R_2$  ter começado seu ciclo simultaneamente à  $R_1$ , um tempo de verde foi perdido inicialmente que não poderia ser usado por nenhum veículo, já que a via se encontrava vazia aguardando o pelotão que partia de  $R_1$ . Assim, apesar das duas interseções possuírem o mesmo tempo de verde para aquela fase, a *largura de banda* ficou reduzida por conta do deslocamento necessário para chegar em  $R_2$ . Na figura, os cinco veículos que encontraram  $R_2$  fechada formaram uma fila residual por conta da assincronia e terão que esperar o próximo ciclo para seguirem viagem.

A solução para o problema visto acima consiste em deslocar  $R_2$  no tempo, de forma a atrasar o início de seu ciclo em relação a  $R_1$ , para que se dê o tempo necessário à chegada dos veículos. A figura 5.7 reflete esta alteração.

Agora, porém, surge uma complexidade: como o relógio da interseção  $R_2$  foi atrasado no tempo, o relógio do grafo SMER também deverá sofrer um atraso do ponto de vista de  $R_2$  (e apenas de  $R_2$ ) em relação ao relógio de  $R_1$ . Dessa maneira,

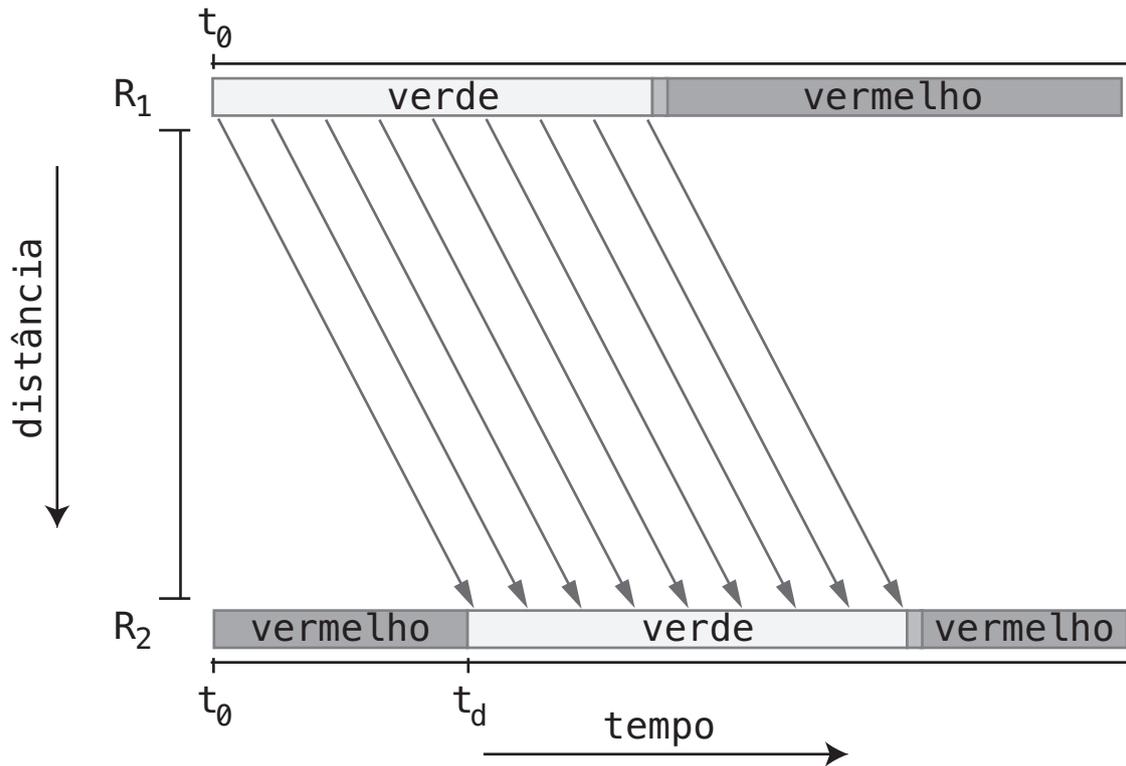


Figura 5.7: Segunda aproximação, com  $R_2$  deslocada no tempo.

quando  $f_A$  se tornar *sink* na cópia do grafo em  $R_1$ , em  $t_d$  unidades de tempo ele será *sink* também em  $R_2$ .

Generalizando a solução proposta, para uma rede de interseções sinalizadas participantes do sistema de coordenação, cada interseção possuirá um vizinho referencial, a partir do qual adiantará ou atrasará seu relógio, deslocando-se no tempo de forma a permitir que um viajante escoando pelo corredor em velocidade constante, encontre todos os sinais sempre na mesma etapa de ciclo.

Durante a explicação detalhada da metodologia de funcionamento do Coordenador SMER, na seção 5.3.2, será introduzido um exemplo do mecanismo de geração de *offsets* como uma solução generalizada aplicada em uma rede complexa de corredores. Cabe ressaltar que cada corredor pode ser, genericamente, uma árvore. Entende-se que a interseção de entrada no corredor seja uma raiz e que, a partir dela, possam ser construídos qualquer número de caminhos ramificados, desde que estes caminhos não se cruzem, caso contrário seria formado um ciclo. A formação de um ciclo no corredor torna inviável o cálculo dos *offsets* necessários para a sincronização (ver [4] para uma explicação detalhada).

Como última observação, é importante que, num sistema coordenado, todas as interseções possuam mesmo tempo de ciclo, de forma que seja factível sincronizar as vias como visto na figura 5.7.

### 5.3.2 Metodologia de Funcionamento

Apresentado o raciocínio básico de operação do Coordenador SMER acima, agora será descrito com maior detalhe o funcionamento completo do sistema.

#### Requisitos Iniciais

Inicialmente, devem ser conhecidos todos os corredores participantes, isto é, as interseções e os segmentos de via que compõem cada corredor. Cada interseção deve conhecer os corredores aos quais pertence. Além disso, todas as interseções do sistema devem operar utilizando um tempo fixo global para funcionamento de uma fase – caso contrário o sistema de coordenação não será capaz de sincronizar de forma eficiente os tempos de *offset*. Os limites de velocidade das vias, o comprimento e o sentido do trânsito em cada uma também devem ser conhecidos. Finalmente, deve ser instalado na via de entrada de cada corredor, um sensor capaz de fornecer medidas de avaliação da demanda da via.

#### Construção do grafo de dependências

Cumpridos os requisitos acima, o algoritmo distribuído tem início com uma interseção escolhida ao acaso (podendo inclusive ter sido eleita de forma distribuída), chamada de *líder*, que deve executar um algoritmo comum de propagação de informação, cujo intuito é o de “prospectar” o sistema à procura de pontos de interseção entre os corredores. Para cada corredor novo encontrado, o líder cria uma representação dele sob a forma de um vértice num grafo. Ao encontrar uma interseção onde dois corredores se cruzam, o algoritmo cria uma aresta ligando os dois vértices em questão, de modo que seja registrado que deve haver acesso mutuamente exclusivo ao recurso pelo qual os dois competem.

#### Geração de Estado Inicial Acíclico

Construído o grafo, o passo seguinte é o de gerar um grafo SER com um estado inicial acíclico. Esta etapa é realizada pelo líder através do algoritmo Alg-Cor visto na seção 3.3. Assim que o estado inicial é gerado, uma cópia do grafo construído é enviada a cada controlador participante do sistema coordenado.

#### Ajuste dos *offsets*

Tão logo o líder encerre a construção do grafo, sua última tarefa é a de iniciar uma onda de ajuste dos relógios locais de cada interseção. Para isso, ele toma a si como ponto de partida, usando seu relógio como início referencial do tempo de operação do sistema. Tomando primeiro as interseções *downstream*, isto é, as interseções que

recebem fluxo de veículos vindo do líder, o *offset* de cada uma será determinado como segue: é tomada a distância  $d$  a ser percorrida pelos veículos da interseção líder até a interseção *downstream*; baseado no limite de velocidade  $v$  do segmento de via em questão, é calculado o tempo  $t_d$  que se leva para viajar do líder até a interseção *downstream*:

$$t_d = \frac{d}{v}$$

Calculado o tempo de viagem, o *offset* das interseções *downstream* será fixado com o valor da soma do *offset* da interseção atual (que, no caso inicial, é a líder e vale zero) **mais** o valor  $t_d$ . Uma vez fixados estes valores, a interseção líder agora se volta para suas interseções *upstream*, isto é, interseções que enviam fluxo de veículos para a líder. Para cada uma, o *offset* é calculado como sendo a base referencial local (no caso inicial, zero) **menos** o valor  $t_d$ .

Assim, a interseção líder encerra a primeira geração de *offsets*, tendo fixado os relógios de todos os seus vizinhos. Agora, cada vizinho que teve seu referencial ajustado inicia a próxima onda, visitando e fixando o tempo de cada vizinho que ainda não teve seu *offset* calculado. O processo se repete recursivamente, até que todas as interseções tenham sido iniciadas.

Um exemplo de funcionamento da etapa de geração dos *offsets* pode ser visto na figura 5.8.

Ao final desta etapa, o sistema coordenado estará pronto para iniciar sua operação. Os vértices *sink* no estado inicial começam seu funcionamento. Como cada vértice representa um corredor, os corredores em questão terão suas fases verdes para escoamento de seus veículos. Ao final de cada fase, o grafo reverte suas arestas e um novo subconjunto de corredores ganha permissão para tráfego.

## Reajuste Periódico das Demandas

Assim como o Controlador SMER, o sistema coordenador também é capaz de reavaliar os tempos de operação de cada vértice. Neste caso específico, a mudança de reversibilidade traz um aumento ou diminuição da largura de banda do corredor. O valor da largura de banda é sempre um múltiplo do tempo fixo de fase estabelecido globalmente.

## Interação com Vias Descoordenadas

É possível que determinadas vias que cruzam o sistema coordenado não estejam participando da operação sincronizada. Caso isto aconteça, a interseção que une a via descoordenada com o segmento de um corredor coordenado passa a possuir dois controladores: um primário, que rege as fases coordenadas e outro secundário, que

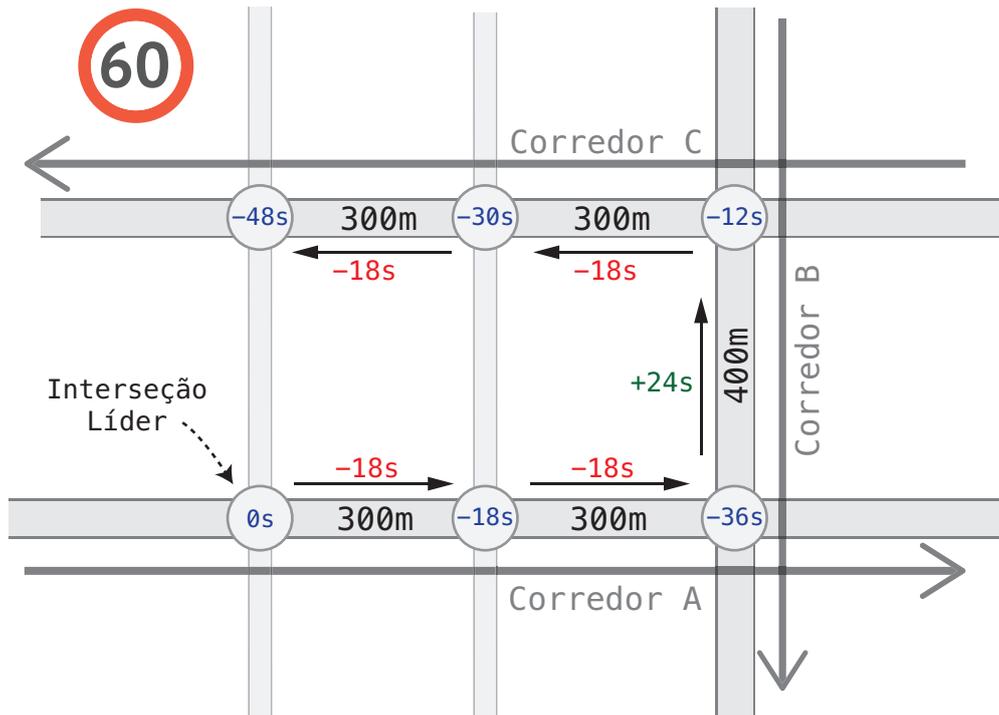


Figura 5.8: Exemplo de funcionamento do algoritmo de geração de *offsets*.

rege as fases descoordenadas. O funcionamento é dado de forma que o controlador primário sempre tenha prioridade de uso da interseção. Caso o corredor necessite atravessar um pelotão, o controlador primário entra em ação, chaveando o semáforo para a fase que dará verde ao pelotão. Tão logo o vértice representativo do corredor deixe de ser *sink*, o controlador primário entrega o a interseção para o secundário, que retoma suas atividades de distribuição de tempo de verde às vias descoordenadas que por ele passam.

Nos cenários coordenados avaliados nos resultados deste trabalho, o controlador secundário usado foi o Controlador SMER.

# Capítulo 6

## Experimentos e Resultados

Neste capítulo, são apresentados os experimentos feitos com os mecanismos propostos, bem como os resultados obtidos através das simulações feitas em cada experimento. Na seção 6.1, é descrita a metodologia usada nos experimentos; na seção 6.2, os cenários usados nos testes são descritos; na seção 6.3 são apresentados os resultados obtidos e, na seção 6.4 é feita uma avaliação dos dados extraídos.

### 6.1 Metodologia Experimental

Os testes realizados consistem de simulações com cenários desenvolvidos no MicroLAM, construídos de forma a poder avaliar os aspectos fundamentais dos mecanismos de controle inteligente propostos. Com isso, espera-se poder comparar a influência de determinadas variações de parâmetro agindo sobre o funcionamento destes mecanismos de forma a entender seu comportamento nas situações mais variadas.

#### 6.1.1 Medidas de interesse

Cinco *medidas de interesse* foram escolhidas afim de se poder obter uma visão analítica a respeito do desempenho de cada cenário. Foram elas:

- **Contagem de veículos** O número de veículos que passaram pelo sistema ao longo da simulação. Em uma execução cujo valor aferido da contagem de veículos for menor que o configurado para o cenário (o valor esperado), tem-se um caso em que o sistema não foi capaz de fornecer a vazão adequada para a demanda;
- **Tempo médio de espera** Quanto tempo, em média, um veículo passa parado

no sistema<sup>1</sup>. O intuito desta medida é ter uma estimativa do atraso causado por congestionamentos e sinais encontrados fechados. Medido em **segundos**;

- **Tempo médio de viagem** Quanto tempo, em média, um veículo leva para completar sua rota pelo sistema. A travessia é medida com um cronômetro, que é disparado tão logo o veículo entre no sistema e é interrompido no momento em que o veículo atravessa a última via e abandona o cenário. Esta medida fornece uma estimativa do congestionamento das vias, pois, quanto mais veículos presentes no sistema, mais próximo este fica de sua capacidade e maiores são os “atritos” por conta da interação entre os veículos, o que leva a uma redução de velocidade e consequente maior tempo de viagem. Além disso, nesta medida também se somam os tempos perdidos por conta de filas em interseções sinalizadas. Medido em **segundos**;
- **Velocidade média** A média global das velocidades médias individuais dos veículos durante sua travessia pelo sistema. Fornece uma noção da fluidez global, pois, quanto maior a média, menor a frequência com que os veículos foram obrigados a frear por conta de obstáculos. Valor em **quilômetros por hora (km/h)**;
- **Headway médio** Média global dos intervalos entre chegadas de veículos. As aferições nas simulações foram feitas através de sensores de passagem colocados nas entradas de cada interseção sinalizada. Valor em **segundos**.

Estas medidas foram escolhidas por serem as mais comumente usadas em avaliações de sistemas de tráfego na literatura, e principalmente por descreverem claramente o comportamento do sistema. Em todas as extrações das medidas de interesse nos testes que seguirão abaixo, foi sempre observada a média global do sistema para cada uma das medidas.

## 6.2 Cenários Avaliados

Cada modelo foi avaliado separadamente, de forma a se obter dados de fácil compreensão. O primeiro cenário foi usado para teste de desempenho do *Controlador SMER*, enquanto os dois últimos avaliaram o *Coordenador SMER*.

Para cada caso e teste a ser descrito abaixo, foram experimentados intervalos distintos entre as mudanças de reversibilidade, tanto do mecanismo controlador, quanto do coordenador. O intervalo foi variado entre 0 e 15 minutos (valores acima de 15 minutos foram descartados por apresentar resultados muito aquém do desejável,

---

<sup>1</sup>“Parado” não necessariamente significa que o veículo possui velocidade zero, mas sim uma velocidade suficientemente baixa para ser detectada por um sensor de presença (ver seção 4.8).

principalmente devido ao longo tempo para resposta do sistema frente às variações do tráfego). No caso especial de 0, a mudança de reversibilidade não ocorre; dessa maneira, o grafo opera na condição especial de SER, em que todas as fases dos semáforos recebem um mesmo tempo de verde. Para os outros casos, esperou-se avaliar qual influência tem o intervalo entre os tempos de reajuste dos tempos, pois, a princípio, quanto maior o intervalo, menos capaz será o mecanismo em reconhecer variações bruscas no fluxo de veículos incidente.

### 6.2.1 Controlador SMER

O cenário avaliado no controlador SMER foi uma interseção sinalizada isolada, como visto na figura 6.1. Por “isolada”, entende-se uma interseção que não possui interseções vizinhas próximas o suficiente que possam interferir no padrão de chegada dos veículos. Assim, garante-se que as chegadas dos veículos seguem uma distribuição exponencial. Para o caso específico do cenário avaliado, duas vias fornecem veículos à interseção e ambas possuem apenas uma faixa com 300 metros de comprimento cada. Foram avaliados dois casos, que serão descritos a seguir.

#### Cenário com Taxas Constantes

Neste caso, um volume distinto de chegada de veículos é atribuído a cada via e este se mantém constante durante toda a simulação. O volume de uma das vias foi fixado em 400 vph, enquanto o da outra foi variado em cada teste, de 400 até 1600 vph, em passos de 100 em 100. Para cada situação, foram extraídas medidas de interesse.

Os dados foram extraídos após 2 horas de tempo de simulação e o tempo de fase do semáforo foi fixado em 30 segundos, sendo 1 segundo reservado para tempo de vermelho (*clearance time*) e o restante com passagem permitida (divido em 27 segundos e verde e 2 de amarelo).

#### Cenário com Taxas Variáveis

Neste caso, taxas distintas também são aplicadas em cada entrada, porém, adicionalmente, existe uma variação senoidal destas taxas ao longo da simulação; neste caso, para cada via, são usados como parâmetro a taxa mínima e a máxima de chegada de veículos, bem como o período da senoide, em horas. Além disso, existe um defasamento de  $180^\circ$  entre as ondas, de forma que, quando uma via está em seu horário de pico, a outra encontra-se em sua menor taxa de chegadas. Por exemplo, se a simulação começa às 13 horas e a onda possui um período de 6 horas, às 14 horas e meia teríamos o primeiro horário de pico na primeira via, enquanto na segunda via, adiantada  $180^\circ$  em relação à primeira, só veríamos um pico acontecer

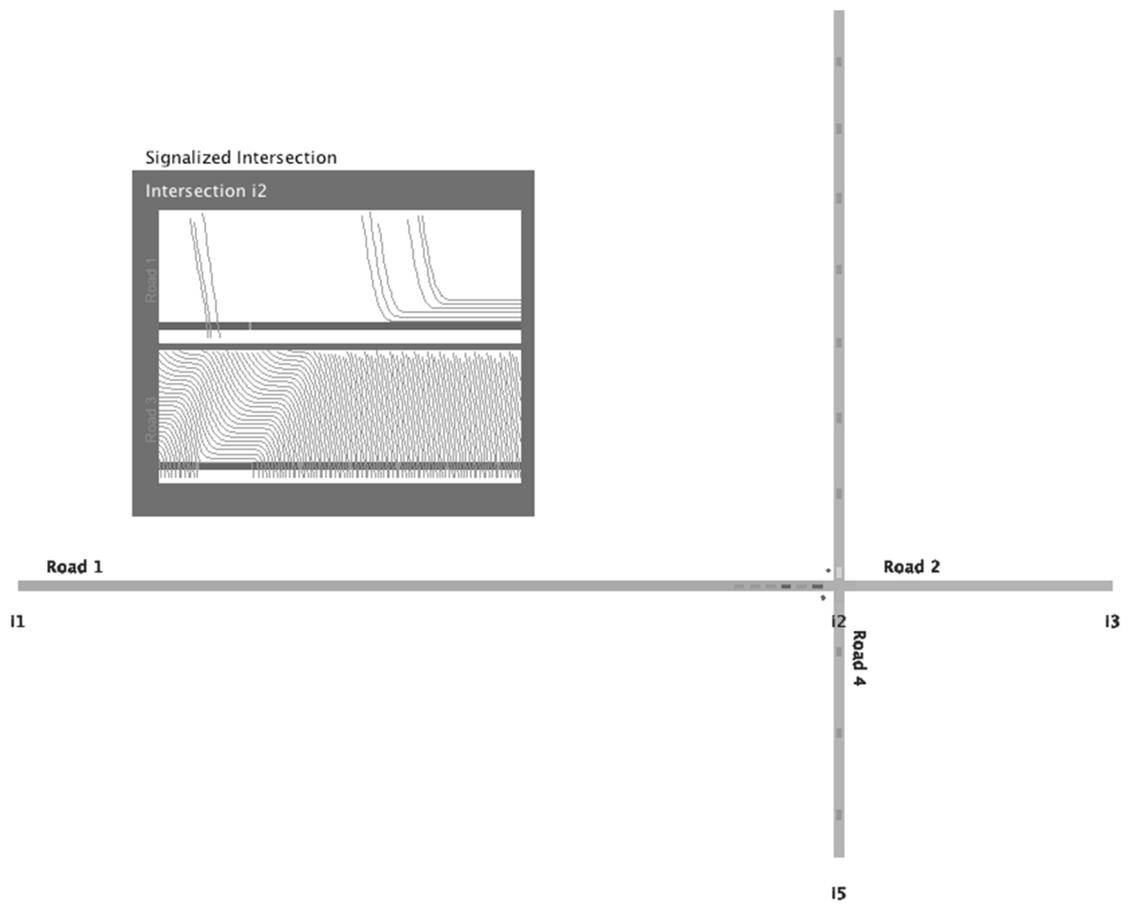


Figura 6.1: Cenário de avaliação do Controlador SMER

às 17 horas e meia, momento em que a primeira via teria sua taxa mais baixa de chegada de veículos.

Para este experimento, num primeiro teste, foi variada a amplitude da senóide através do ajuste do parâmetro de volume máximo. Os testes fixaram o volume mínimo em 400 vph e variaram de 400 a 1600 vph o volume máximo. O período da onda foi fixado em 6 horas. Os dados foram extraídos após 6 horas de simulação. O tempo de fase foi idêntico ao do cenário com taxas constantes.

Num segundo teste, a amplitude foi mantida constante e, dessa vez, o que se variou foi o período da senóide. Os valores variaram de 1 hora até 10 horas de período, em passos de 1 em 1 hora.

## 6.2.2 Coordenador SMER

Para o coordenador SMER, dois cenários distintos foram avaliados. No primeiro, dois corredores coordenados disputam pelo acesso a uma interseção; no segundo, é testado o caso mais complexo em que diversas ondas verdes circulam e concorrem em uma grade Manhattan.

No cenário “Dois Corredores” (figura 6.2), o primeiro corredor possui uma extensão de 3 quarteirões, enquanto o segundo, 4 quarteirões. Cada quarteirão tem aproximadamente 300 metros de comprimento. Os corredores se cruzam em um dos sinais e também são atravessados por um total de 5 vias locais com volume de tráfego baixo.

No cenário “Grade Manhattan” (figura 6.3), uma rede de vias paralelas corta-se em duas direções, formando uma “grade”. Esta grade possui quatro quarteirões de largura e quatro de comprimento. Cada quarteirão possui 300 metros de comprimento em cada um de seus lados. O cenário ilustra uma artéria, com maior volume, sendo cortada por quatro vias coletoras, e estas, por sua vez, cortadas por diversas vias locais de menor volume.

Como uma observação, inicialmente foi conjecturado usar-se veículos “verdes” nos testes. Um veículo verde é um agente inteligente, capaz de visualizar uma onda verde que se desloca por uma via e ajustar sua velocidade de modo a garantir sua permanência dentro dela. Este teste foi abandonado pois foi observado que o limite de velocidade urbano é suficiente para manter os veículos viajando dentro da onda verde; apenas é necessário que a velocidade da onda verde seja calculada para acompanhar o limite da via, o que foi feito nos testes.

### Dois Corredores – Cenário com Taxas Constantes

Neste caso, de maneira análoga ao primeiro cenário do Controlador SMER, um dos corredores têm seu volume fixado em 400 veículos por hora, enquanto o volume do

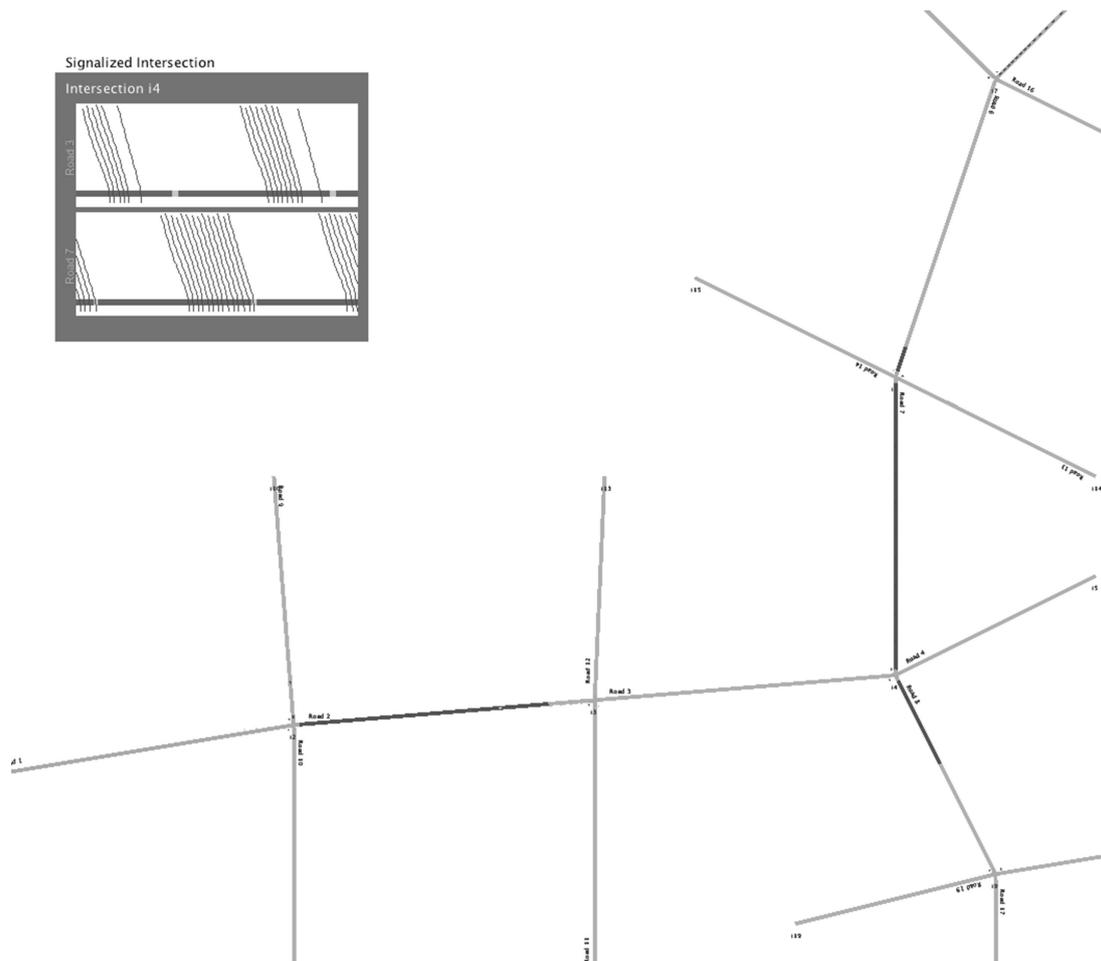


Figura 6.2: Cenário “Dois Corredores”.

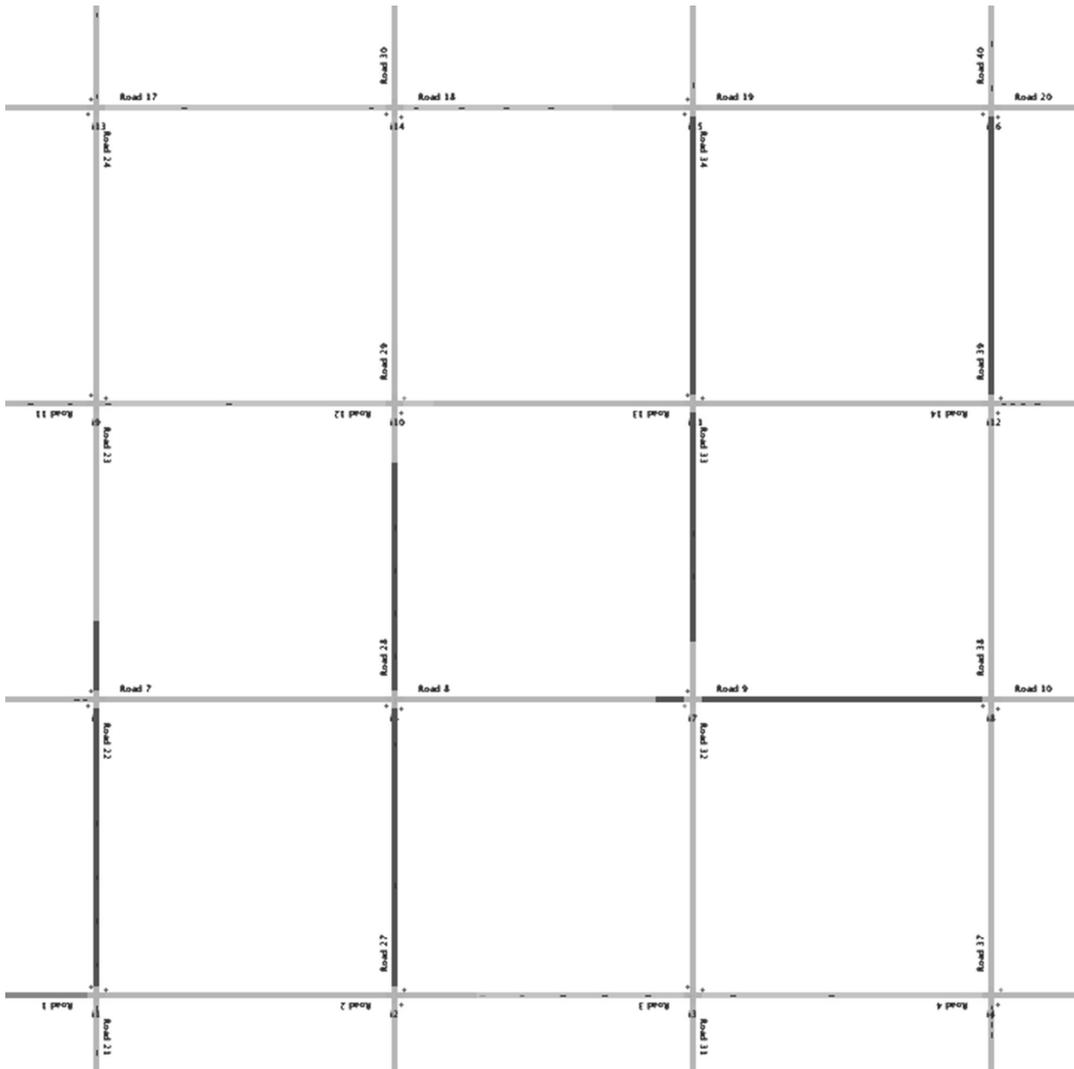


Figura 6.3: Cenário “Grade Manhattan”

segundo é variado em cada teste, abrangendo a faixa de 400 a 1600 vph. As vias de porte local, que não participam do sistema coordenado, mas interagem com ele, tiveram seu volume fixado em 50 vph. O tempo de fase foi o mesmo utilizado nos testes do Controlador SMER.

### **Dois Corredores – Cenário com Taxas Variáveis**

Também como no caso do Controlador SMER, agora tem-se a situação em que as entradas de cada corredor variam segundo uma senóide, defasadas 180<sup>o</sup> entre si, parametrizadas pelo volume máximo, mínimo e o período da onda.

Na primeira etapa dos testes, o período da onda foi fixado em 6 horas e o volume mínimo em 400 vph, enquanto o volume máximo foi variado em cada teste, na faixa de 400 a 1600 vph.

Na segunda etapa, foram fixados o volume mínimo (400 vph) e o máximo (1400 vph), enquanto o período variou de 1 a 10 horas, num passo de 1 em 1 hora.

Para ambos os casos, o volume das vias locais foi mantido em 50 veículos por hora e o tempo de fase, idêntico ao dos cenários anteriores.

### **Grade Manhattan – Cenário com Taxas Constantes**

Para o primeiro caso deste cenário em que os volumes se mantêm constantes durante a simulação, foi fixado o volume das coletoras em 400 veículos por hora, enquanto o volume da artéria foi variado em cada teste, na faixa de 400 a 1600 vph, num passo de 400 em 400. As vias locais foram testadas com volume de 50 veículos por hora e o tempo de fase em 30 segundos, como nos anteriores.

### **Grade Manhattan – Cenário com Taxas Variáveis**

Neste caso, um pouco mais complexo, tanto a artéria quanto as coletoras tiveram seu volume variando segundo uma senóide ao longo das simulações, enquanto as vias locais permaneceram com volume constante de 50 vph.

Para o primeiro teste, no caso da artéria, o volume mínimo foi mantido em 400 vph em todos os testes, enquanto o máximo foi variado de 800 a 1600 vph, em passos de 400 em 400.

Ainda no primeiro teste, no caso da coletora, os parâmetros de volume foram variados com metade da amplitude da artéria. O volume mínimo foi fixado em 200 vph, enquanto o máximo foi variado de 400 a 800, em passos de 200.

Dessa forma, na simulação em que a artéria executou com volume máximo de 800 vph, as coletoras serviram 400 vph; e, assim, cada incremento do volume da artéria foi acompanhado de um incremento nas coletoras, até o último caso em que

a artéria executa com o volume máximo de 1600 vph, enquanto as coletoras possuem volume de 800 vph.

No segundo e último teste realizado, fixou-se os parâmetros da senóide da artéria em 400 vph (volume mínimo) e 1600 vph (volume máximo) e os das coletoras em 200 vph (mínimo) e 800 vph (máximo), enquanto o período das ondas foi variado de 2 a 10 horas, em passos de 2 em 2.

## 6.3 Apresentação dos Resultados

Segundo a metodologia e os cenários discutidos, a seguir são apresentados os resultados obtidos em cada teste. Na seção 6.3.1 são apresentados os resultados do Controlador SMER; em seguida, na seção 6.3.2, são apresentados os resultados do Coordenador SMER.

De forma a manter a organização, algumas figuras e tabelas referenciadas abaixo foram colocadas em apêndices, pois o volume de dados extraídos foi muito grande e, em consequência disso, muitos gráficos foram necessários. Apenas os mais significantes são mostrados abaixo.

Os resultados mostram um gráfico para cada medida de interesse, com uma tabela de acompanhamento resumindo a condição de cada parâmetro no teste. Na seção 6.4 será feita uma avaliação crítica dos dados apresentados aqui.

### 6.3.1 Resultados do Controlador SMER

Primeiro, seguem os resultados para o primeiro caso do Controlador SMER, onde os volumes foram mantidos constantes. Na tabela 6.1 são resumidos os parâmetros utilizados para este caso; na figura 6.4, a contagem de veículos é medida; na figura 6.5, tem-se o tempo médio de espera; os resultados para as demais medidas se encontram no apêndice A.

Em seguida, os resultados para o segundo caso do Controlador SMER, onde os volumes variam segundo uma senóide. Este caso é dividido em dois testes. A tabela

Controlador SMER – Volume Constante	
Tempo de simulação	2 horas
Tempo de verde/amarelo	29 segundos
Tempo de vermelho ( <i>clearance time</i> )	1 segundo
Limite de velocidade	60 km/h
Intervalo entre mudanças de reversibilidade	SER, 3, 5, 10 e 15 min
Volume da via 1	400 vph
Volume da via 2	400, 500, 600, 700, 800, 900, 1000, 1100, 1200, 1300, 1400, 1500 e 1600 vph

Tabela 6.1: Parâmetros do cenário do Controlador SMER – Volume Constante

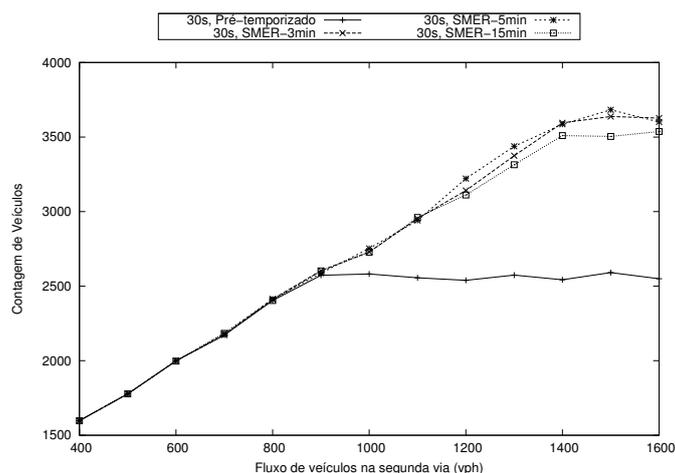


Figura 6.4: Contagem de veículos para o cenário da tabela 6.1

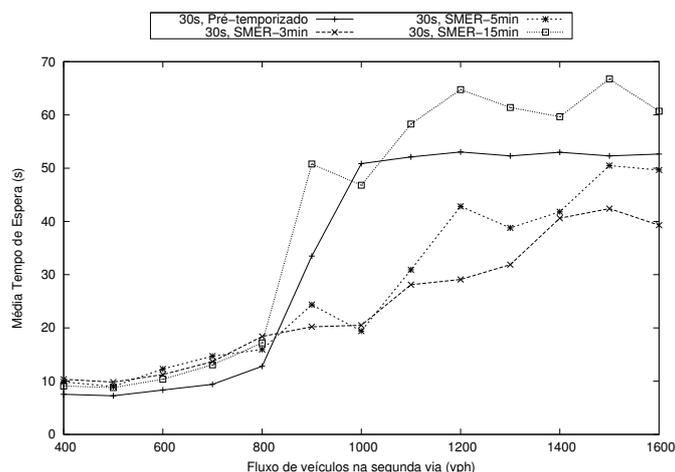


Figura 6.5: Tempo médio de espera para o cenário da tabela 6.1

Controlador SMER – Variação da Amplitude	
Tempo de simulação	6 horas
Tempo de verde/amarelo	29 segundos
Tempo de vermelho ( <i>clearance time</i> )	1 segundo
Limite de velocidade	60 km/h
Intervalo entre mudanças de reversibilidade	SER, 3, 5 e 15 min
Volume mínimo da via 1	400 vph
Volume mínimo da via 2	400 vph, defasado 180º
Volume de pico da via 1	400 a 1600 vph
Volume de pico da via 2	400 a 1600 vph, defasado 180º
Período da onda	6 horas

Tabela 6.2: Parâmetros do cenário do Controlador SMER – Variação da Amplitude

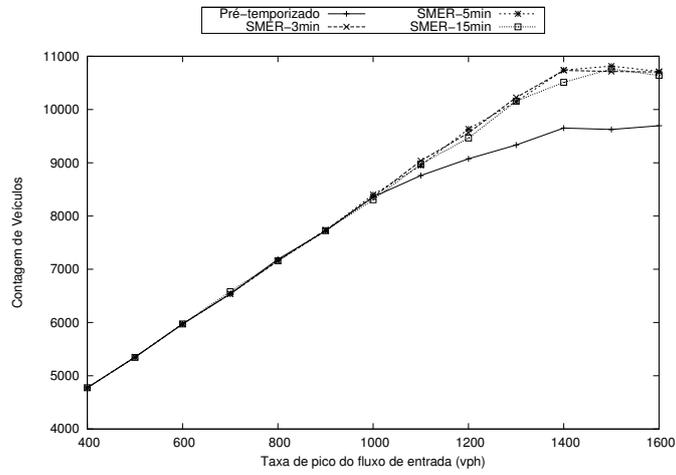


Figura 6.6: Contagem de veículos para o cenário da tabela 6.2

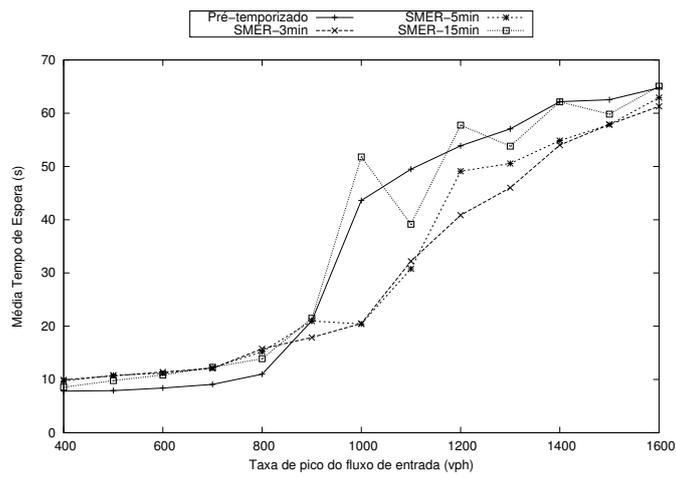


Figura 6.7: Tempo médio de espera para o cenário da tabela 6.2

<b>Controlador SMER – Variação do Período</b>	
<b>Tempo de simulação</b>	6 horas
<b>Tempo de verde/amarelo</b>	29 segundos
<b>Tempo de vermelho (<i>clearance time</i>)</b>	1 segundo
<b>Limite de velocidade</b>	60 km/h
<b>Intervalo entre mudanças de reversibilidade</b>	SER, 3, 5 e 15 min
<b>Volume mínimo da via 1</b>	400 vph
<b>Volume mínimo da via 2</b>	400 vph, defasado 180°
<b>Volume de pico da via 1</b>	1400 vph
<b>Volume de pico da via 2</b>	1400 vph, defasado 180°
<b>Período da onda</b>	1 a 10 horas

Tabela 6.3: Parâmetros do cenário do Controlador SMER – Variação do Período

<b>Dois Corredores – Volume Constante</b>	
<b>Tempo de simulação</b>	6 horas
<b>Tempo de verde/amarelo</b>	29 segundos
<b>Tempo de vermelho (<i>clearance time</i>)</b>	1 segundo
<b>Limite de velocidade</b>	60 km/h
<b>Intervalo entre mudanças de reversibilidade</b>	SER, 5, 10 e 15 min
<b>Volume do corredor 1</b>	400 vph
<b>Volume do corredor 2</b>	400 a 1600 vph, passos de 100 em 100
<b>Volume de cada via local</b>	50 vph

Tabela 6.4: Parâmetros do cenário “Dois Corredores” – Volume Constante

6.2 identifica os parâmetros do primeiro teste, em que a amplitude da senóide é variada. Para este teste, são apresentadas as medidas de interesse nas figuras 6.6 (contagem de veículos) e 6.7 (tempo de espera); as demais medidas de interesse encontram-se no apêndice A.

Finalmente, a tabela 6.3 resume os parâmetros do segundo teste, que tem suas medidas nas figuras 6.8 (contagem de veículos) e 6.9 (tempo de espera); as demais medidas de interesse podem ser vistas no apêndice A.

### 6.3.2 Resultados do Coordenador SMER

#### Dois Corredores

Para o Coordenador SMER, o primeiro cenário avaliado é o “Dois Corredores”. Na primeira situação, com fluxos constantes, a tabela 6.4 sumariza os parâmetros utilizados; em seguida, as medidas de interesse extraídas são apresentadas nas figuras 6.10 (contagem de veículos) e 6.11 (tempo médio de espera); as demais medidas podem ser vistas no apêndice B.

Ainda para o “Dois Corredores”, agora segue a listagem de medidas para o caso do volume variável, onde se experimenta a mudança dos volumes de pico dos corredores; a tabela 6.5 guarda o sumário dos parâmetros; as medidas de interesse seguem nas figuras 6.12 (contagem de veículos) e 6.13 (tempo médio de espera); as

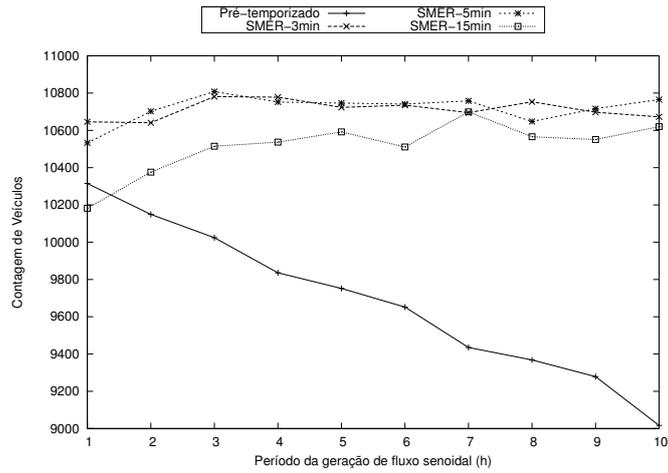


Figura 6.8: Contagem de veículos para o cenário da tabela 6.3

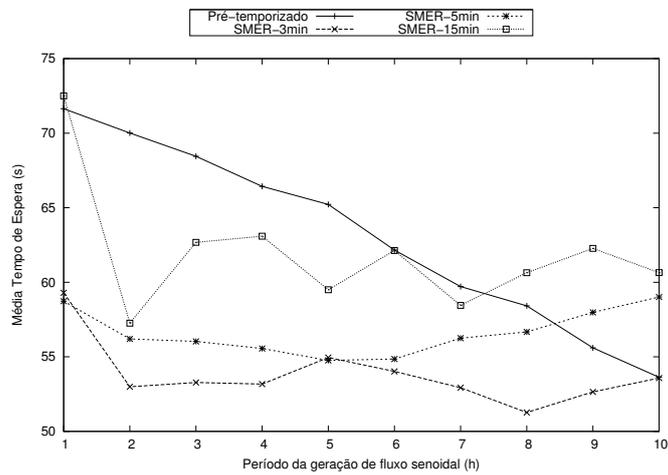


Figura 6.9: Tempo médio de espera para o cenário da tabela 6.3

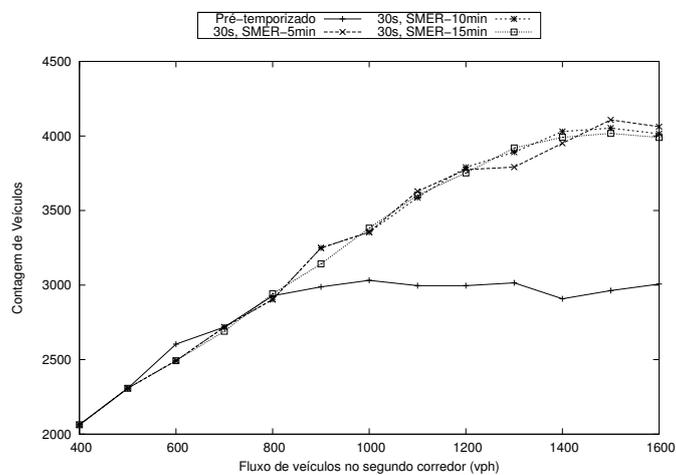


Figura 6.10: Contagem de veículos para o cenário da tabela 6.4

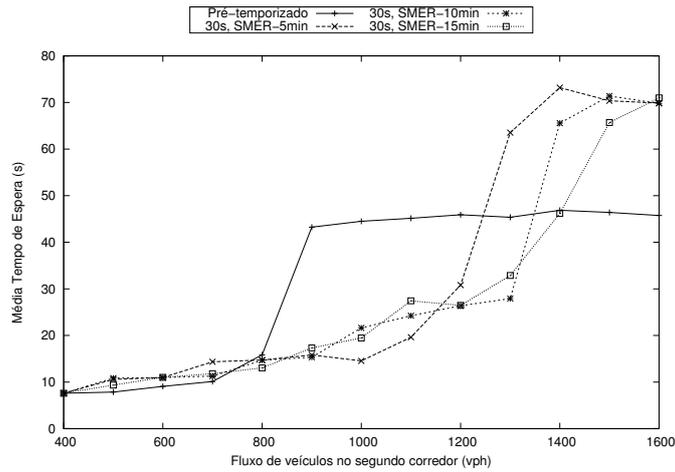


Figura 6.11: Tempo médio de espera para o cenário da tabela 6.4

### Dois Corredores – Variação da Amplitude

Tempo de simulação	6 horas
Tempo de verde/amarelo	29 segundos
Tempo de vermelho ( <i>clearance time</i> )	1 segundo
Limite de velocidade	60 km/h
Intervalo entre mudanças de reversibilidade	SER, 5, 10 e 15 min
Volume mínimo do corredor 1	400 vph
Volume mínimo do corredor 2	400 vph, defasado em 180 <sup>o</sup>
Volume de pico do corredor 1	400 a 1600 vph, passos de 100 em 100
Volume de pico do corredor 2	400 a 1600 vph, passos de 100 em 100, defasado em 180 <sup>o</sup>
Volume de cada via local	50 vph
Período da onda	6 horas

Tabela 6.5: Parâmetros do cenário “Dois Corredores” – Variação da Amplitude

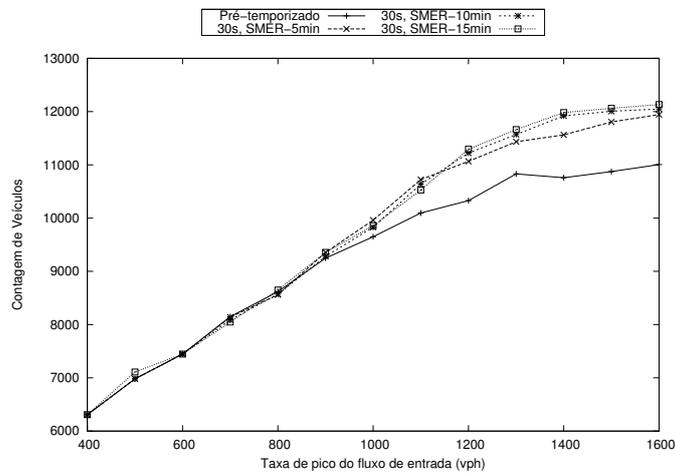


Figura 6.12: Contagem de veículos para o cenário da tabela 6.5

<b>Dois Corredores – Variação do Período</b>	
Tempo de simulação	6 horas
Tempo de verde/amarelo	29 segundos
Tempo de vermelho ( <i>clearance time</i> )	1 segundo
Limite de velocidade	60 km/h
Intervalo entre mudanças de reversibilidade	SER, 5, 10 e 15 min
Volume mínimo do corredor 1	400 vph
Volume mínimo do corredor 2	400 vph, defasado em 180°
Volume de pico do corredor 1	1400 vph
Volume de pico do corredor 2	1400 vph, defasado em 180°
Volume de cada via local	50 vph
Período da onda	1 a 10 horas, passo de 1 em 1 hora

Tabela 6.6: Parâmetros do cenário “Dois Corredores” – Variação do Período

<b>Grade Manhattan – Volume Constante</b>	
Tempo de simulação	6 horas
Tempo de verde/amarelo	29 segundos
Tempo de vermelho ( <i>clearance time</i> )	1 segundo
Limite de velocidade	60 km/h
Intervalo entre mudanças de reversibilidade	SER, 5, 10 e 15 min
Volume de cada via coletoras	400 vph
Volume da artéria	400, 800, 1200 e 1600 vph
Volume de cada via local	50 vph

Tabela 6.7: Parâmetros do cenário “Grade Manhattan” – Volume Constante

demais medidas encontram-se no apêndice B.

No último caso do cenário, também com volumes variáveis, é avaliada a mudança do período da senóide. A tabela 6.6 mostra o sumário de parâmetros; as medidas de interesse seguem nas figuras 6.14 (contagem de veículos) e 6.15 (tempo médio de espera); as figuras com as demais medidas de interesse são encontradas no apêndice B.

## Grade Manhattan

Para o segundo e último cenário, o “Grade Manhattan”, seguem primeiramente os resultados para a simulação com fluxos constantes; a tabela 6.7 registra os parâmetros utilizados e as medidas de interesse seguem nas figuras 6.16 (contagem de veículos) e 6.17 (tempo médio de espera). Na seção 6.4 será discutida uma modificação no algoritmo inicial. As figuras do apêndice C refletem as medidas de interesse colhidas após esta modificação.

Também no “Grade Manhattan”, o segundo teste opera com volumes variáveis, alterando-se em cada simulação o volume de pico da artéria e das coletoras. A tabela 6.8 mostra os parâmetros utilizados; as medidas de interesse seguem nas figuras 6.18 (contagem de veículos) e 6.19 (tempo médio de espera); as demais medidas de interesse encontram-se no apêndice C. Assim como no primeiro teste, as medidas do

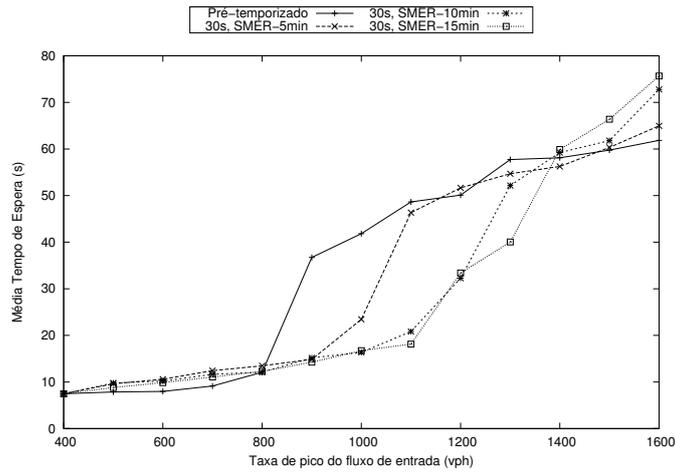


Figura 6.13: Tempo médio de espera para o cenário da tabela 6.5

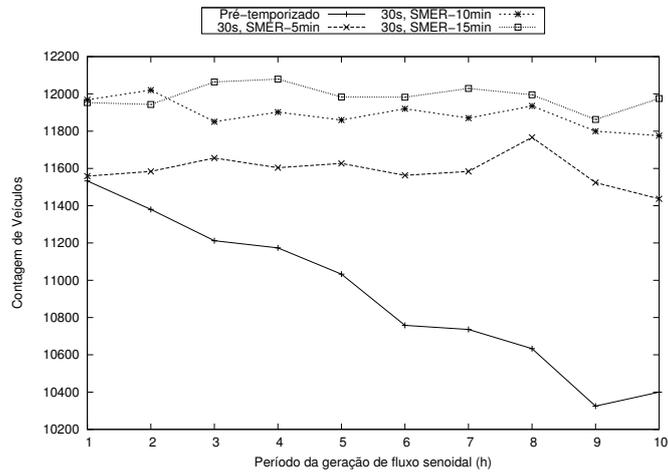


Figura 6.14: Contagem de veículos para o cenário da tabela 6.6

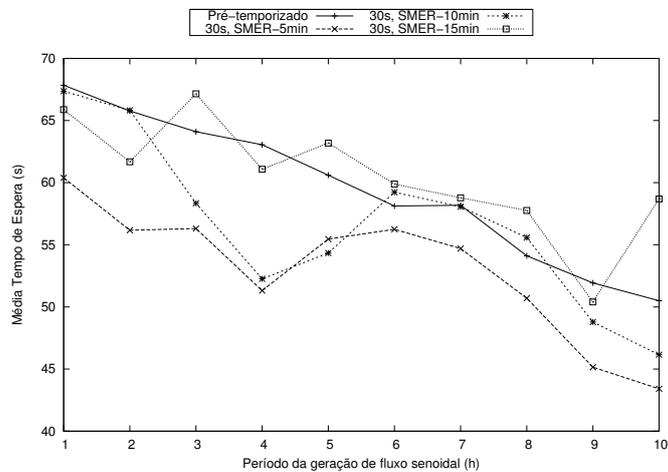


Figura 6.15: Tempo médio de espera para o cenário da tabela 6.6

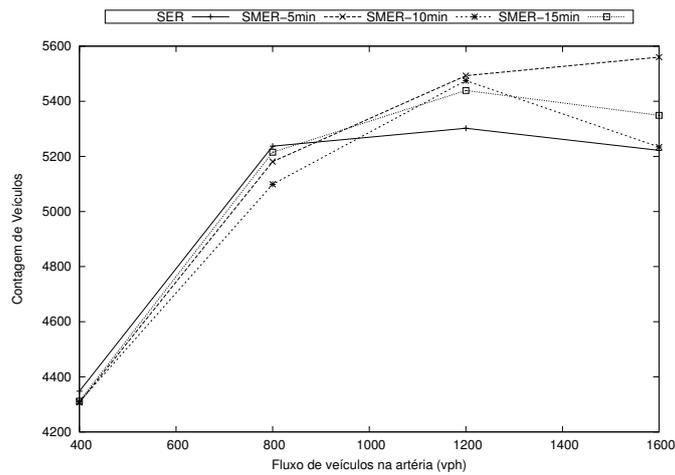


Figura 6.16: Contagem de veículos para o cenário da tabela 6.7

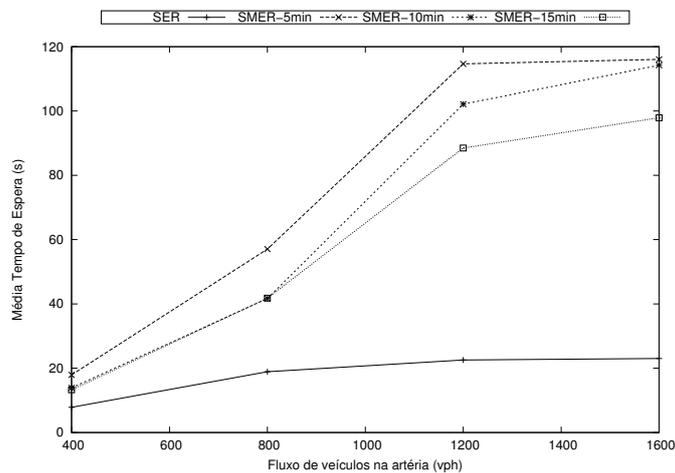


Figura 6.17: Tempo médio de espera para o cenário da tabela 6.7

Grade Manhattan – Variação da Amplitude	
Tempo de simulação	6 horas
Tempo de verde/amarelo	29 segundos
Tempo de vermelho ( <i>clearance time</i> )	1 segundo
Limite de velocidade	60 km/h
Intervalo entre mudanças de reversibilidade	SER, 5, 10 e 15 min
Volume mínimo de cada coletora	200 vph, defasado em 180°
Volume mínimo da artéria	400 vph
Volume de pico de cada coletora	400, 600 e 800 vph, defasado em 180°
Volume de pico da artéria	800, 1200 e 1600 vph,
Volume de cada via local	50 vph
Período da onda	6 horas

Tabela 6.8: Parâmetros do cenário “Grade Manhattan” – Variação da Amplitude

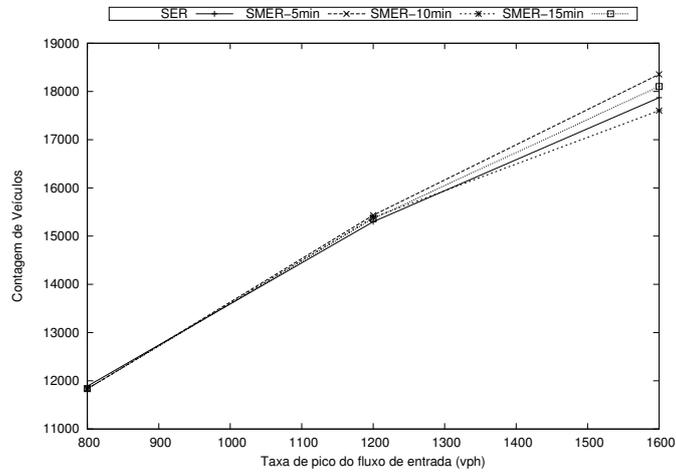


Figura 6.18: Contagem de veículos para o cenário da tabela 6.8

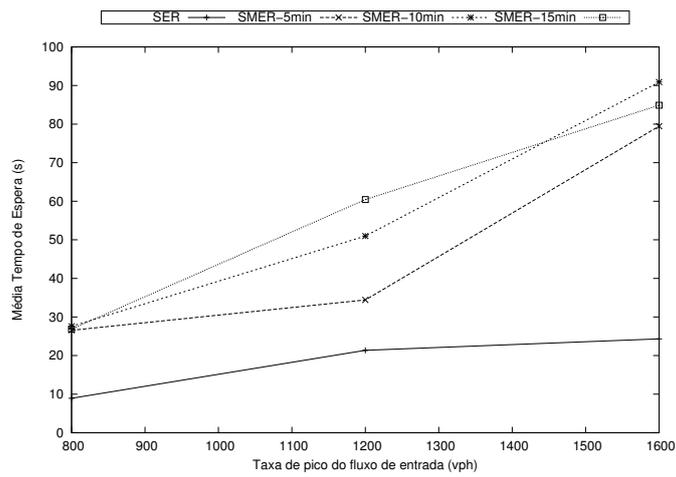


Figura 6.19: Tempo médio de espera para o cenário da tabela 6.8

Grade Manhattan – Variação do Período	
Tempo de simulação	6 horas
Tempo de verde/amarelo	29 segundos
Tempo de vermelho ( <i>clearance time</i> )	1 segundo
Limite de velocidade	60 km/h
Intervalo entre mudanças de reversibilidade	SER, 5, 10 e 15 min
Volume mínimo de cada coletora	200 vph, defasado em 180°
Volume mínimo da artéria	400 vph
Volume de pico de cada coletora	800 vph, defasado em 180°
Volume de pico da artéria	1600 vph,
Volume de cada via local	50 vph
Período da onda	2, 4, 6, 8 e 10 horas

Tabela 6.9: Parâmetros do cenário “Grade Manhattan” – Variação do Período

apêndice foram colhidas após a mudança no algoritmo a ser explicada abaixo.

Finalmente, o terceiro teste opera com volumes variáveis, alterando-se dessa vez, em cada simulação, o período das senóides de entrada. A tabela 6.9 mostra os parâmetros utilizados; as medidas de interesse seguem nas figuras 6.20 (contagem de veículos) e 6.21 (tempo médio de espera); as demais medidas são vistas no apêndice C, que, mais uma vez, refletem os valores calculados após a mudança no algoritmo tratada na seção 6.4.

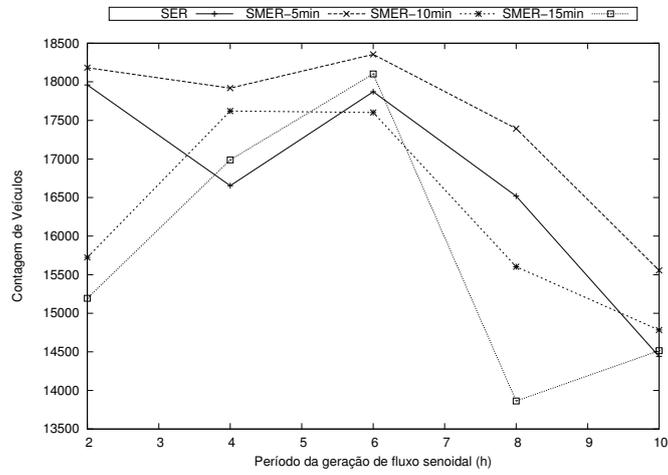


Figura 6.20: Contagem de veículos para o cenário da tabela 6.9

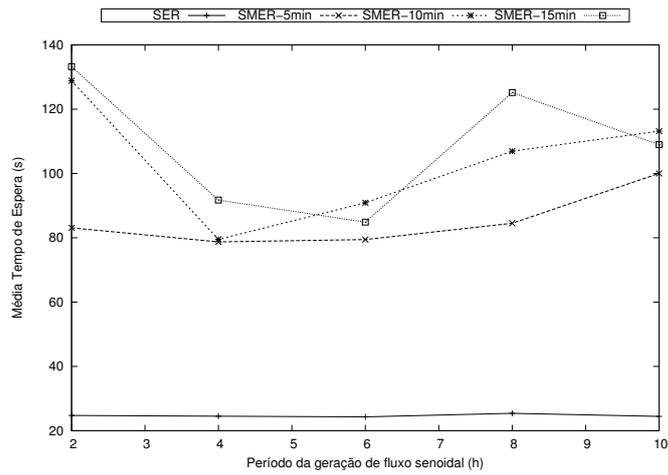


Figura 6.21: Tempo médio de espera para o cenário da tabela 6.9

## 6.4 Avaliação dos Resultados

Apresentados os resultados das medidas de interesse extraídas das simulações, cabe agora uma avaliação sobre os dados obtidos. Primeiro será comentado o desempenho do controlador na interseção sinalizada e em seguida os casos dos corredores e da grade *Manhattan*.

### 6.4.1 Controlador SMER

O controlador SMER para uma interseção isolada apresentou bons resultados, de maneira geral. No teste de volume constante, o caso SER apresentou melhores resultados para baixos volumes, porém sua qualidade rapidamente decaiu assim que volumes acima de 900 vph foram injetados, especificamente para este cenário. A partir daí, os casos em que há mudança de reversibilidade se tornaram mais eficientes, conseguindo manter o sistema ainda estável para maiores volumes de entrada.

Ainda no teste de volume constante, as simulações em que a mudança de reversibilidade ocorre com maior frequência se saíram especialmente melhores, resultado da resposta mais rápida às variações instantâneas no fluxo. Os testes com SMER conseguiram também manter uma mobilidade melhor do tráfego, com maiores velocidades médias e menores *headways*; no caso deste último, fica evidenciada a queda de eficiência do SER no aproveitamento dos tempos de verde. Para os casos em que o volume da segunda via foi expressivamente maior, notou-se um aumento no *headway* do SER; a explicação decorre do fato de que a via com menor volume, no SER, recebe um tempo de verde maior do que ela necessita. A demanda da chegada de veículos, sendo menor que a oferta de tempo de verde, acarreta em tempos maiores sendo percebidos entre os veículos que chegam ao cruzamento.

No teste de volume variável com variação de amplitude, novamente a partir dos 1000 vph, o SER começa a perder em qualidade de serviço para o SMER. Mesmo havendo variação do volume ao longo da simulação, o SMER mostrou ser capaz de se manter estável e ampliar a capacidade de serviço da interseção para suportar volumes que não seria capaz de servir no modelo de controlador clássico. Uma exceção foi o caso do SMER com intervalos de mudança de reversibilidade de 15 minutos, que oscilou em torno dos valores observados para o SER, mostrando a necessidade de se ter um tempo mais curto entre as mudanças de forma e obter uma resposta mais rápida do sistema.

Para se ter uma ideia de como o algoritmo progride ao longo da simulação, a figura 6.22 mostra a evolução do SMER com intervalos de 3 minutos em relação ao SER para o caso da variação de amplitude. Pode-se constatar que o SMER-3 converge para 20 segundos de tempo médio de espera, enquanto o SER tende a continuar crescendo ao longo da simulação. Os valores foram colhidos para o teste

em que o volume de pico das vias é de 1000vph.

No terceiro teste, de variação do período, pode ser observado um efeito interessante no gráfico da contagem de veículos. Conforme o período aumenta, a tendência do SER é a de baixar sua capacidade de serviço; isso pode ser concluído pelo fato de que menos veículos vão sendo observados durante a simulação, um sinal de que as vias de entrada passaram muito tempo saturadas, sem conseguir receber mais veículos. A explicação vem do fato de que, para longos períodos, os momentos de pico se tornam mais prolongados, favorecendo a criação de longas filas e o subsequente colapso do atendimento na interseção.

Ainda no terceiro teste, é interessante observar a discrepância dos tempos médios de viagem para o SMER-3min e SMER-5min em relação ao SMER-15min para a onda com período de 1 hora. Como, nesse caso, a variação do fluxo é muito elevada, a simulação em que o controlador só reavalia seus tempos de 15 em 15 minutos mostra que ele se sai visivelmente prejudicado. Interessante também observar como o *headway* manteve-se baixo para todos os casos SMER de maneira geral, evidenciando o bom aproveitamento dos tempos de verde e uma alocação correta das fatias de tempo do cruzamento para cada via.

#### **6.4.2 Coordenador SMER – Cenário “Dois Corredores”**

Iniciando a análise deste cenário pelo teste de volume constante, pode ser visto novamente que o SMER desempenha melhor que o SER, especialmente para volumes maiores. A contagem de veículos, para uma entrada de 1600 vph, chegou a mais de 4000 no SMER, enquanto parou nos 3000 já a partir de 800 vph. No tempo médio de espera e na velocidade média aconteceu queda no SER a partir dos 800 vph, evidenciando que este volume reflete seu ponto crítico para este cenário.

Para o teste da variação de amplitude, como esperado, o SMER também apresenta um comportamento melhor, sendo acompanhado pelo SER em volumes mais baixos, mas se destacando quando o SER passa a não suportar a demanda, o que começa a se dar a partir dos 800 vph, para este cenário. Vale observar que, de maneira geral, em todos os gráficos, as curvas do SER e o SMER voltam a se acompanhar para volumes muito altos. Isso acontece porque a própria infraestrutura das vias passa a não comportar tamanho volume. Para volumes deste porte, passa a ser necessária a ampliação do número de faixas das vias.

No terceiro teste, de variação do período, observa-se novamente a contagem de veículos decrescendo em relação ao aumento do período, para todos os testes. Novamente, o principal fator causador desse decaimento com o tamanho do período deve-se aos momentos prolongados de pico de tráfego, provocando um estouro da capacidade das vias e formação de filas, que, por sua vez, tomam um tempo consi-

derável para que o sistema consiga desfazê-las.

Adicionalmente, o gráfico da figura 6.23 foi construído para mostrar os tempos médios de espera para os veículos observados exclusivamente dentro dos corredores verdes. Os dados deste gráfico foram colhidos para o caso em que se varia o período da taxa senoidal de chegada. Enquanto, em média, veículos trafegando por vias não-coordenadas gastam entre 20 e 30 segundos parados em cada uma delas, praticamente não há tempo de espera para as vias coordenadas. Apenas veículos que por ventura venham a andar abaixo da velocidade da onda verde serão interrompidos por semáforos.

De maneira geral, o coordenador obteve sucesso no serviço do sistema deste cenário. O algoritmo de cálculo dos *offsets* provou ser funcional, já que os tempos médios de espera e as velocidades médias se compararam aos observados para uma interseção isolada e, em alguns casos, o coordenador até se sai melhor. Para o caso de um sistema de controle de tráfego tradicional, seria esperado um aumento do tempo de espera médio conforme fossem adicionadas novas interseções ao sistema – demonstrando a escalabilidade do Coordenador SMER.

### 6.4.3 Coordenador SMER – Cenário “Grade Manhattan”

Este terceiro e último cenário desperta um maior interesse, pois observou-se, com os dados obtidos inicialmente, que o SMER obteve um resultado, de modo geral, pior que o do SER.

Já se observa, no teste de volume constante, que o SMER perde eficiência com o aumento do volume de entrada. Por exemplo, na medida do tempo médio de espera, o SER se manteve em torno de 20 segundos, enquanto que o SMER chegou a mais de 110 segundos para um volume de 1200 vph. Observa-se também que, ao contrário do observado nos outros testes, o SMER com maior intervalo entre mudanças de reversibilidade se sai melhor que os de menor intervalo, obtendo 90 segundos de tempo de espera no SMER-15min para o mesmo caso citado acima, enquanto que o SMER-5min chega a quase 120 segundos.

A primeira explicação para isto vem do fato de que o sistema se tornou particularmente sensível ao aumento de volume, possivelmente relacionado a uma maior imprevisibilidade no fluxo instantâneo de chegada. Quanto maior o volume de veículos, mais instável se torna o sistema (como pôde ser visto no capítulo 2); nesse sentido, o SMER com maior intervalo entre mudanças funcionou como um *filtro passa-baixa*, ignorando as flutuações momentâneas no fluxo observado e reduzindo a sensibilidade do sistema.

Resta ainda, porém, entender o motivo desta sensibilidade e o motivo do SER ter obtido melhor desempenho. Neste cenário específico, tem-se uma artéria cortada

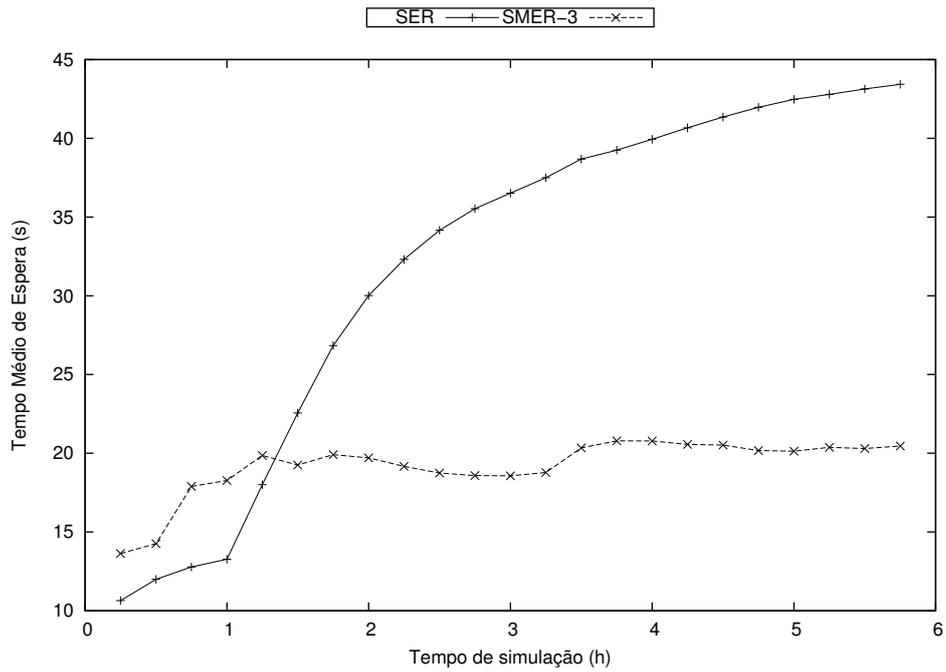


Figura 6.22: Evolução do tempo médio de espera.

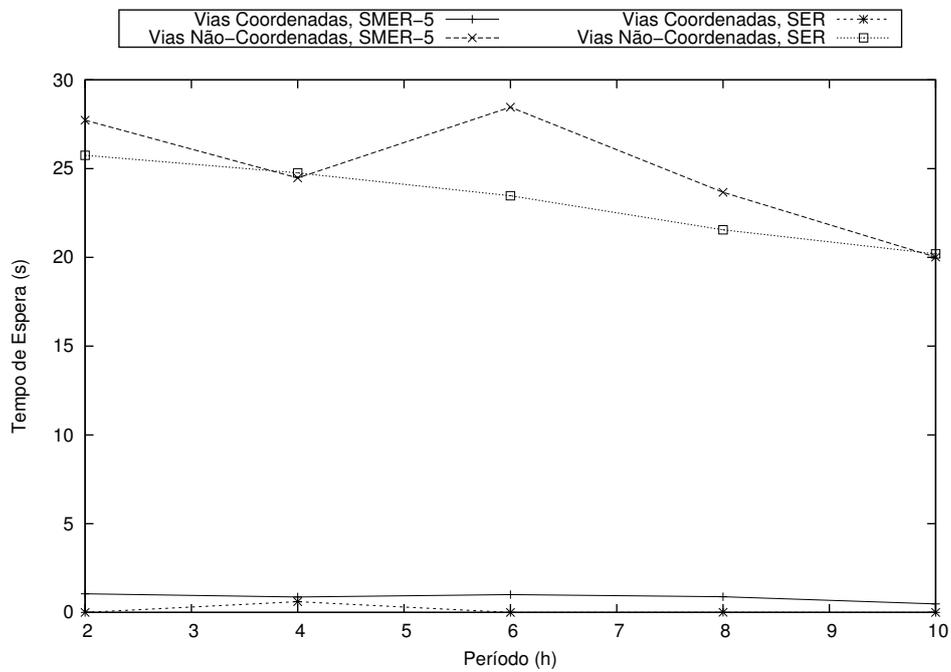


Figura 6.23: Tempo médio de espera em vias coordenadas e não-coordenadas

Cenário	Concorrência SER	Concorrência SMER
Controlador SMER	1	1
Dois Corredores	1	1
Grade Manhattan	2.5	1.3

Tabela 6.10: Concorrência média observada da dinâmica SMER para cada cenário.

por quatro vias coletoras, com a observação de que as coletoras não se cruzam, tendo seu movimento exclusivamente dependente do movimento da artéria, e vice-versa. Percebe-se aqui que são formados dois conjuntos independentes: quando a artéria executa, todas as coletoras têm seu movimento bloqueado; por outro lado, quando uma coletora executa, a artéria precisa aguardar – porém, a observação principal aqui é que as demais coletoras *deveriam* executar paralelamente de forma a maximizar a vazão do sistema; de maneira geral, é interessante que nenhuma interseção sinalizada fique ociosa e esteja sempre servindo a pelo menos um dos movimentos concorrentes. O problema deste cenário reside justamente no fato de que algumas interseções permaneceram ociosas durante parte da simulação.

O motivo desta ociosidade deve-se às aferições independentes em cada coletora. Apesar do fluxo de chegada de veículos acompanhar uma taxa esperada, mesmo assim, as chegadas ainda são aleatórias. Isso significa que, num dado momento, apesar de todas as coletoras possuírem o mesmo volume médio de chegadas, a taxa momentânea varia independentemente em cada uma. Isso significa que, no momento do cálculo das mudanças de reversibilidade, cada vértice representando uma coletora vai requerer uma demanda, apesar de próxima, provavelmente diferente da demanda das outras coletoras. O SMER obrigatoriamente respeita as demandas requeridas por cada vértice, deixando o processo em espera quando necessário para que ele não execute mais frequentemente que o desejado.

Por conta deste comportamento do SMER, em diversos momentos, algumas vias coletoras ficam ociosas, enquanto alguma de suas vizinhas está operando. Vale lembrar que, neste instante, não só vias coletoras estão ociosas, como também a artéria, já que ao menos uma coletora está operando. Soma-se ainda, a esse valor, o volume menor das vias locais bloqueadas pela passagem do pelotão da via coletora. Para ilustrar este comportamento, foram levantadas as concorrências do grafo SMER para as simulações realizadas. Os resultados podem ser vistos na tabela 6.10.

No caso do Controlador SMER e no “Dois Corredores”, por conta da topologia do grafo em que existem apenas dois vértices, a concorrência necessariamente será 1, pois a todo instante um vértice deve ser *sink* e não mais que um. Porém, no caso da “Grade Manhattan” tem-se uma topologia mais complexa com cinco vértices, tendo um deles grau 4, enquanto os demais, grau 1. Assim, no melhor caso, o grafo possui período de tamanho 2, alternando um estado com 1 vértice *sink* e outro com 4 *sinks*.

Assim, a média de concorrência torna-se 2.5. A partir daí, pode-se constatar que uma concorrência de 1.3 está muito aquém do ideal, significando que durante boa parte do tempo, interseções estão em espera quando poderiam estar operando.

Por conta do problema observado, foi feita uma modificação no algoritmo inicialmente proposto, com intuito de aumentar a concorrência do sistema. Nesta nova proposta, os corredores são colocados num número mínimo de grupos de forma que nenhum grupo contenha em si corredores concorrentes. Isto foi alcançado rodando um algoritmo de coloração similar ao visto no Alg-Cor. Somado a isso, agora, os dados coletados pelos sensores em cada corredor são, ao final de um período de coleta de dados, agregados de forma que cada grupo de corredores possua um valor único. Este valor único foi escolhido como sendo o valor máximo dentre os valores aferidos para cada corredor do grupo. Assim, a mudança de reversibilidade passa a ser feita de forma que a demanda dos corredores de um mesmo grupo seja a mesma, garantindo que, quando um dos corredores de um grupo estiver operando, todos os outros do mesmo grupo também estarão, já que suas reversibilidades serão idênticas.

Exemplificando com o caso da “Grade Manhattan”, a artéria é marcada com a cor 1, enquanto as quatro coletoras recebem a cor 2. Os sensores em cada corredor, então, trabalham normalmente, coletando dados sobre o estado atual do trânsito. A diferença ocorre apenas no modo como as demandas são calculadas; em vez de cada coletora calcular sua demanda individualmente, elas chegam a uma demanda consensual para todo o grupo, de forma que todas possam operar conjuntamente e evitando assim que interseções fiquem ociosas a qualquer momento. Esta solução ainda mantém a dinâmica SMER de balancamento dos tempos das fases, apenas certificando que todas as interseções estarão trabalhando em alta carga.

Com a modificação no algoritmo, o caso da “Grade Manhattan” passa a obter uma concorrência que varia segundo a razão entre as demandas dos grupos. Quando o valor da demanda do grupo com maior número de vértices (o grupo das vias coletoras) aumenta em relação à demanda do menor grupo (representado pelo conjunto simples da artéria), a concorrência tende a aumentar. Isso pode ser visto na figura 6.24, que mostra o caso em que as amplitudes foram variadas ao longo da simulação. Pode-se perceber que a variação da concorrência se dá segundo uma senóide, justamente por conta do comportamento senoidal da variação das taxas de chegada no sistema. A média agora é de 2,15, num patamar bem melhor em relação aos 1,3 obtidos antes da alteração do algoritmo.

Os efeitos na melhoria do algoritmo foram sentidos principalmente na contagem de veículos. O sistema aumentou a capacidade de atendimento de veículos por hora, como pode ser visto na figura 6.25, em comparação com os dados da figura 6.20, para o caso em que se varia o período de repetição do fluxo senoidal de entrada. Os gráficos do apêndice C refletem as medidas de interesse captadas após a melhoria

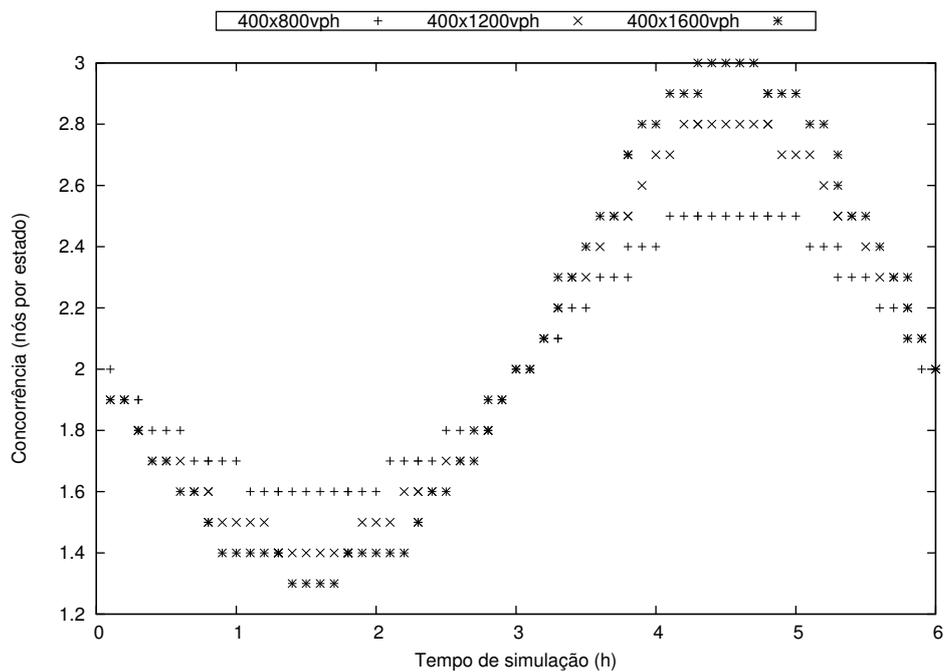


Figura 6.24: Variação da concorrência ao longo da simulação para o caso “Grade Manhattan” com variação de amplitude.

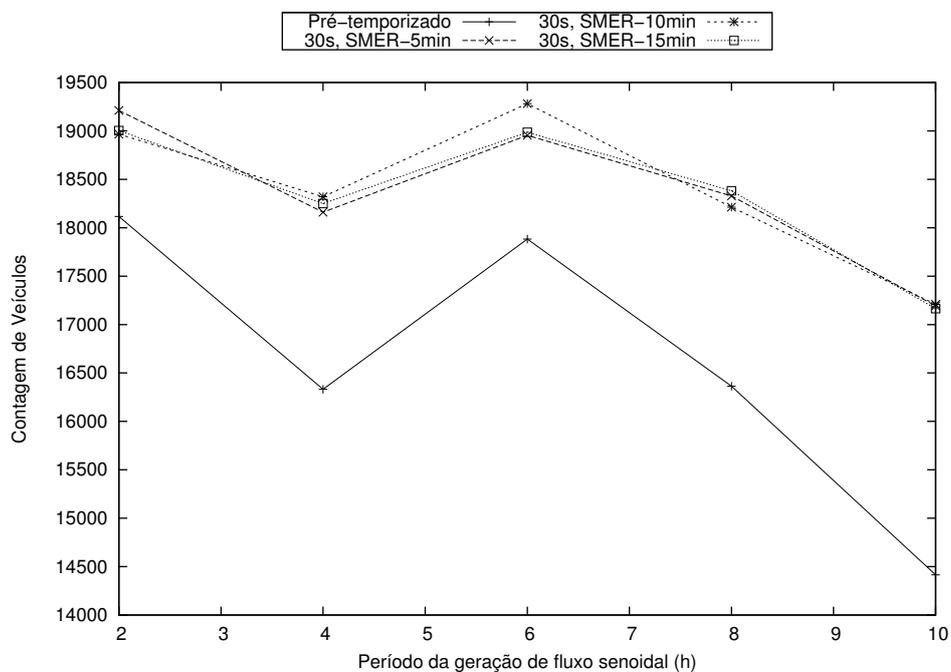


Figura 6.25: Contagem de veículos após melhoria no algoritmo.

do algoritmo.

Concluindo, o coordenador SMER conseguiu obter bons resultados para o caso específico de operação no modo SER. Após a melhoria no algoritmo, com o consequente aumento na concorrência, os casos SMER também apresentaram bons resultados. O coordenador se mostrou extremamente eficiente no atendimento das demandas dos corredores concorrentes, conseguindo aproveitar de maneira eficiente a largura de banda fornecida pelo algoritmo de cálculo dos *offsets*. Após a alteração do algoritmo para aumentar a concorrência, foi possível aumentar ainda mais a vazão do sistema e o subsequente número de veículos atendidos por hora.

# Capítulo 7

## Conclusões e trabalhos futuros

Este trabalho apresentou uma proposta de dois novos mecanismos de ITS utilizando a técnica de escalonamento de processos SMER. O primeiro, um controlador de interseção sinalizada isolada; o segundo, um coordenador de corredores de vias por onde circulam ondas verdes. Além disso, um simulador foi construído para realizar os testes propostos: o MicroLAM.

Foi demonstrada a viabilidade de se usar o SMER para controlar um cruzamento sinalizado, levando em conta variações no tráfego. O controlador obteve bom desempenho nos experimentos realizados.

O mecanismo de coordenação de corredores mostrou-se funcional, conseguindo coordenar sistemas complexos de corredores que concorrem entre si e manter uma boa vazão global nos cenários em que foi experimentada a versão SER do mecanismo. Vale ressaltar, porém, que era esperado que a versão SMER conseguisse obter ainda melhores resultados que a SER, hipótese que não ainda pôde ser confirmada por conta de mau desempenho obtido na estratégia de cálculo da demanda que se usou para modelar o sistema. Apesar disso, o mecanismo se mostrou promissor e, com algumas modificações em seu funcionamento, pode ser capaz de melhorar sua eficiência para cenários mais complexos.

### 7.1 Trabalhos Futuros

Os mecanismos propostos abrem margem a uma série de trabalhos que podem se desdobrar a partir dos resultados obtidos. Somado a isso, o simulador MicroLAM passa a oferecer uma base de partida para novos experimentos de ITS, bem como uma *engine* SMER construída de forma modularizada para ser facilmente extensível. A seguir são apresentados trabalhos futuros possíveis para cada um deles.

### 7.1.1 Controlador SMER

Um modelo mais avançado do Controlador SMER começou a ser desenvolvido durante os estudos para esta dissertação, porém não foi concluído a tempo do encerramento. Trata-se de um controlador SMER *preemptivo*, cujo objetivo é servir como mecanismo de “ajuste fino” para o controlador original. Utilizando sensores de passagem e presença nas vias de chegada, ele funciona como um controlador atuado capaz de estender ou encurtar tempos de verde de acordo com a demanda imediata sendo observada na via. A implementação está praticamente terminada, faltando apenas o ajuste dos parâmetros de atuação (intervalo mínimo, máximo e duração dos períodos de extensão) e testes com escolha e posicionamento dos sensores para poder se chegar a bons resultados.

Outra possibilidade é a de se fazer testes com outros tipos de sensores e comparar o desempenho final obtido. Além disso, poderia ser experimentado algum tipo de ajuste através de média móvel, que levasse em conta não só a aferição do último ciclo observado, como também dos  $n$  ciclos anteriores, numa tentativa de tornar o sistema ainda mais estável. Entretanto, há que se tomar cuidado para não remover a sensibilidade do controlador às variações significativas, caso contrário este perderá sua maior característica, que é a resposta rápida às condições de tráfego.

Ainda baseado no Controlador SMER, uma experiência possível é o uso do SER-H (SER com hibernação de nós – ver [36]) para desligar fases que estiverem recebendo pouca demanda, de forma a alocar mais tempo para outras fases necessitando de maior vazão.

Além disso, o Controlador SMER pode ainda ser estendido para dar suporte a movimentos de pedestres pela interseção, ou a combinações mais complexas, como ciclovias e corredores expressos de transporte público.

Finalmente, do ponto de vista da avaliação de desempenho do sistema, um trabalho futuro importante é o de avaliar o comportamento do mecanismo perante uma variação da taxa de chegada colhida durante um determinado período em uma via real. Assim, o modelo poderia ser validado também para uma variação não senoidal da taxa de chegada, mais próxima da que seria observada numa cidade.

### 7.1.2 Coordenador SMER

No Coordenador SMER, um trabalho futuro pertinente seria o de avaliar o sistema para cenários ainda mais complexos, de forma a verificar se a melhoria no algoritmo explicada no capítulo 6 continua a valer com o aumento da complexidade. Seria interessante também avaliar o comportamento do mecanismo com variações da taxa de chegada segundo uma amostragem de um sistema real, e não somente com uma variação senoidal.

Um segundo trabalho importante seria o de avaliar o impacto de se implantar sensores por todos os segmentos de via do corredor, e não só na entrada. Estes sensores secundários poderiam ser usados para promover pequenos ajustes nos parâmetros da geração de sincronia, respondendo à formação de filas residuais no meio do corredor devido a veículos lentos, ou ainda por veículos que vieram de vias transversais.

Finalmente, seria interessante observar o desempenho do sistema para veículos que chegam por vias locais e decidem entrar no corredor em vez de apenas cruzá-lo. Estes veículos possivelmente contribuiriam para um deterioramento do desempenho do sistema coordenador. Uma possível solução seria a instalação de sensores em cada segmento de via integrante do corredor, como dito no parágrafo anterior.

### 7.1.3 MicroLAM

Desde o início da construção do simulador, diversos novos módulos e experimentos foram idealizados. Por conta da priorização no desenvolvimento do controlador deste trabalho, as ideias foram anotadas e as mais interessantes seguem abaixo.

Sendo talvez a proposta mais importante de todas no curto prazo, a implementação de múltiplas faixas permitiria uma nova gama de experimentos com maior realidade e complexidade, possibilitando extração de resultados para vias de maior capacidade. Juntamente com esta implementação, seria necessária a expansão do IDM para adotar um modelo de mudança de faixa. Para isso, uma referência pode ser o MOBIL [37].

Outra ideia viável é o suporte a mapas do *Open Street Map* [17] para gerar cenários no MicroLAM. Isso tornaria possível o uso de cenários reais de maneira prática para realizar experimentos dentro do simulador. Paralelamente, o desenvolvimento de uma ferramenta de edição de mapas também seria útil para acelerar o processo de construção de cenários, que hoje é feito manualmente através de arquivos XML.

Uma ideia que renderia um trabalho de longo prazo é a modelagem de pessoas como recursos no simulador. Com isso, seria possível avaliar novas medidas de interesse, como, por exemplo, a vazão de pessoas cruzando pelo sistema. Uma gama de trabalhos que fariam sentido a partir disso seria o de avaliar o desempenho de novos modelos de transporte público e quão eficientes eles são no traslado das pessoas.

# Referências Bibliográficas

- [1] FENABRAVE. “Emplacamentos batem recorde e Fenabrave revê projeções, prevenendo crescimento de mais de 8% para automóveis e comerciais leves”. 2012. Disponível em: <[http://www.fenabrave.com.br/principal/home/?sistema=conteudos|conteudo&id\\_conteudo=6068#conteudo](http://www.fenabrave.com.br/principal/home/?sistema=conteudos|conteudo&id_conteudo=6068#conteudo)>. Acesso em 10 de setembro de 2012.
- [2] CHOWDHURY, M., SADEK, A. *Fundamentals of Intelligent Transportation Systems Planning*. Artech House Publishers, 2003.
- [3] SOARES, I. B. *Controle Distribuído da Sinalização de Interseções e do Fluxo de Tráfego*. Tese de Mestrado, COPPE-UFRJ, 2007.
- [4] MCSHANE, W. R., ROESS, R. P. *Traffic Engineering*. Prentice Hall, 2004.
- [5] BARBOSA, V. C. *Concurrency in systems with neighborhood constraints*. Tese de Doutorado, University of California, Los Angeles, 1986. AAI8702613.
- [6] 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>>.
- [7] 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.
- [8] FRANCA, F., , FRANCA, F. M. G., et al. “Building Artificial CPGs with Asymmetric Hopfield Networks”. In: *in IEEE-INNS-ENNS*, pp. 24–27, 2000.
- [9] PAILLARD, G., LAVAUULT, C., FRANCA, F. “A Distributed Prime Sieving Algorithm based on Scheduling by Multiple Edge Reversal”. In: *Proceedings of the The 4th International Symposium on Parallel and Distributed Computing*, ISPDC '05, pp. 139–146, Washington, DC, USA, 2005. IEEE

Computer Society. ISBN: 0-7695-2434-6. doi: 10.1109/ISPDC.2005.5.  
Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1109/ISPDC.2005.5>>.

- [10] SANTOS, A. A. D. *Escalonamento Distribuído Livre de Colisões para Redes de Sensores sem Fio com Múltiplas Fontes e Múltiplos Sumidouros*. Tese de Doutorado, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2012.
- [11] PTVGROUP. “VISSIM”. Disponível em: <<http://www.ptv-vision.com/en-uk/products/vision-traffic-suite/>>. Acesso em 10 de setembro de 2012.
- [12] HELBING, D., MOLNAR, P. “Social force model for pedestrian dynamics”, *Physical review E*, v. 51, n. 5, pp. 4282, 1995.
- [13] TRAFFICWARE. “Synchro”. Disponível em: <<http://www.trafficwareinc.com/>>. Acesso em 10 de setembro de 2012.
- [14] LABORATORY, T. R. “TRANSYT”. Disponível em: <[https://www.trlsoftware.co.uk/products/junction\\_signal\\_design/transyt](https://www.trlsoftware.co.uk/products/junction_signal_design/transyt)>. Acesso em 10 de setembro de 2012.
- [15] MCTRANS. “TRANSYT-7F”. Disponível em: <<http://mctrans.ce.ufl.edu/featured/TRANSYT-7F/>>. Acesso em 10 de setembro de 2012.
- [16] BEHRISCH, M., BIEKER, L., ERDMANN, J., et al. “SUMO - Simulation of Urban MObility: An Overview”. In: *SIMUL 2011, The Third International Conference on Advances in System Simulation*, pp. 63–68, Barcelona, Spain, October 2011.
- [17] 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>>.
- [18] TREIBER, M. “Microsimulation of Road Traffic Flow”. Disponível em: <<http://www.traffic-simulation.de/>>. Acesso em 10 de setembro de 2012.
- [19] 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.
- [20] DELL’OLMO, P., MIRCHANDANI, P. “REALBAND: An approach for real-time coordination of traffic flows on networks”, *Transportation Research Record*, pp. 106–116, 1995.

- [21] HUNT, P., ROBERTSON, D., BRETHERTON, R., et al. *SCOOT-a traffic responsive method of coordinating signals*. Relatório técnico, 1981.
- [22] HUNT, P., ROBERTSON, D., BRETHERTON, R., et al. “The SCOOT on-line traffic signal optimisation technique”, *Traffic engineering and control*, v. 23, n. 4, 1982.
- [23] MIRCHANDANI, P., HEAD, L. “A real-time traffic signal control system: architecture, algorithms, and analysis”, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, v. 9, n. 6, pp. 415–432, 2001.
- [24] BALAN, G., LUKE, S. “History-based traffic control”. In: *Proceedings of the fifth international joint conference on Autonomous agents and multiagent systems*, pp. 616–621. ACM, 2006.
- [25] BAZZAN, A. “A distributed approach for coordination of traffic signal agents”, *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, v. 10, n. 1, pp. 131–164, 2005.
- [26] DE OLIVEIRA, D., BAZZAN, A. “Traffic lights control with adaptive group formation based on swarm intelligence”, *Ant Colony Optimization and Swarm Intelligence*, pp. 520–521, 2006.
- [27] ROSÁRIO, G. M. *Um Classificador Visual Autônomo de Densidade de Tráfego Urbano*. Tese de Mestrado, COPPE-UFRJ, 2012.
- [28] *Highway Capacity Manual*. U.S. Transportation Research Board, 2000.
- [29] DIJKSTRA, E. “Hierarchical ordering of sequential processes”, *Acta informatica*, v. 1, n. 2, pp. 115–138, 1971.
- [30] CHANDY, K., MISRA, J. “The drinking philosophers problem”, *ACM Transactions on Programming Languages and Systems (TOPLAS)*, v. 6, n. 4, pp. 632–646, 1984.
- [31] ARANTES JR, G. M. *Trilhas, Otimização de Concorrência e Inicialização Probabilística em Sistemas sob Reversão de Arestas*. Tese de Doutorado, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2006.
- [32] ARANTES JR, G., FRANÇA, F., MARTINHON, C. “Randomized generation of acyclic orientations upon anonymous distributed systems”, *Journal of Parallel and Distributed Computing*, v. 69, n. 3, pp. 239–246, 2009.
- [33] ROTHERY, R. “Car following models”, *Trac Flow Theory*, 1992.

- [34] KLEIN, L. A. *Traffic Detector Handbook: Third Edition—Volume I*. Relatório Técnico FHWA-HRT-06-108, Federal Highway Administration, 2006. Disponível em: <<http://www.fhwa.dot.gov/publications/research/safety/04091/index.cfm>>.
- [35] JANERT, P. *Gnuplot in action: understanding data with graphs*. Manning Publications Co., 2009.
- [36] CARVALHO, D., PROTTI, F., DE GREGORIO, M., et al. “A novel distributed scheduling algorithm for resource sharing under near-heavy load”, *Principles of distributed systems*, pp. 900–900, 2005.
- [37] KESTING, A., TREIBER, M., HELBING, D. “General lane-changing model MOBIL for car-following models”, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, v. 1999, n. -1, pp. 86–94, 2007.

# Apêndice A

## Resultados das Simulações - Controlador SMER

Este apêndice contém os resultados da simulação para o cenário de teste do Controlador SMER.

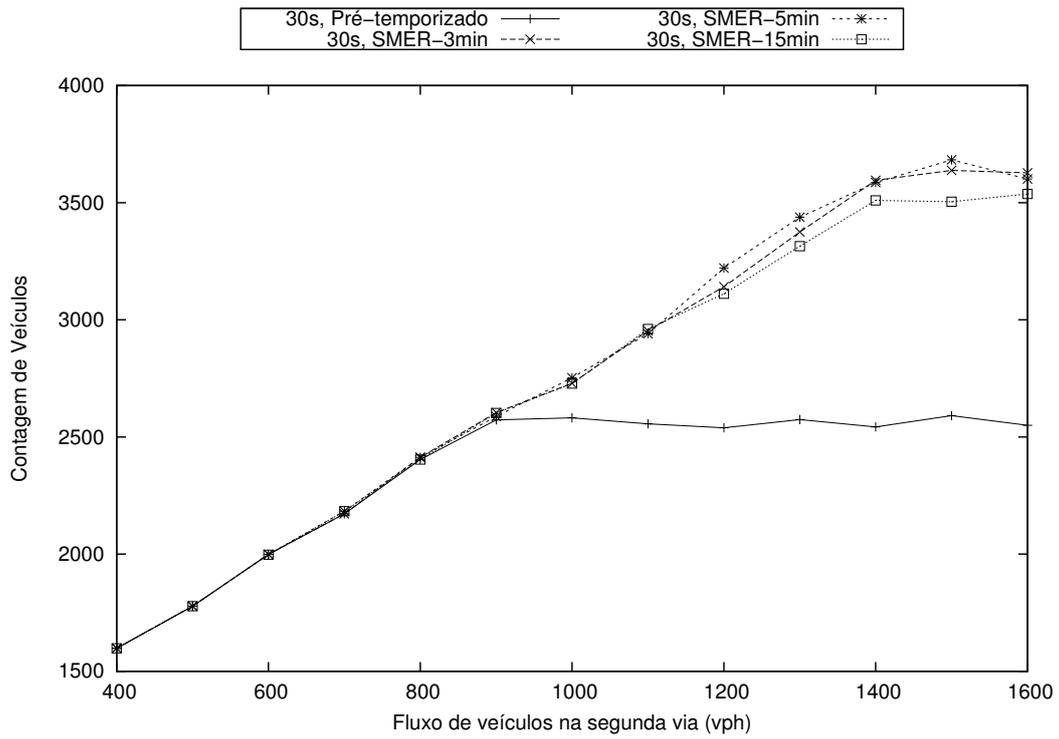


Figura A.1: Contagem de veículos para o cenário da tabela 6.1

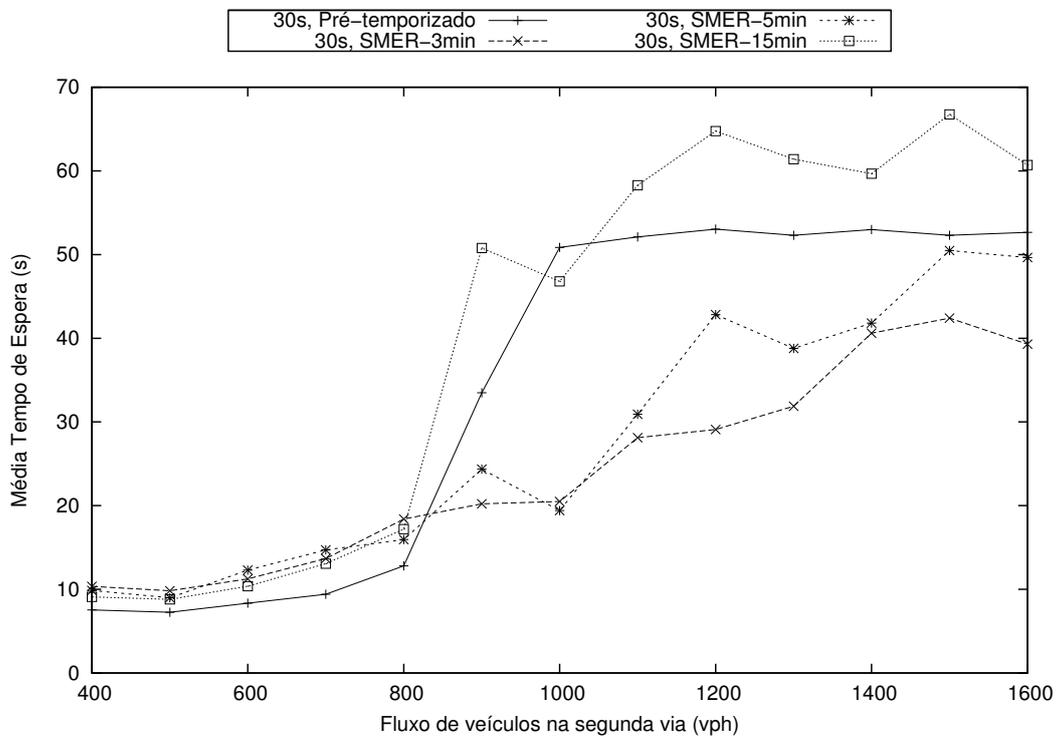


Figura A.2: Tempo médio de espera para o cenário da tabela 6.1

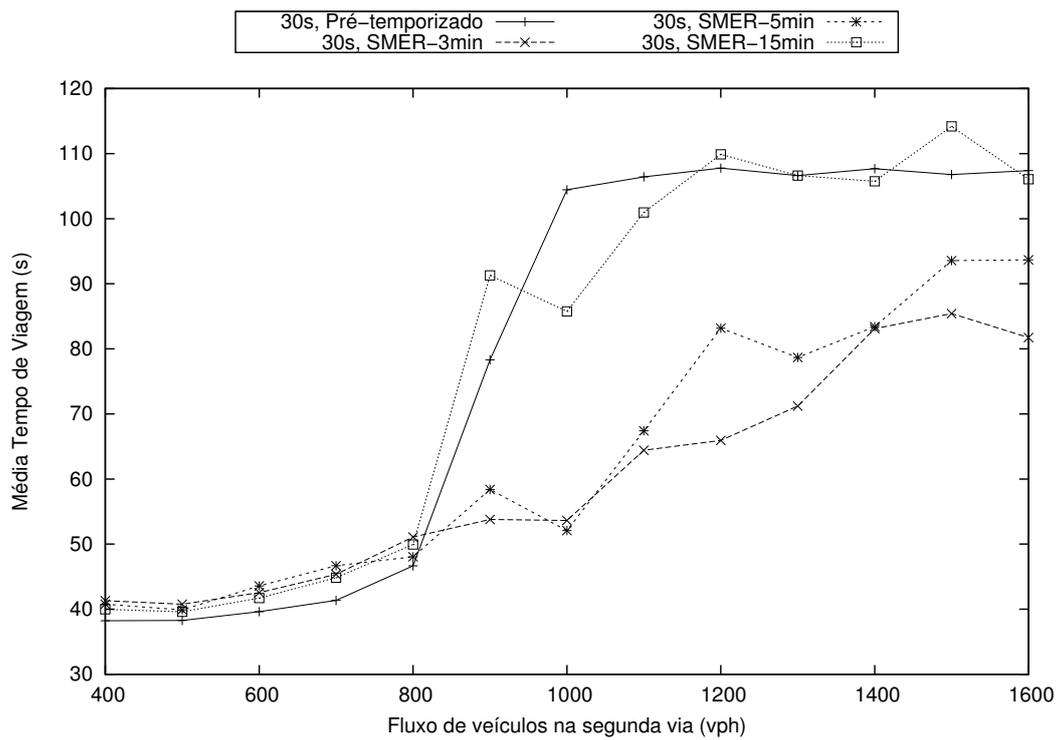


Figura A.3: Tempo médio de viagem para o cenário da tabela 6.1

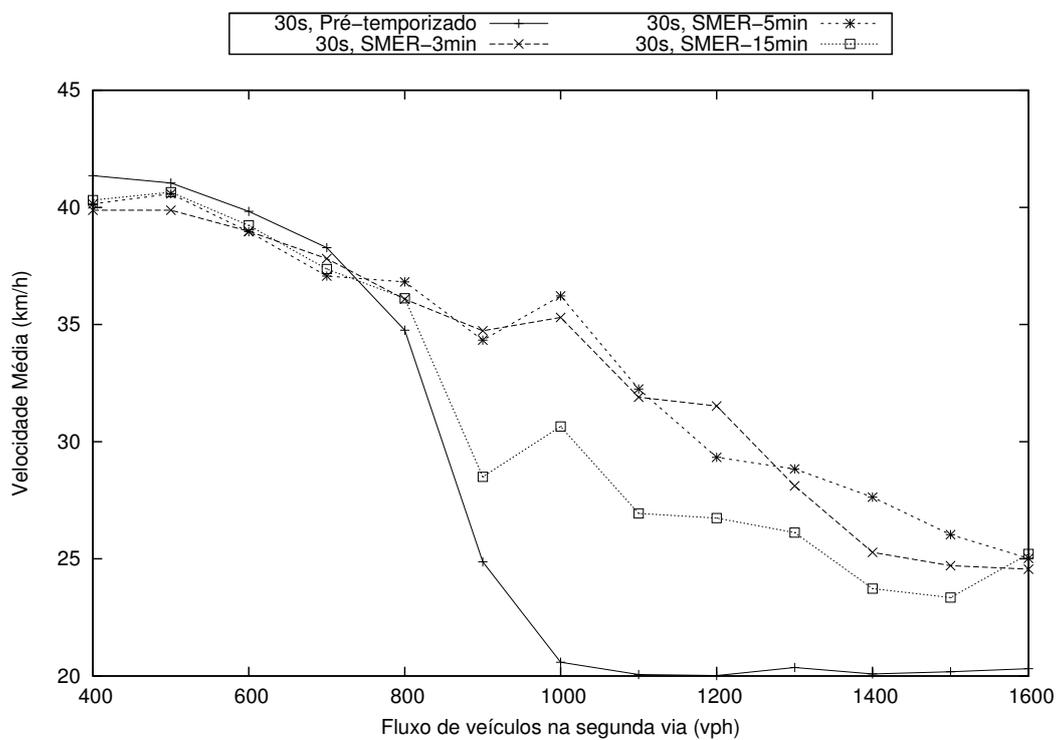


Figura A.4: Velocidade média para o cenário da tabela 6.1

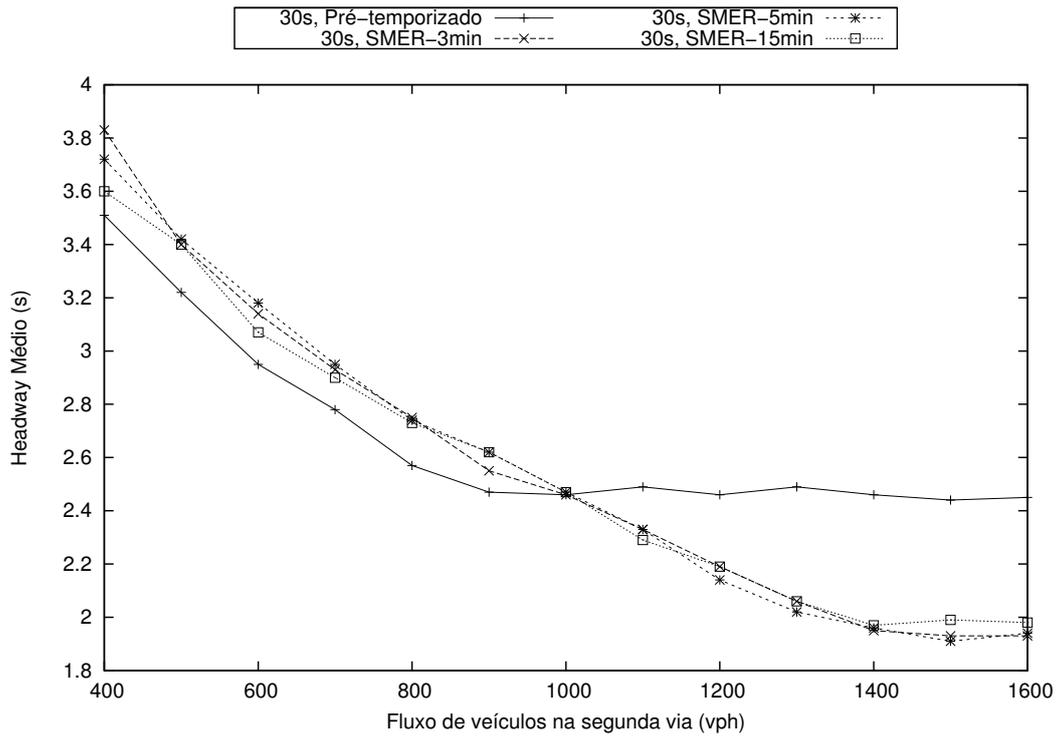


Figura A.5: *Headway* para o cenário da tabela 6.1

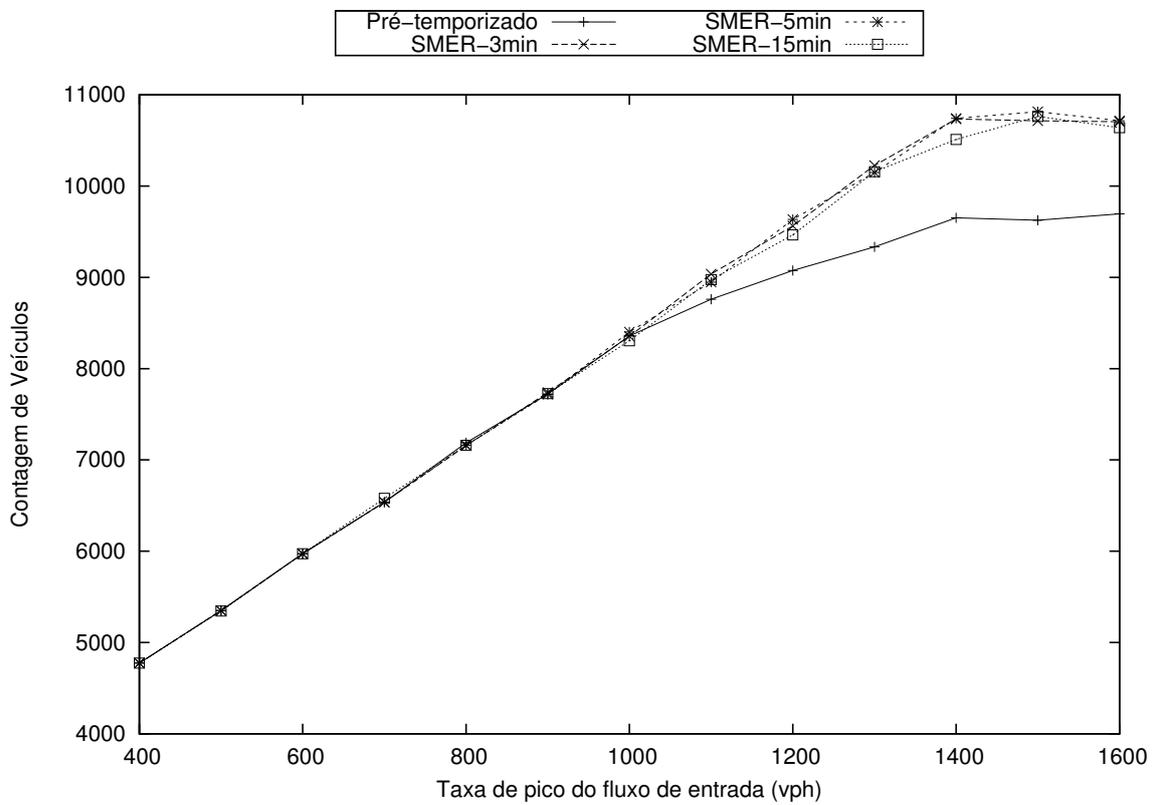


Figura A.6: Contagem de veículos para o cenário da tabela 6.2

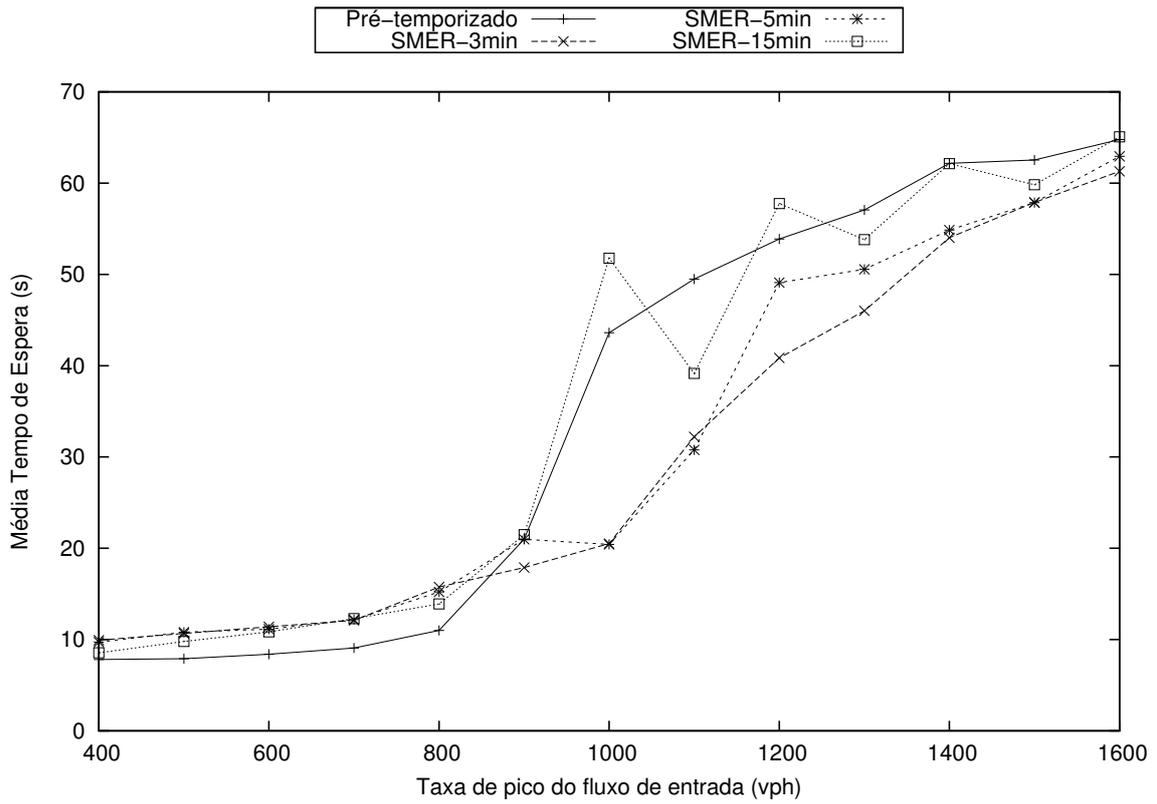


Figura A.7: Tempo médio de espera para o cenário da tabela 6.2

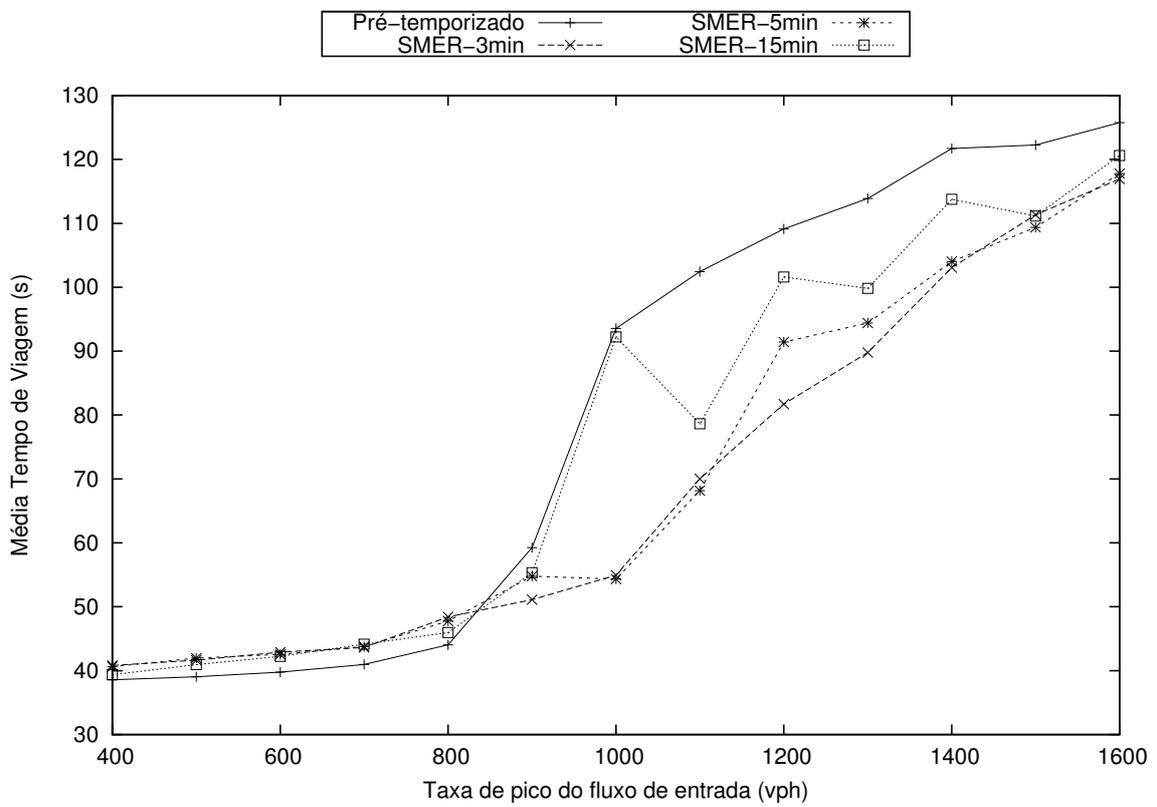


Figura A.8: Tempo médio de viagem para o cenário da tabela 6.2

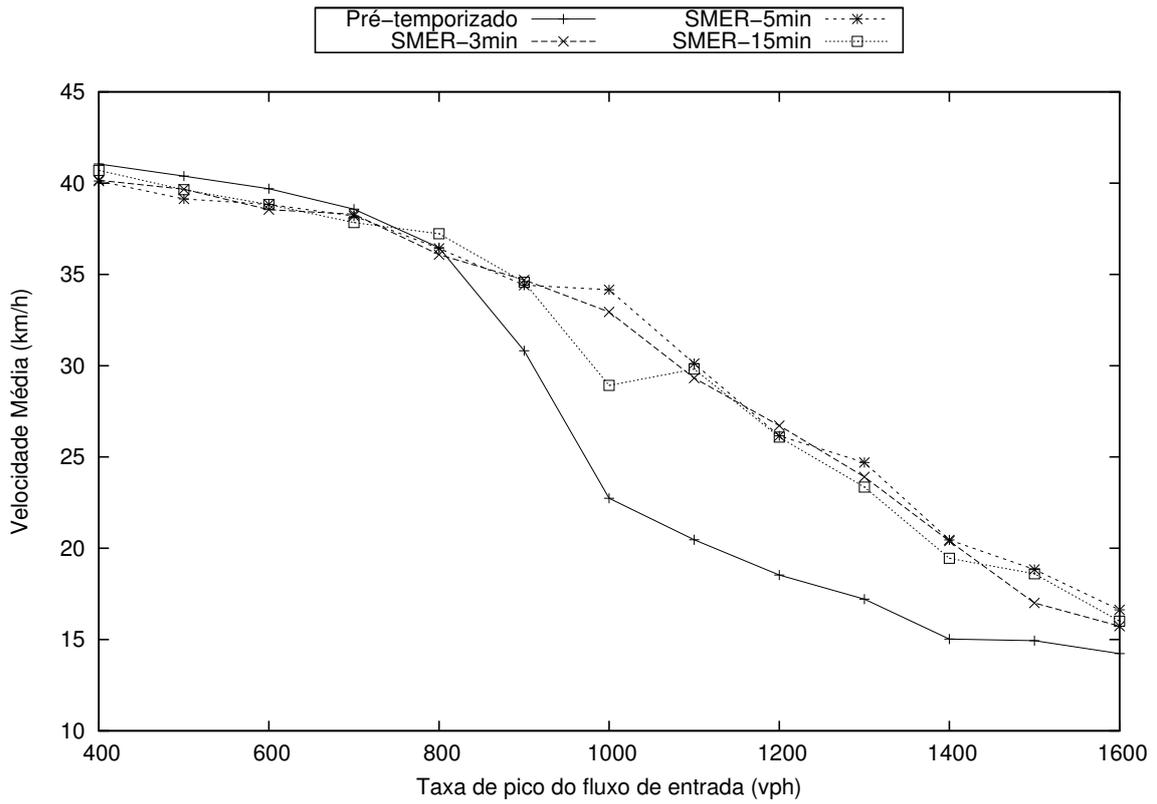


Figura A.9: Velocidade média para o cenário da tabela 6.2

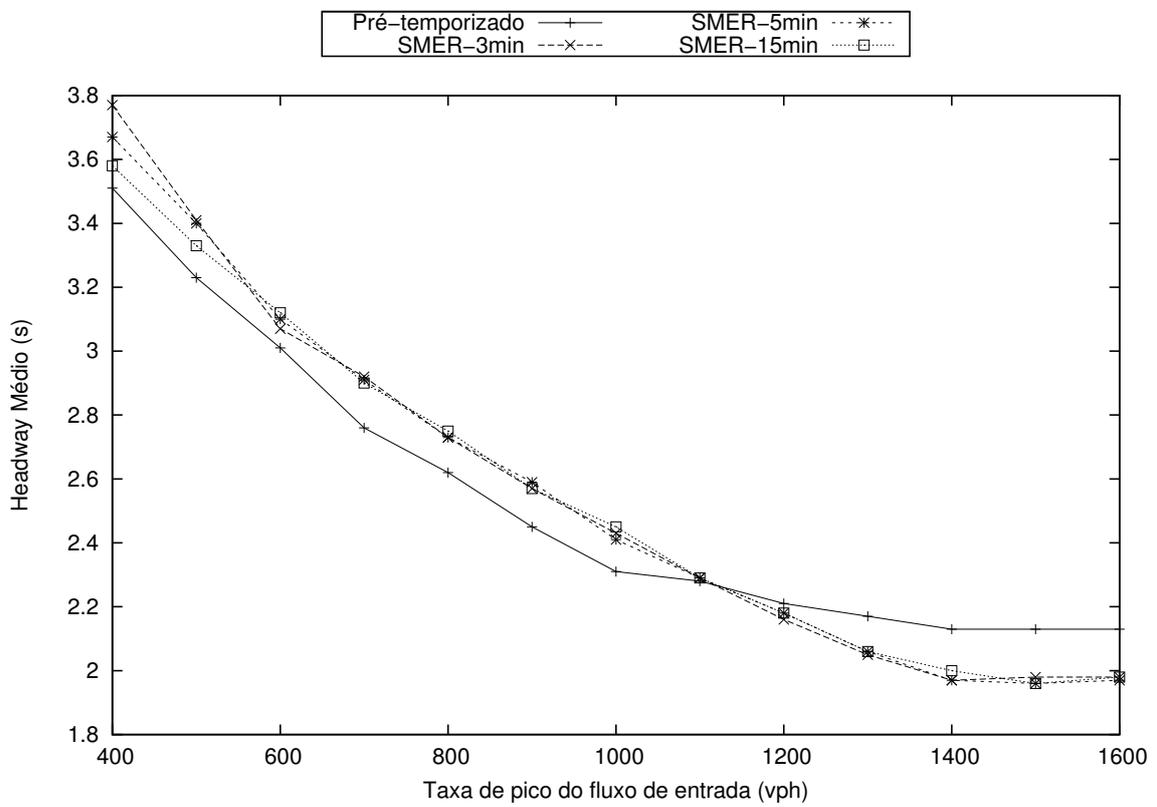


Figura A.10: Headway para o cenário da tabela 6.2

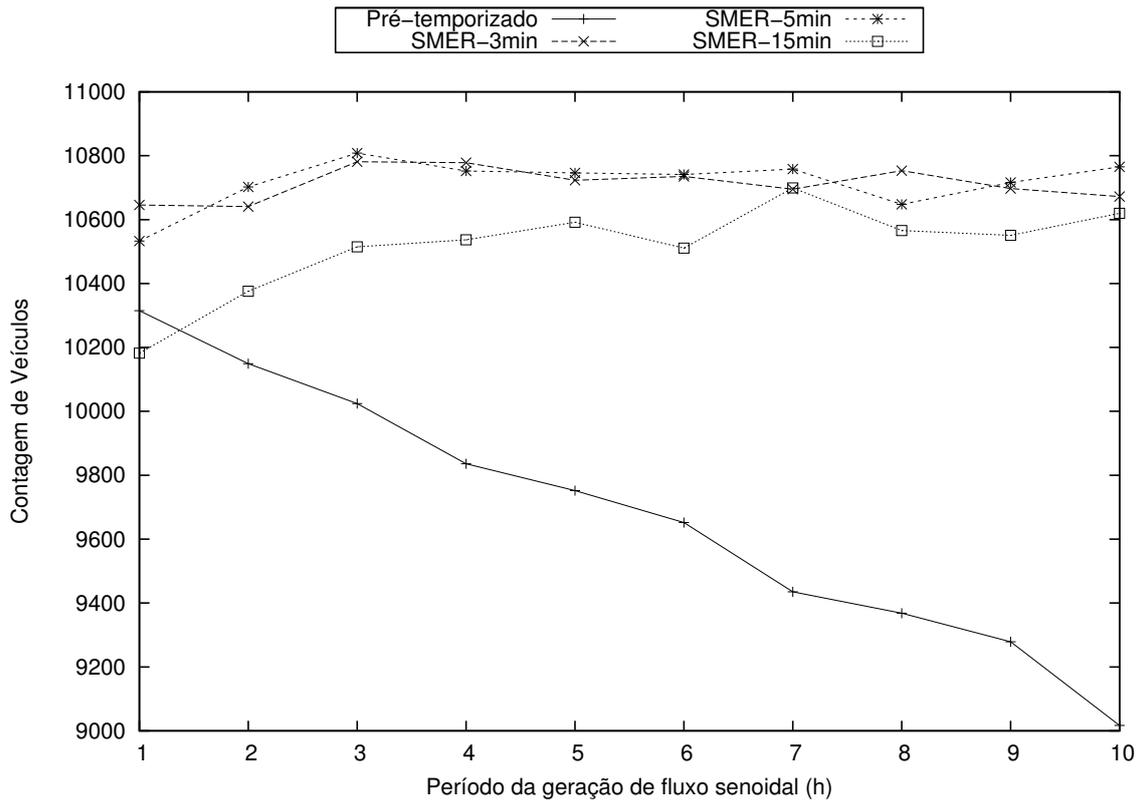


Figura A.11: Contagem de veículos para o cenário da tabela 6.3

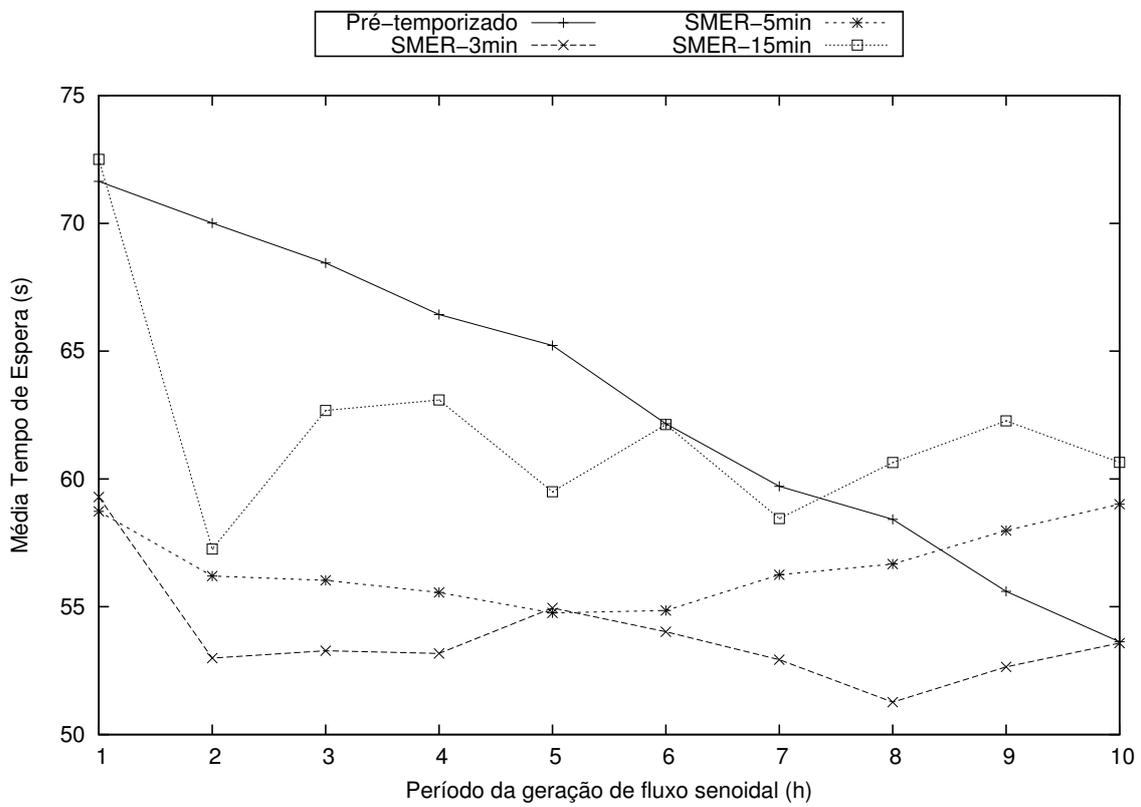


Figura A.12: Tempo médio de espera para o cenário da tabela 6.3

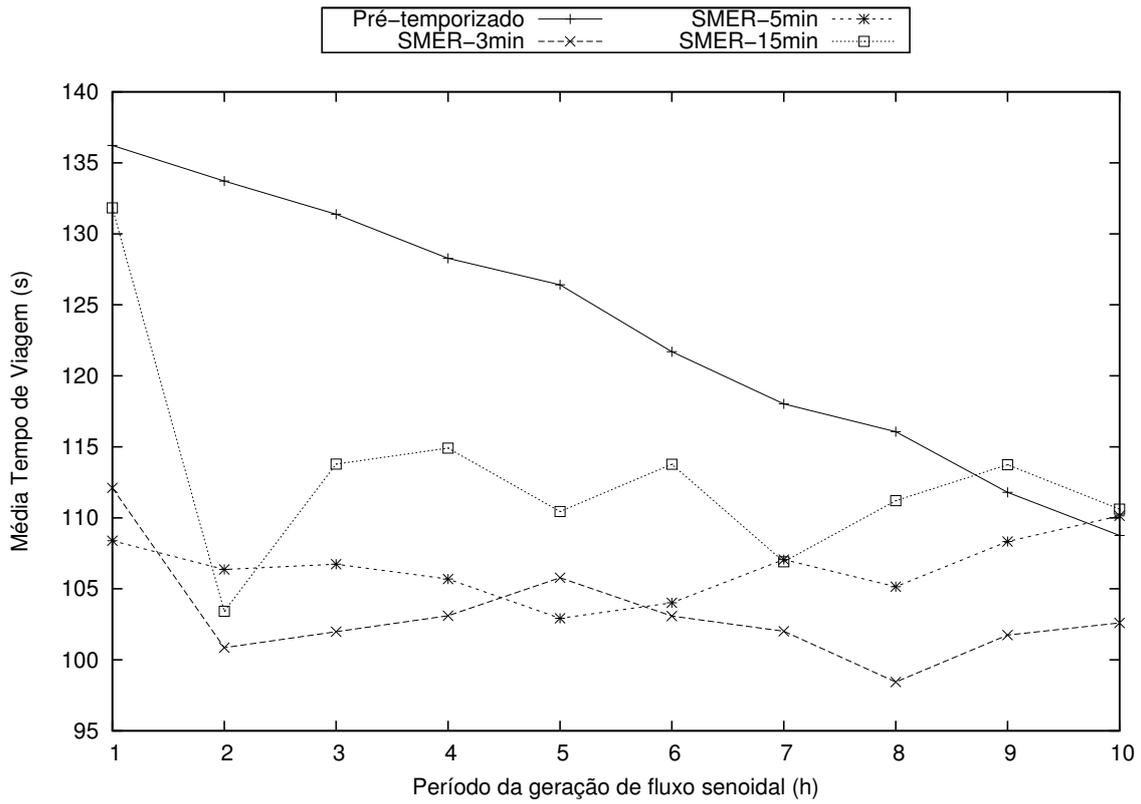


Figura A.13: Tempo médio de viagem para o cenário da tabela 6.3

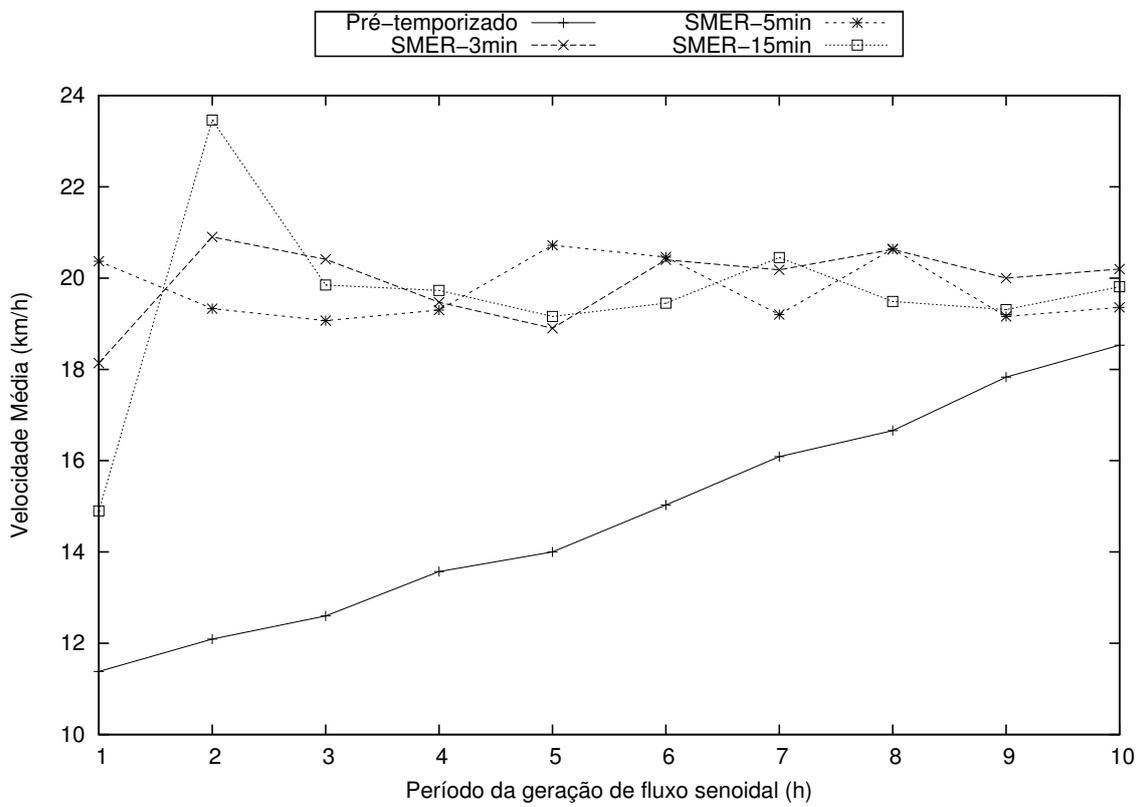


Figura A.14: Velocidade média para o cenário da tabela 6.3

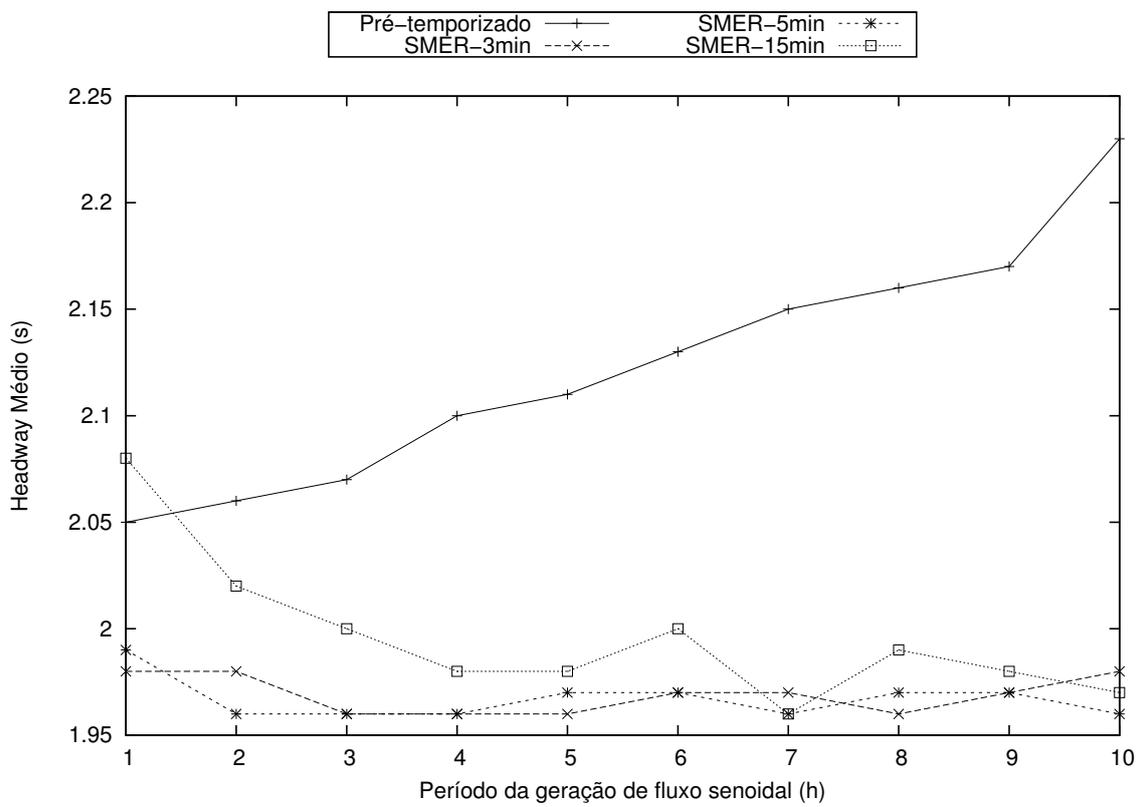


Figura A.15: *Headway* para o cenário da tabela 6.3

# Apêndice B

## Resultados das Simulações - Dois Corredores

Este apêndice contém os resultados da simulação para o cenário de teste do Coordenador SMER intitulado “Dois Corredores”.

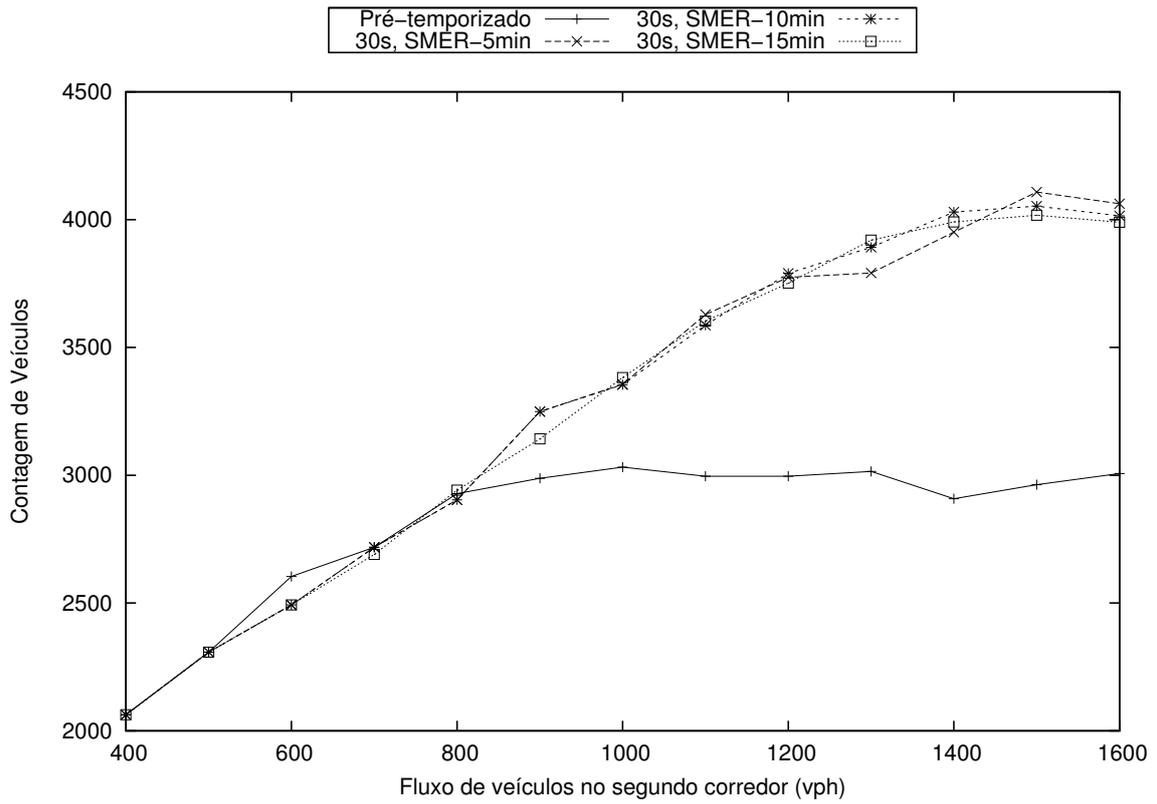


Figura B.1: Contagem de veículos para o cenário da tabela 6.4

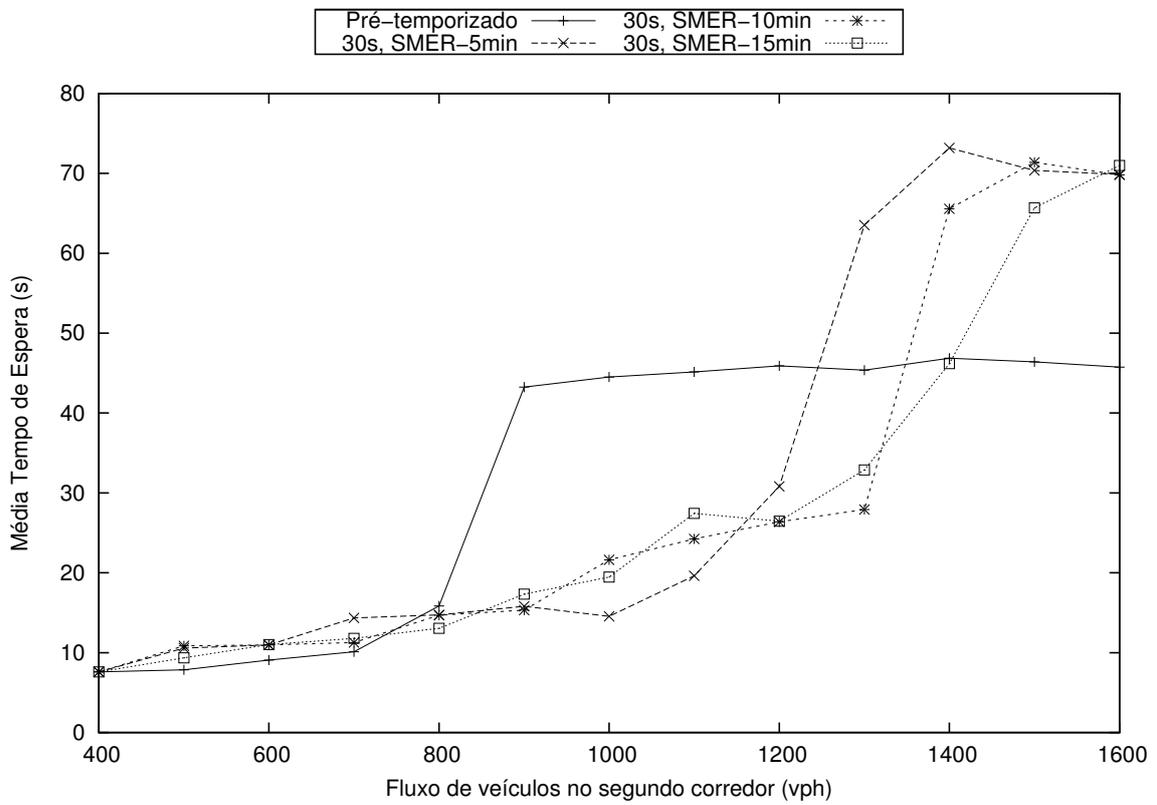


Figura B.2: Tempo médio de espera para o cenário da tabela 6.4

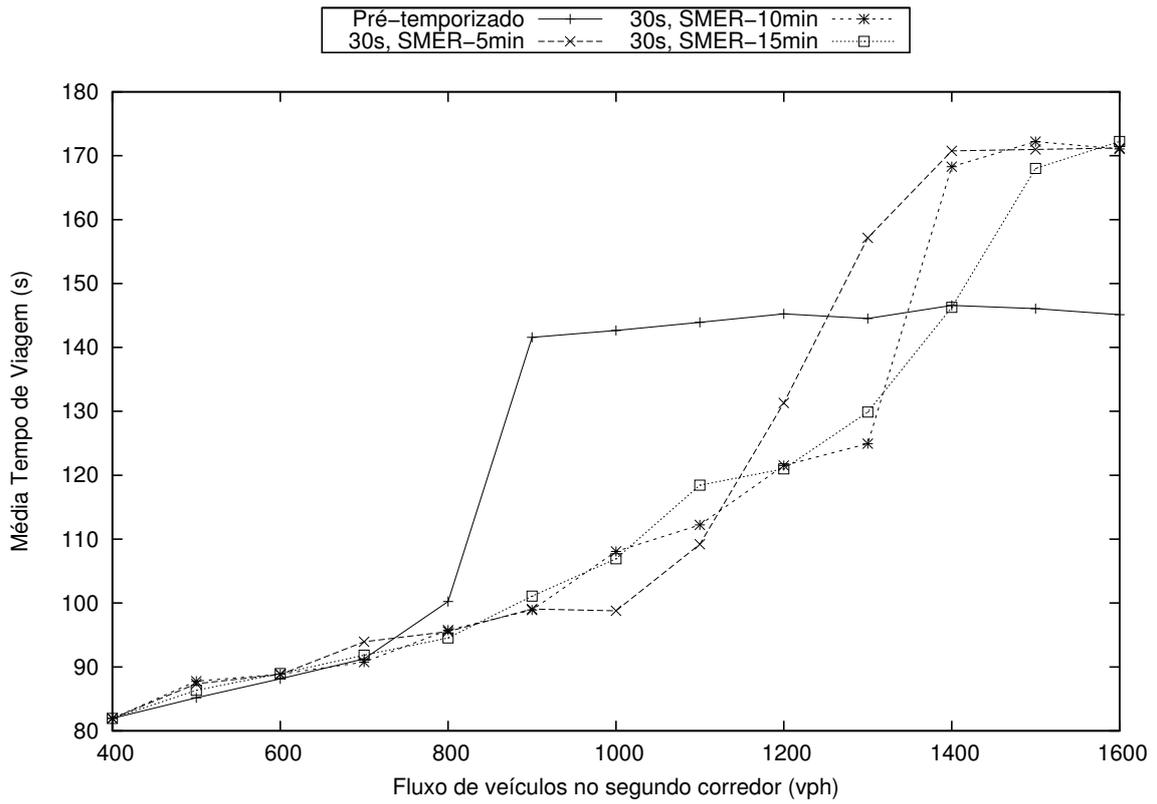


Figura B.3: Tempo médio de viagem para o cenário da tabela 6.4

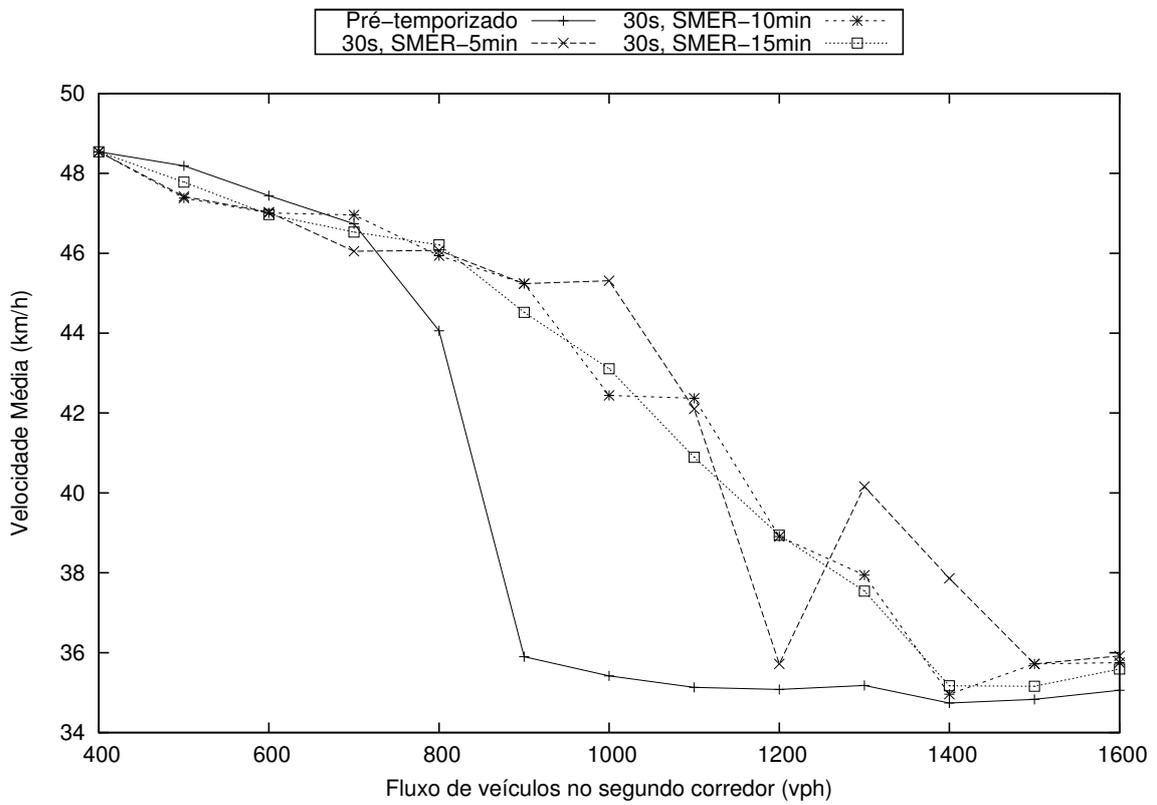


Figura B.4: Velocidade média para o cenário da tabela 6.4

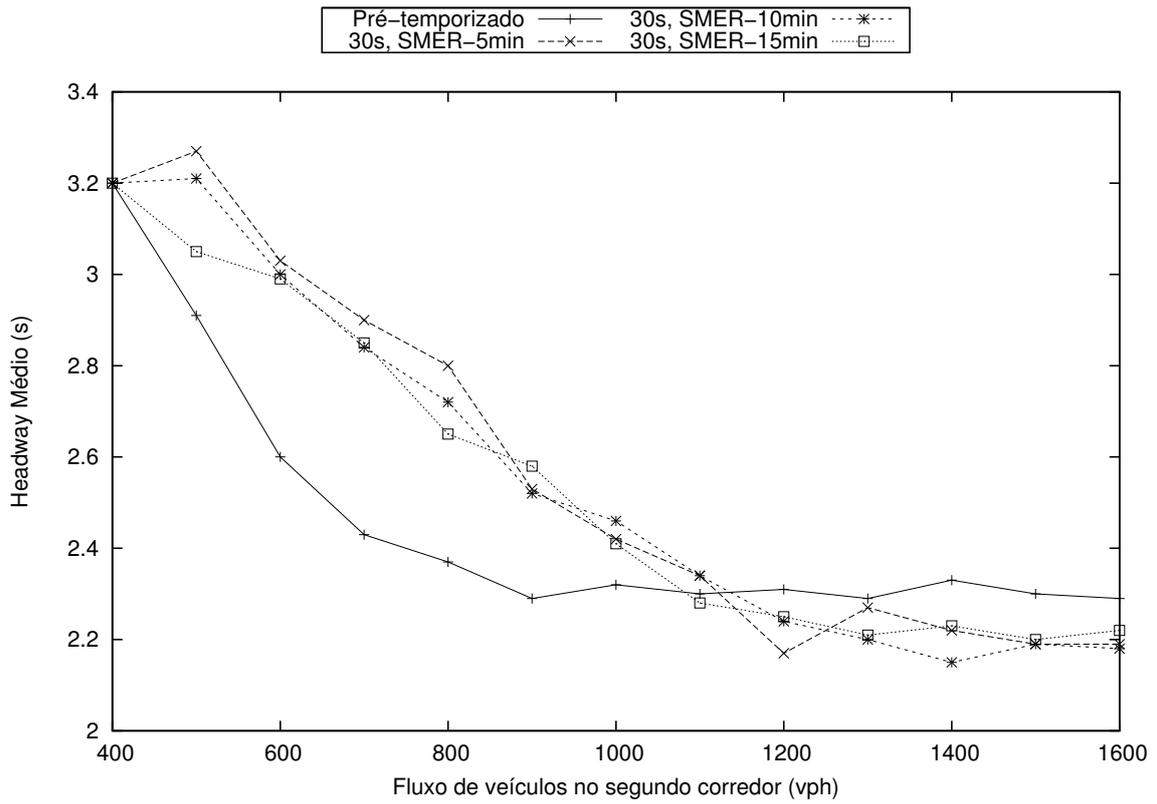


Figura B.5: Headway para o cenário da tabela 6.4

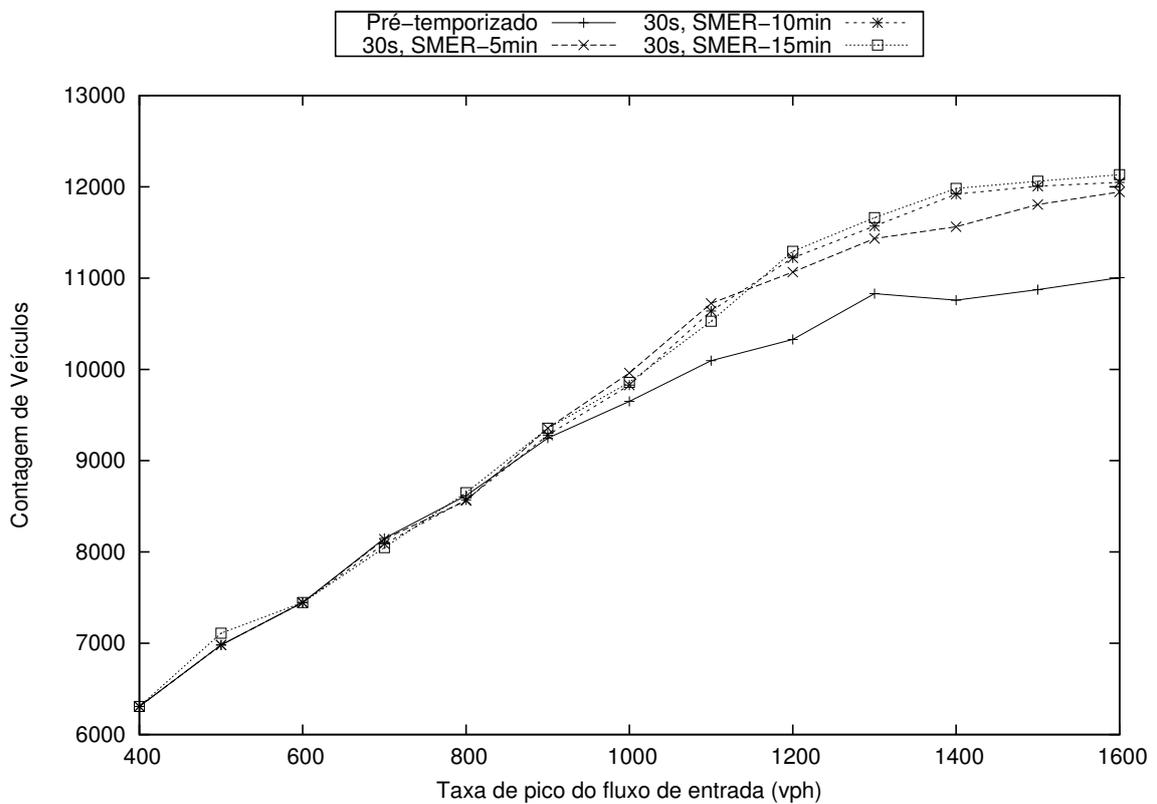


Figura B.6: Contagem de veículos para o cenário da tabela 6.5

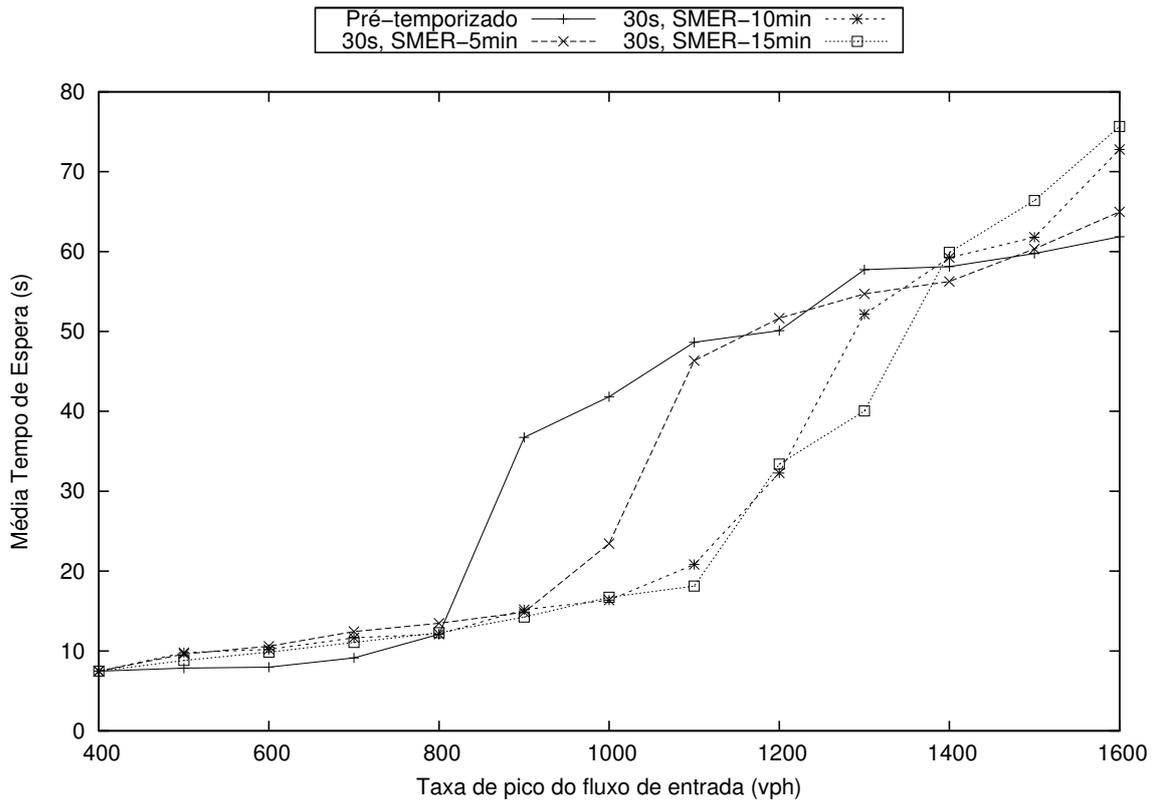


Figura B.7: Tempo médio de espera para o cenário da tabela 6.5

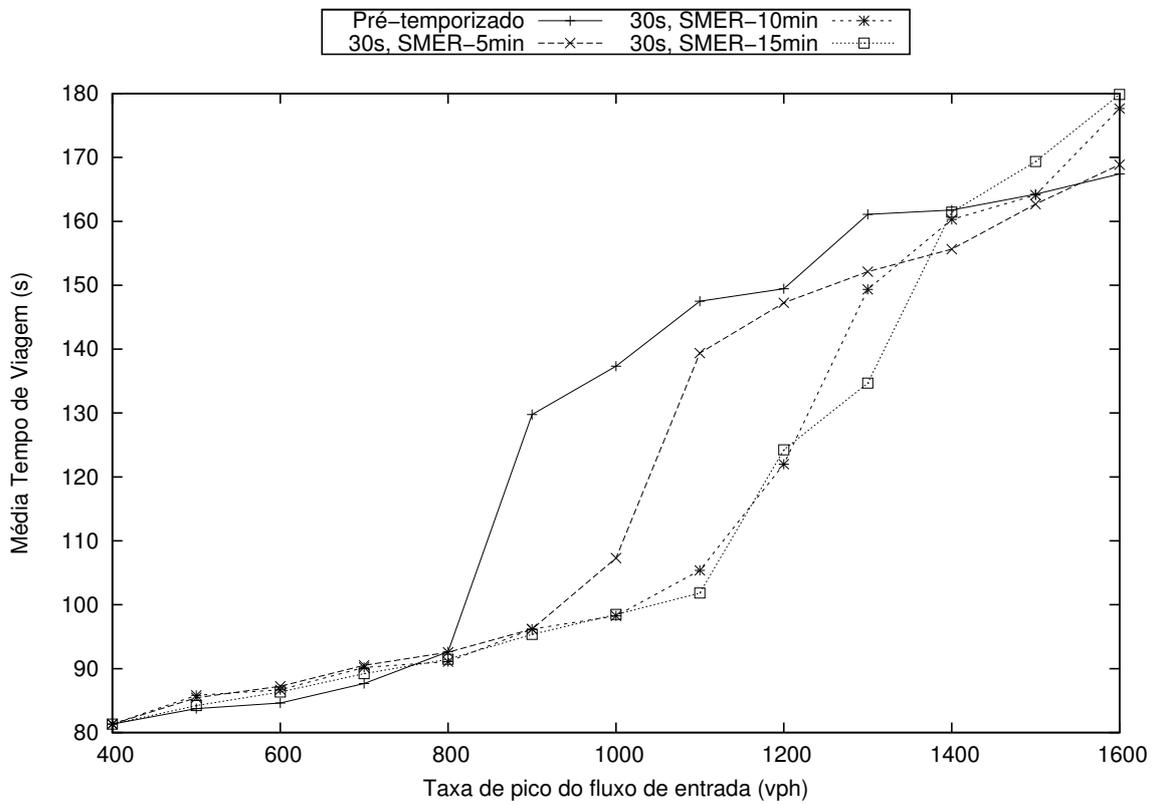


Figura B.8: Tempo médio de viagem para o cenário da tabela 6.5

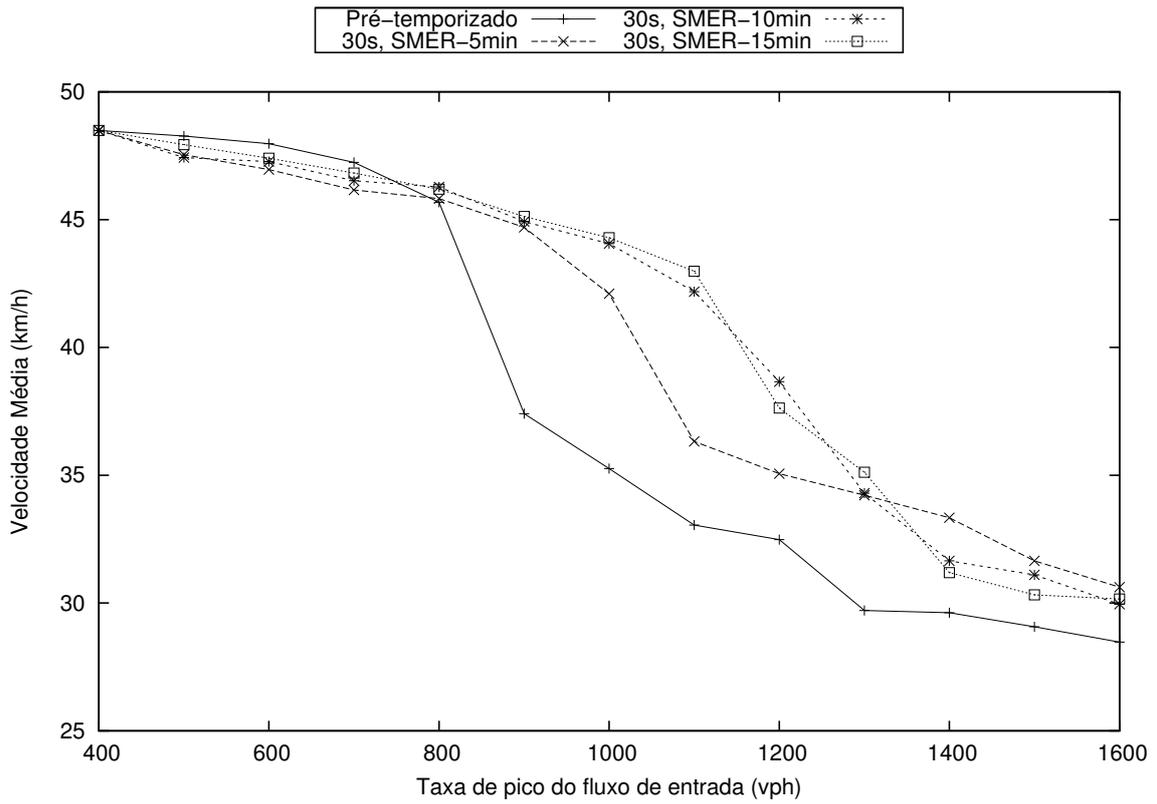


Figura B.9: Velocidade média para o cenário da tabela 6.5

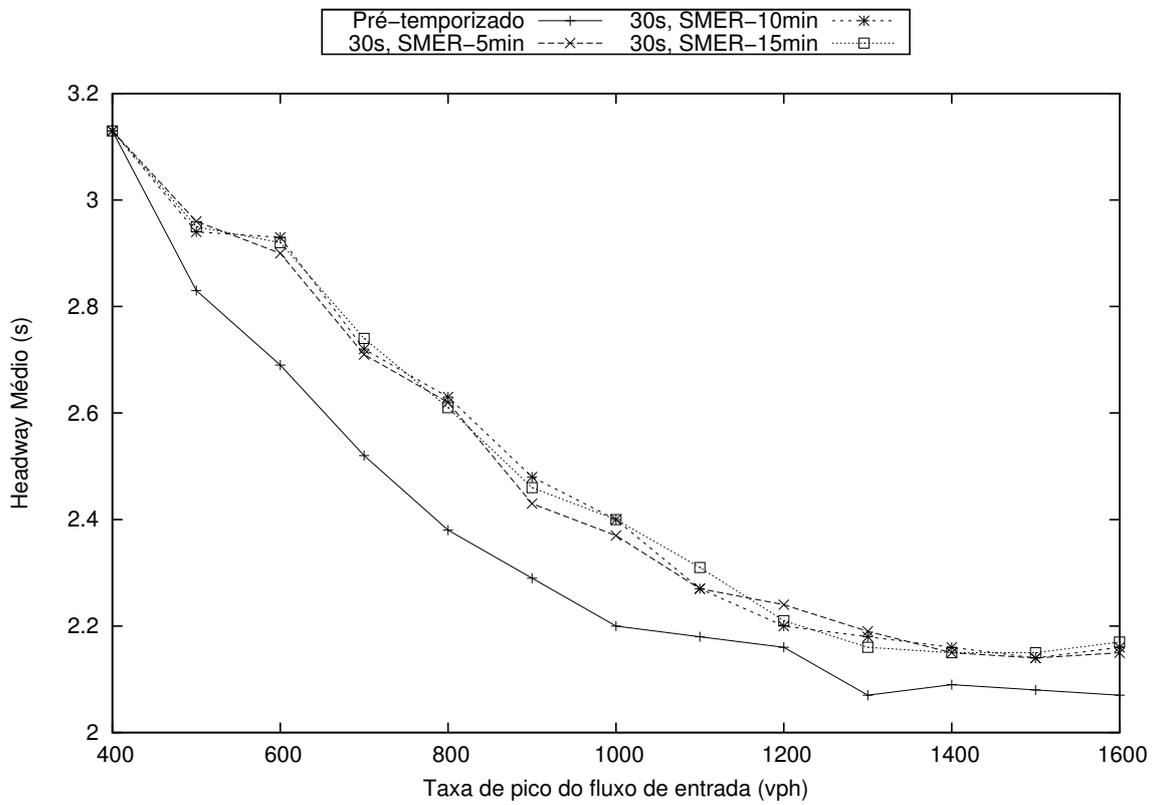


Figura B.10: Headway para o cenário da tabela 6.5

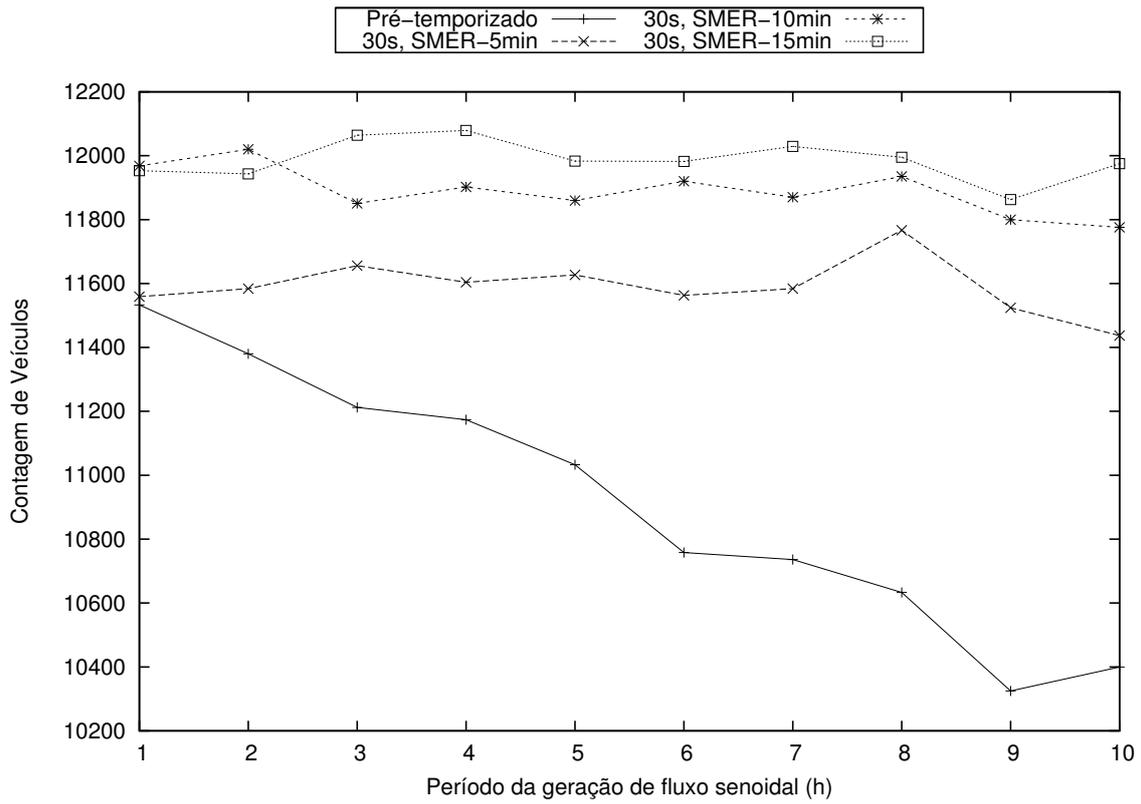


Figura B.11: Contagem de veículos para o cenário da tabela 6.6

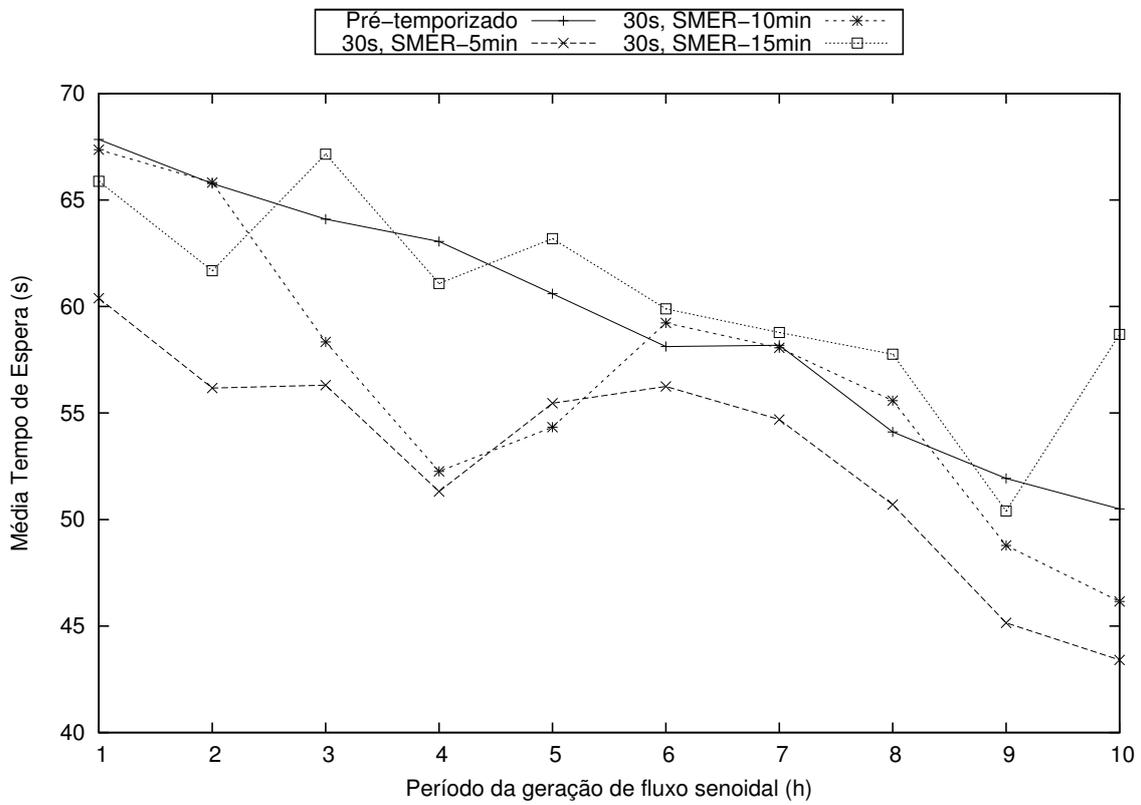


Figura B.12: Tempo médio de espera para o cenário da tabela 6.6

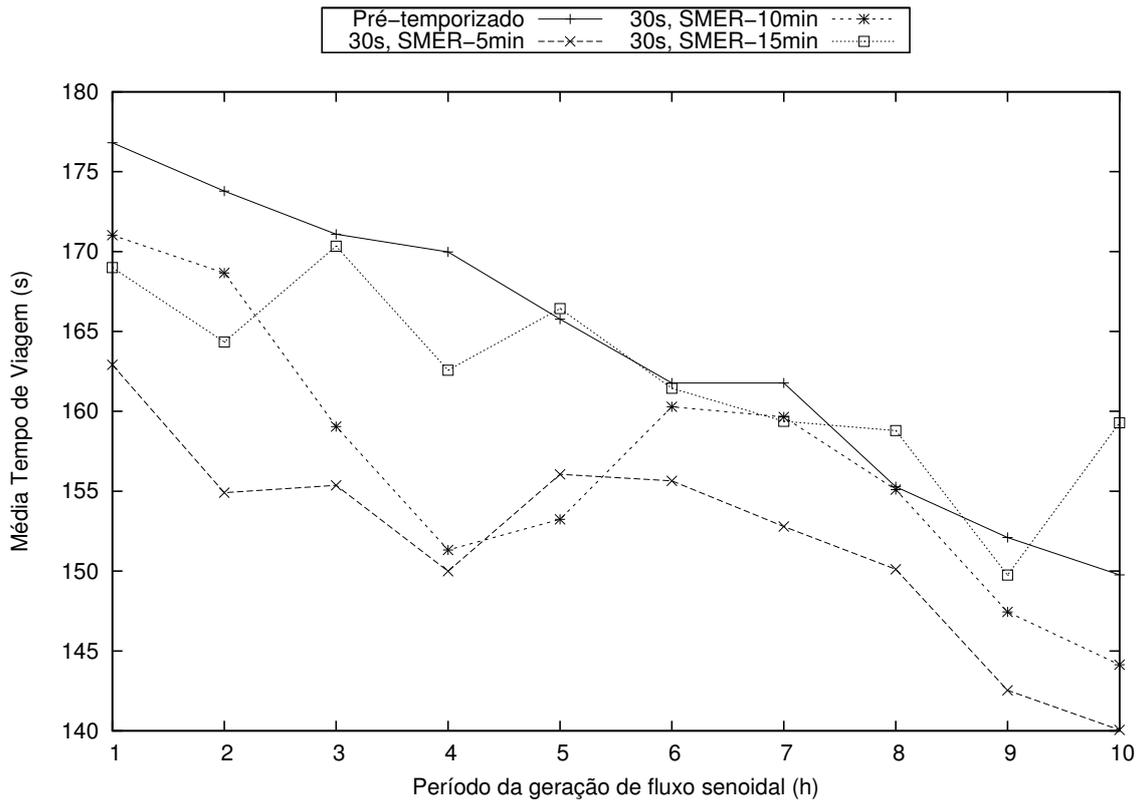


Figura B.13: Tempo médio de viagem para o cenário da tabela 6.6

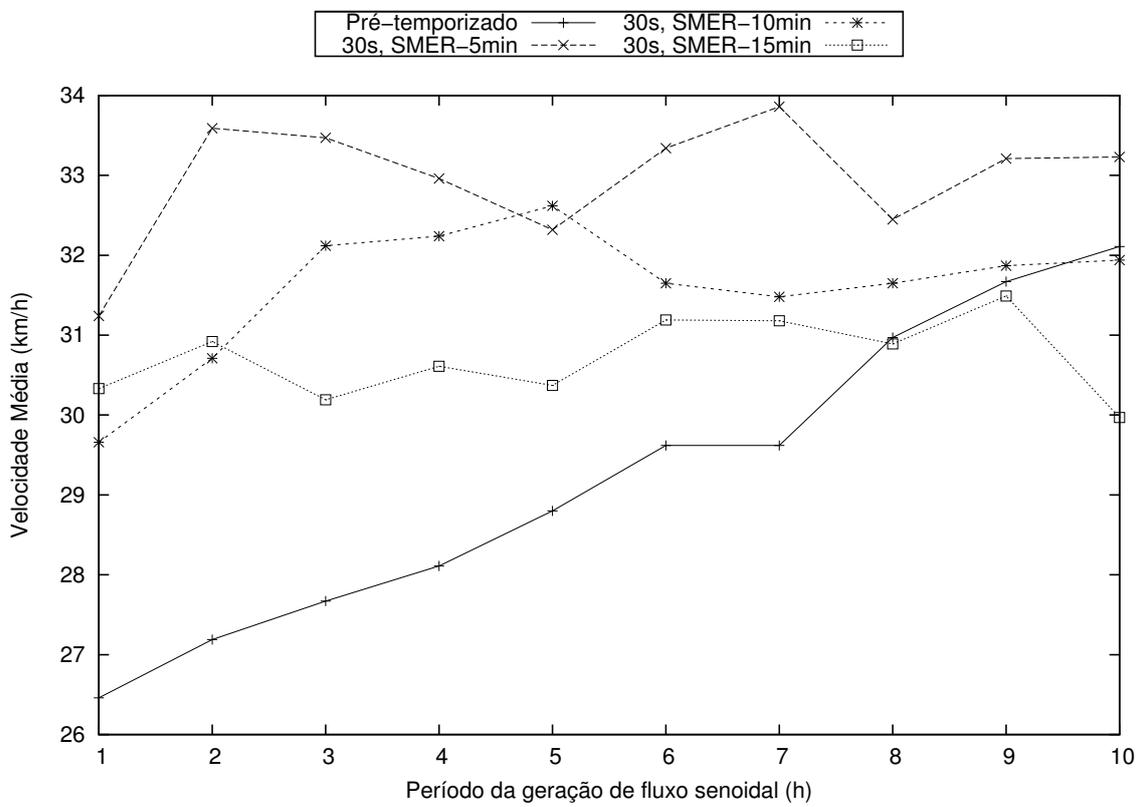


Figura B.14: Velocidade média para o cenário da tabela 6.6

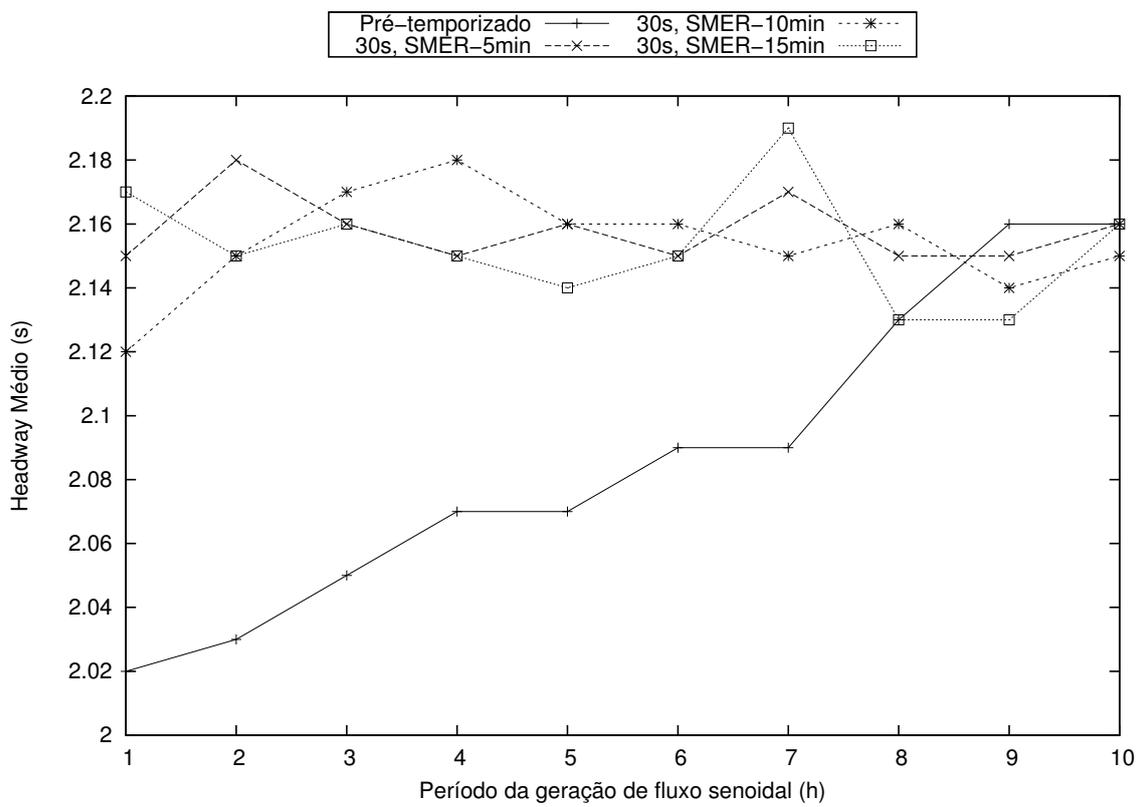


Figura B.15: *Headway* para o cenário da tabela 6.6

# Apêndice C

## Resultados das Simulações - Grade Manhattan

Este apêndice contém os resultados da simulação para o cenário de teste do Coordenador SMER intitulado “Grade Manhattan”.

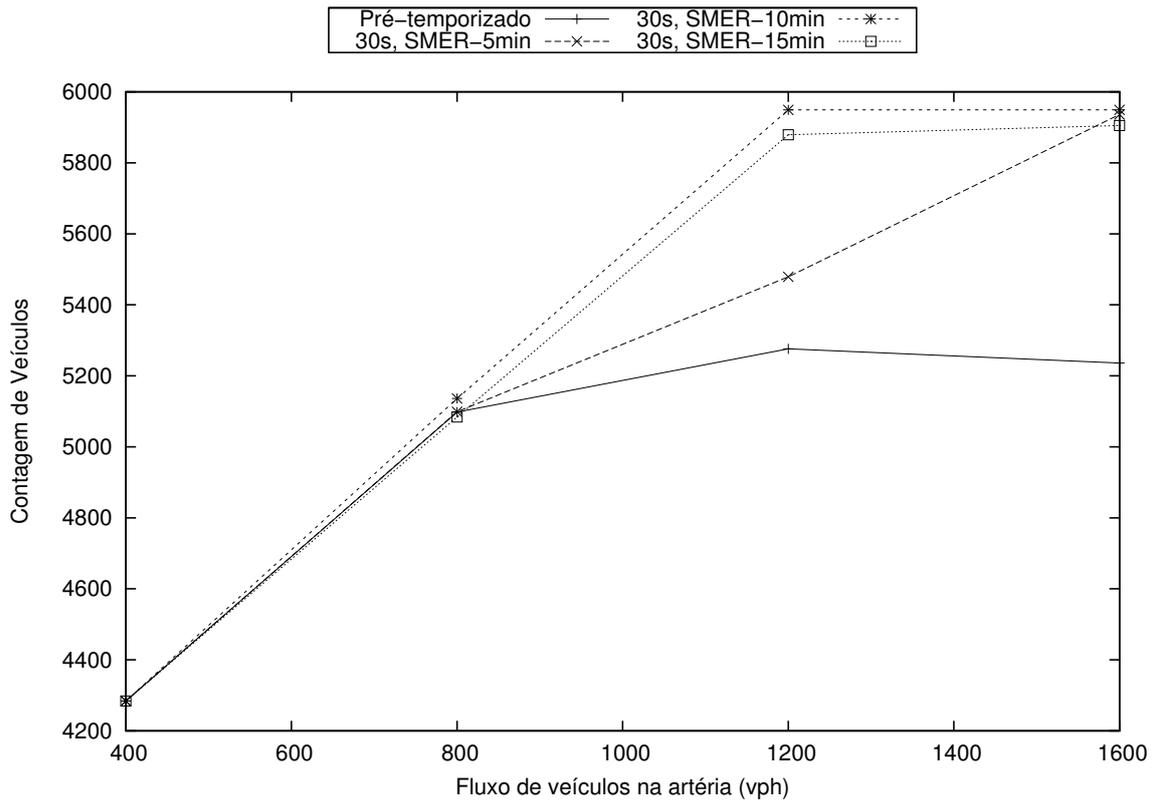


Figura C.1: Contagem de veículos para o cenário da tabela 6.7

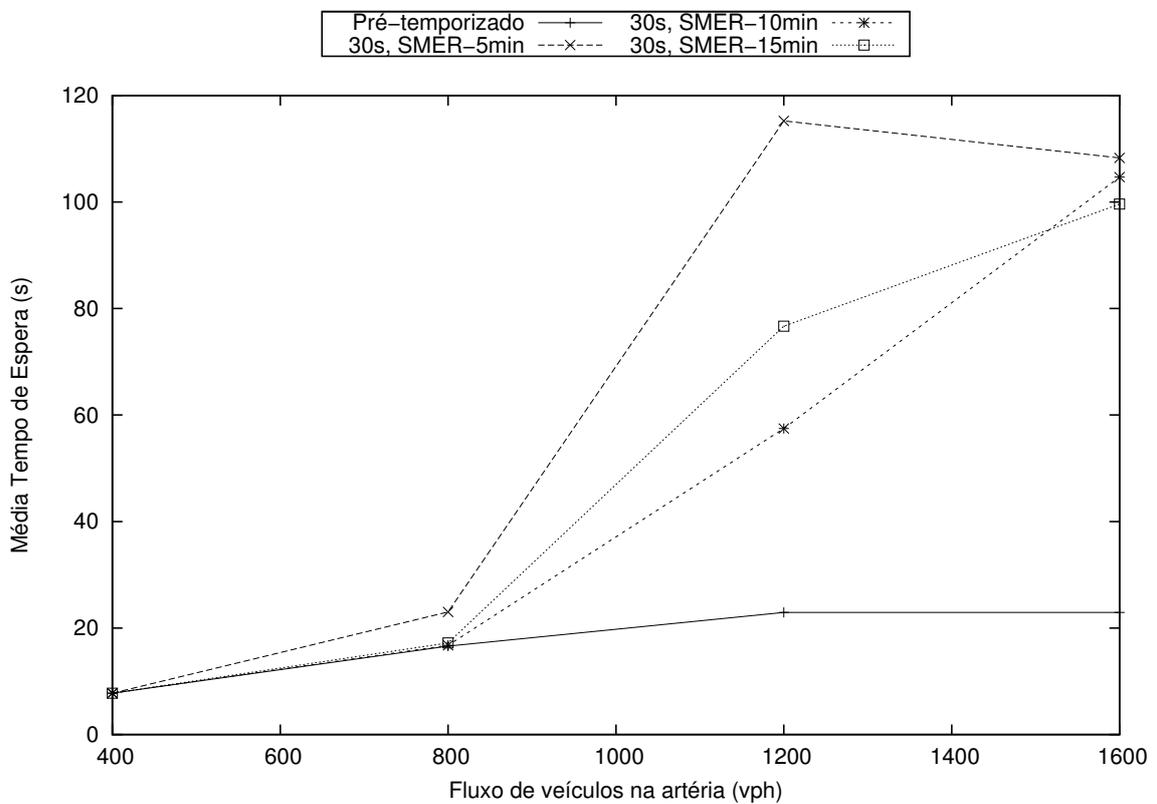


Figura C.2: Tempo médio de espera para o cenário da tabela 6.7

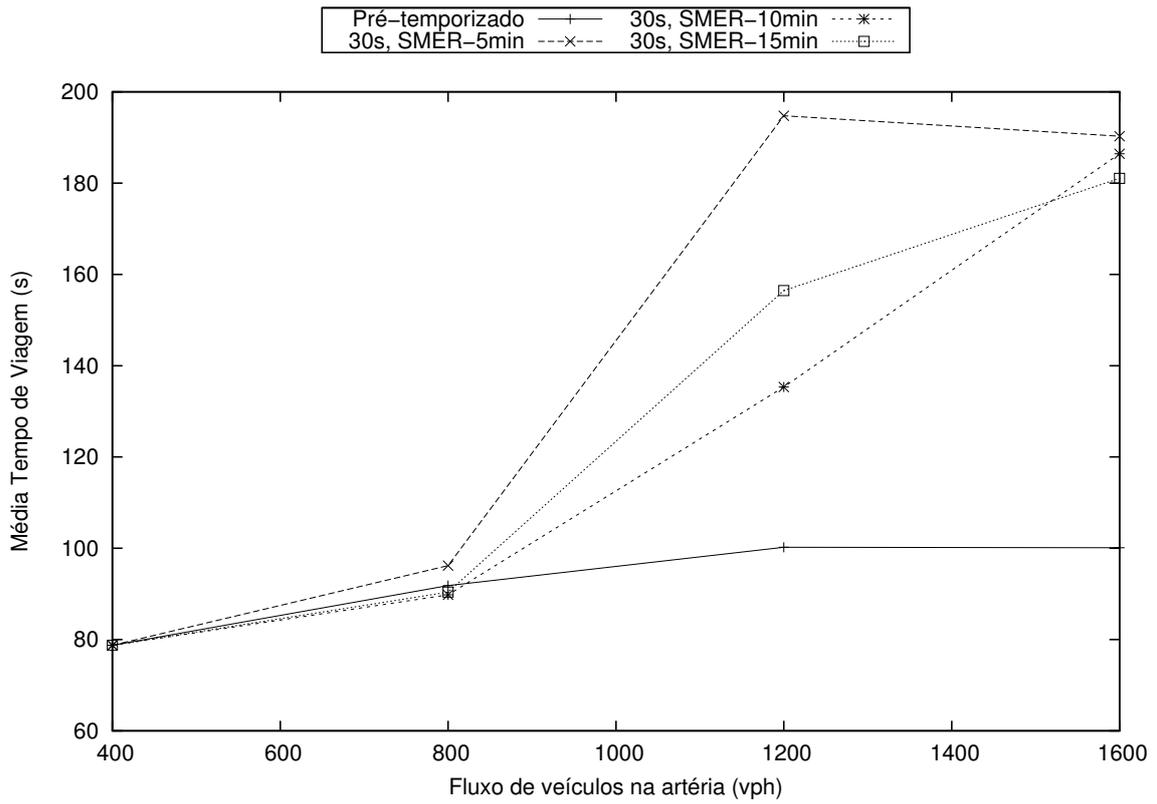


Figura C.3: Tempo médio de viagem para o cenário da tabela 6.7

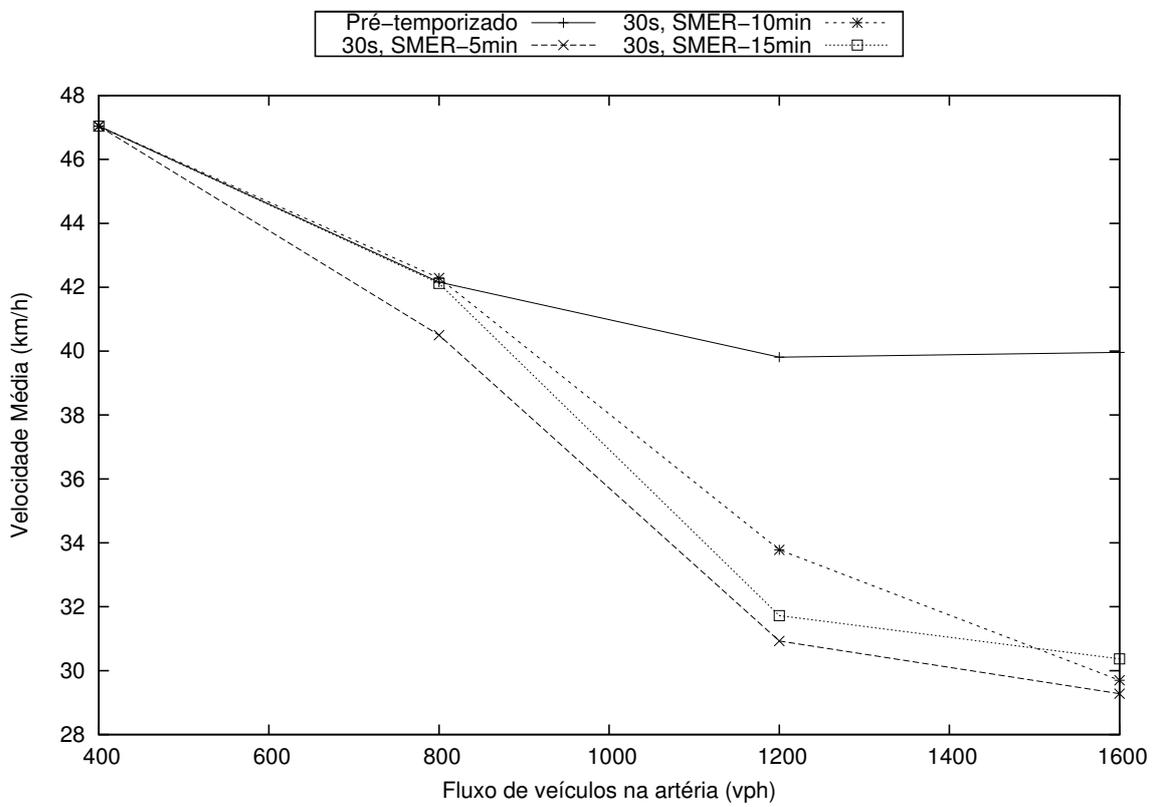


Figura C.4: Velocidade média para o cenário da tabela 6.7

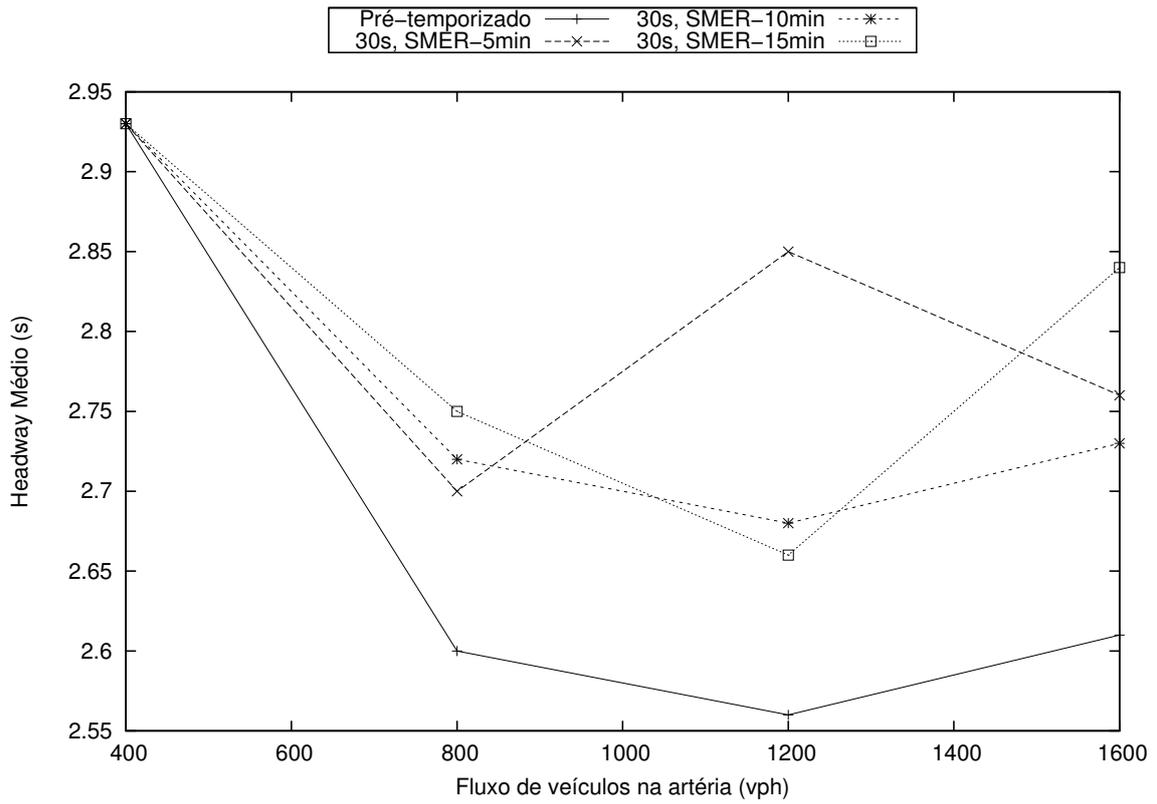


Figura C.5: Headway para o cenário da tabela 6.7

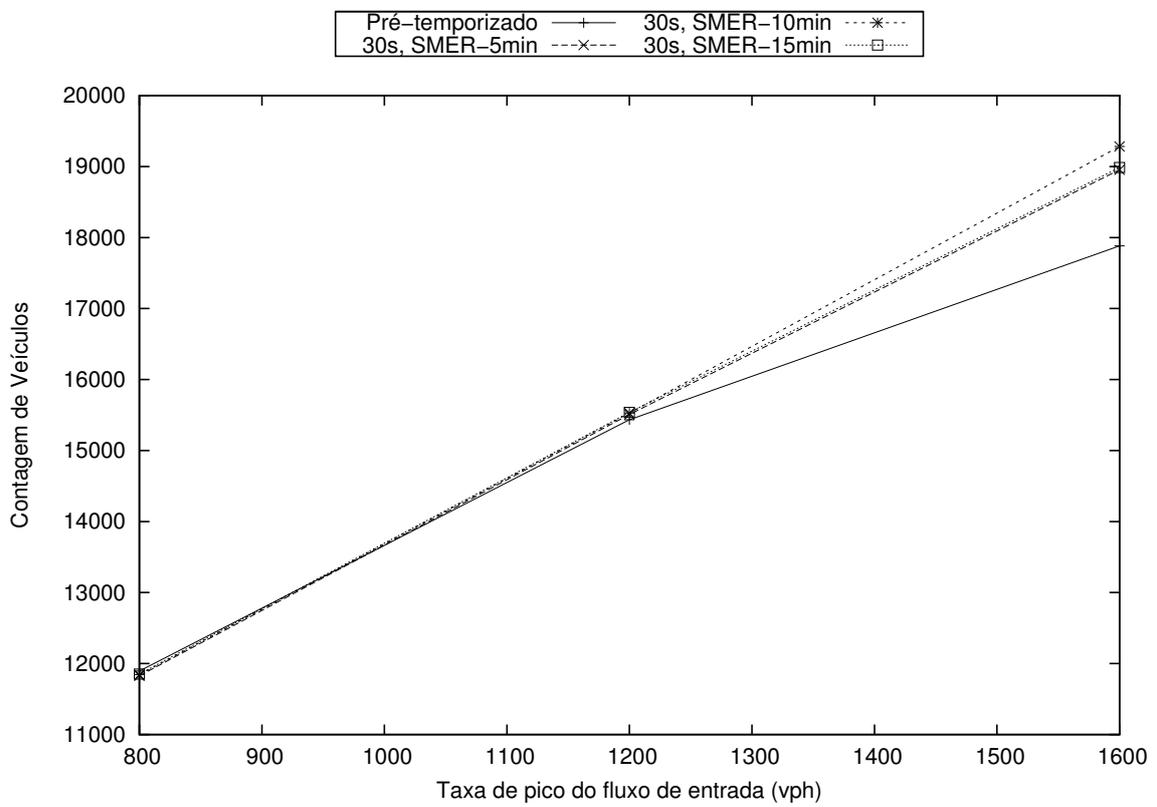


Figura C.6: Contagem de veículos para o cenário da tabela 6.8

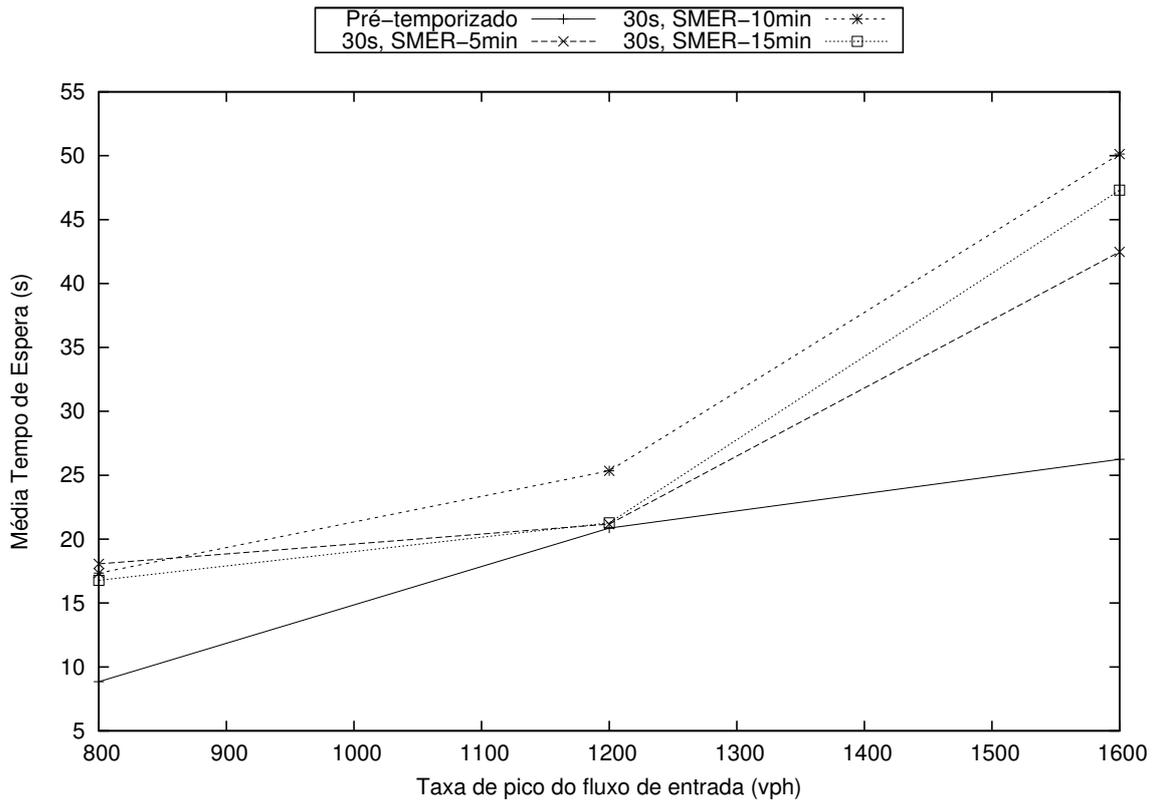


Figura C.7: Tempo médio de espera para o cenário da tabela 6.8

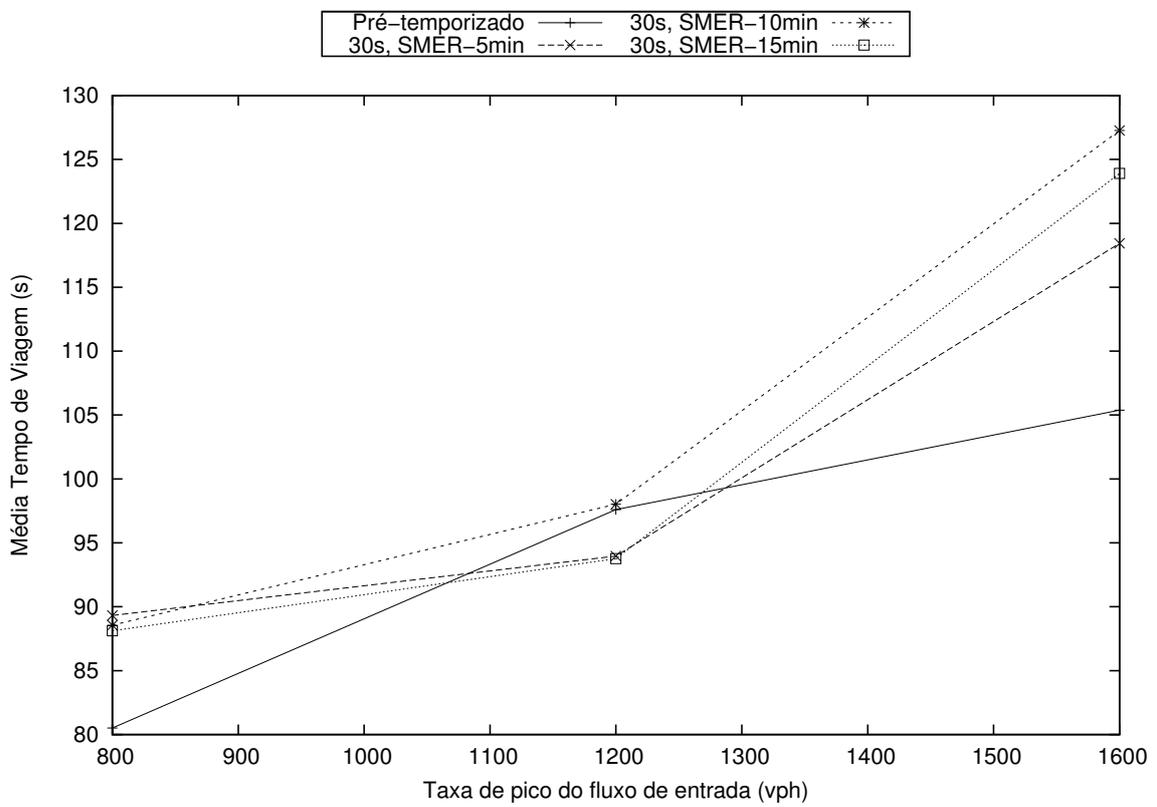


Figura C.8: Tempo médio de viagem para o cenário da tabela 6.8

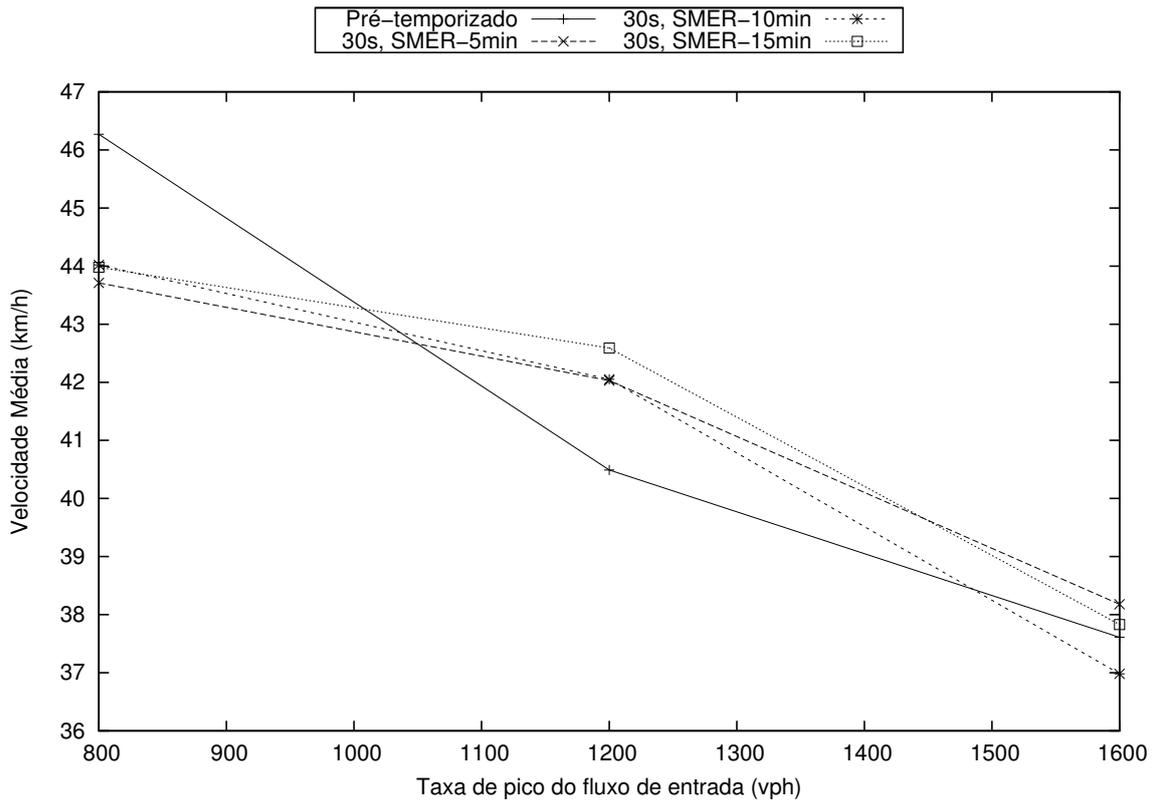


Figura C.9: Velocidade média para o cenário da tabela 6.8

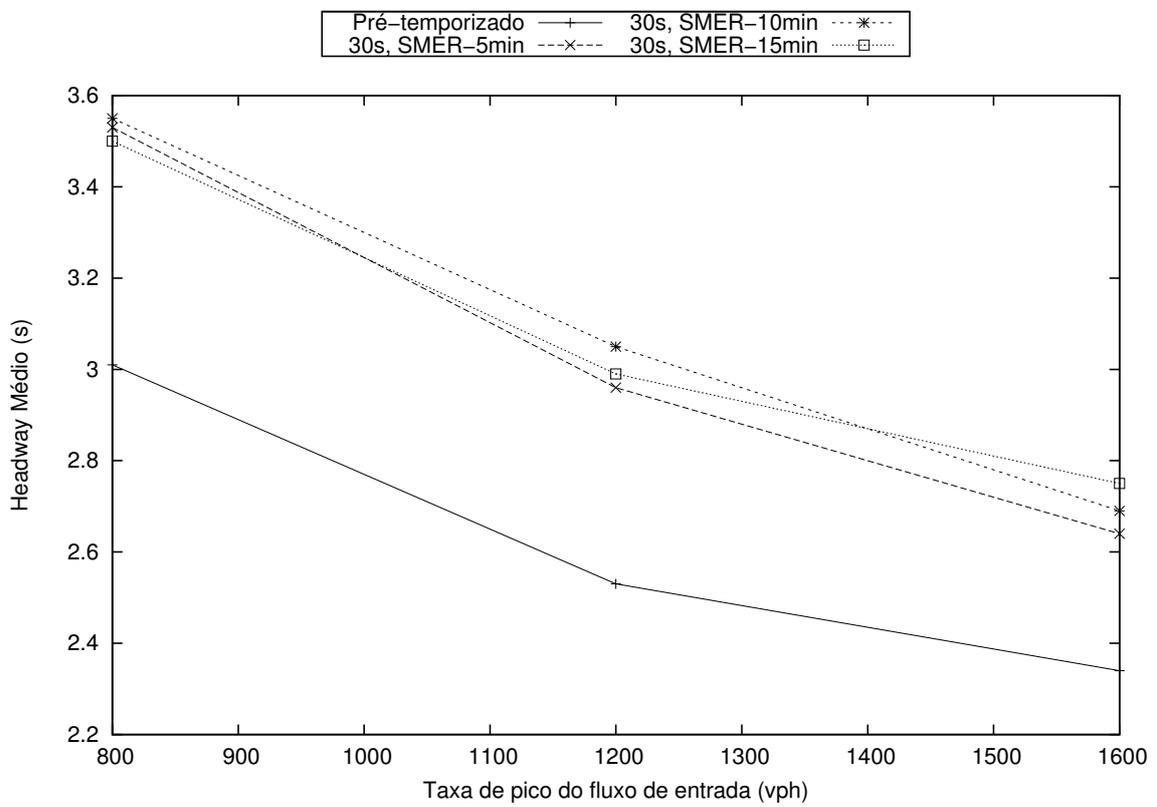


Figura C.10: *Headway* para o cenário da tabela 6.8

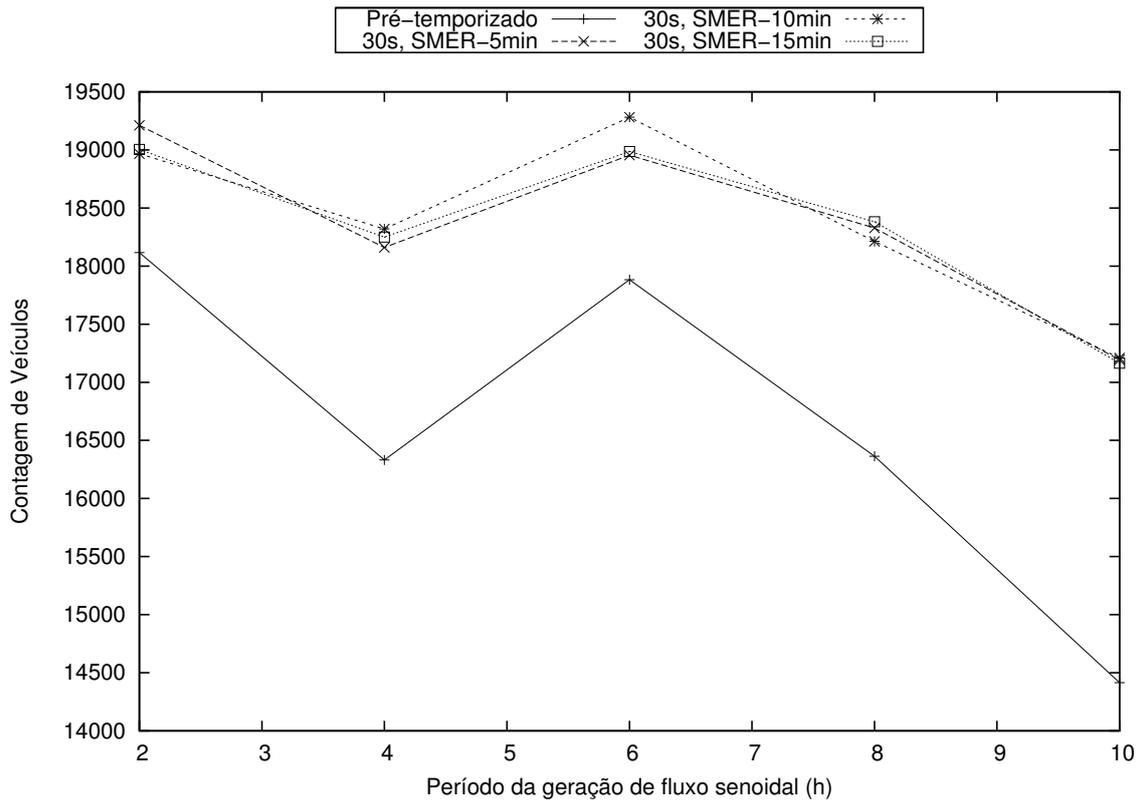


Figura C.11: Contagem de veículos para o cenário da tabela 6.9

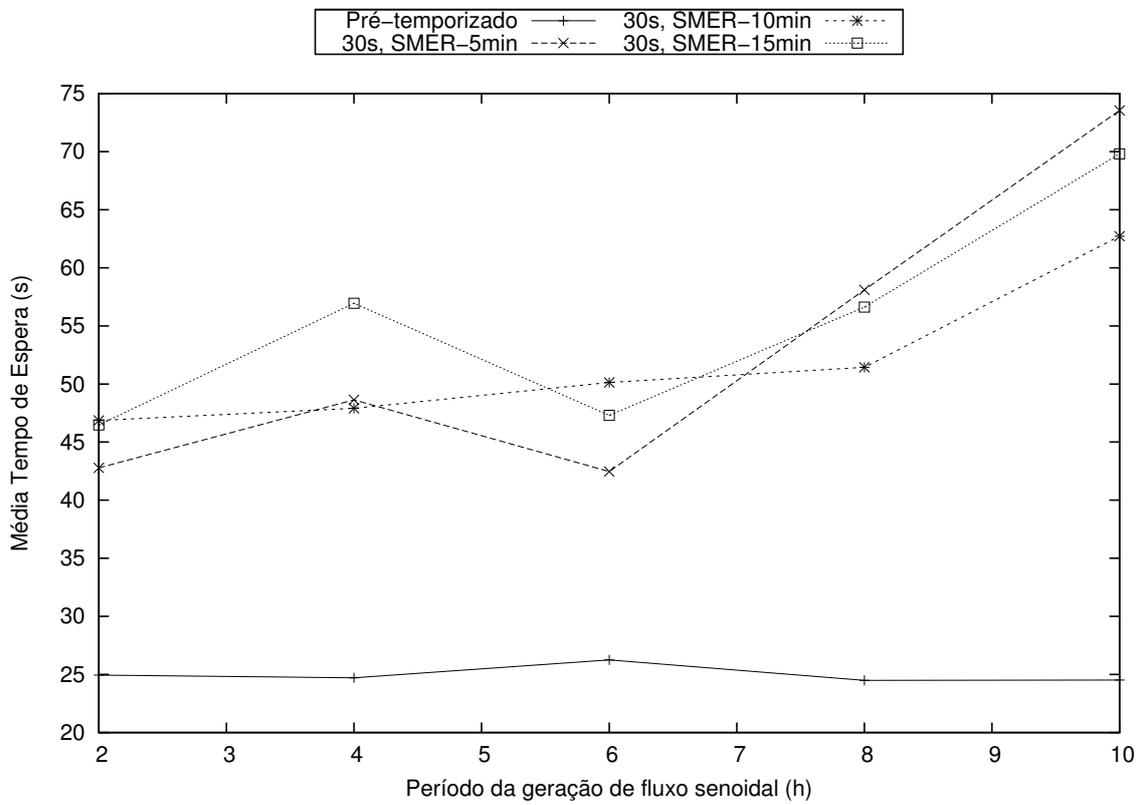


Figura C.12: Tempo médio de espera para o cenário da tabela 6.9

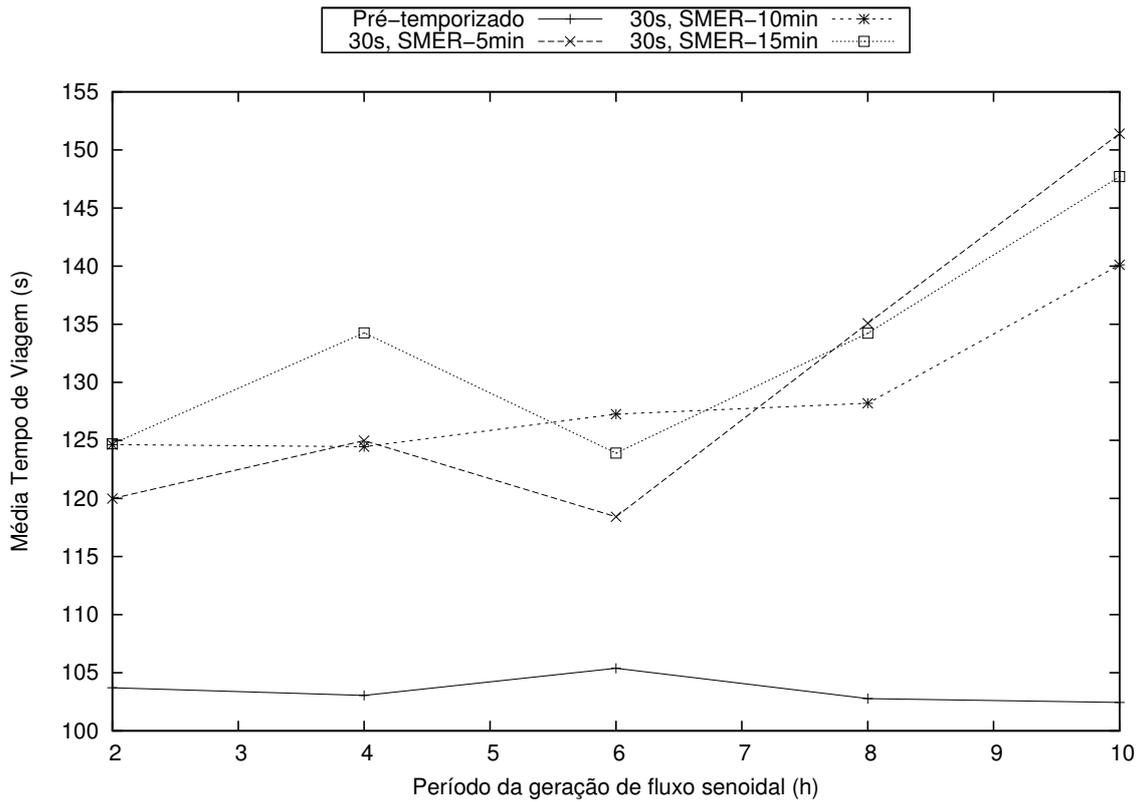


Figura C.13: Tempo médio de viagem para o cenário da tabela 6.9

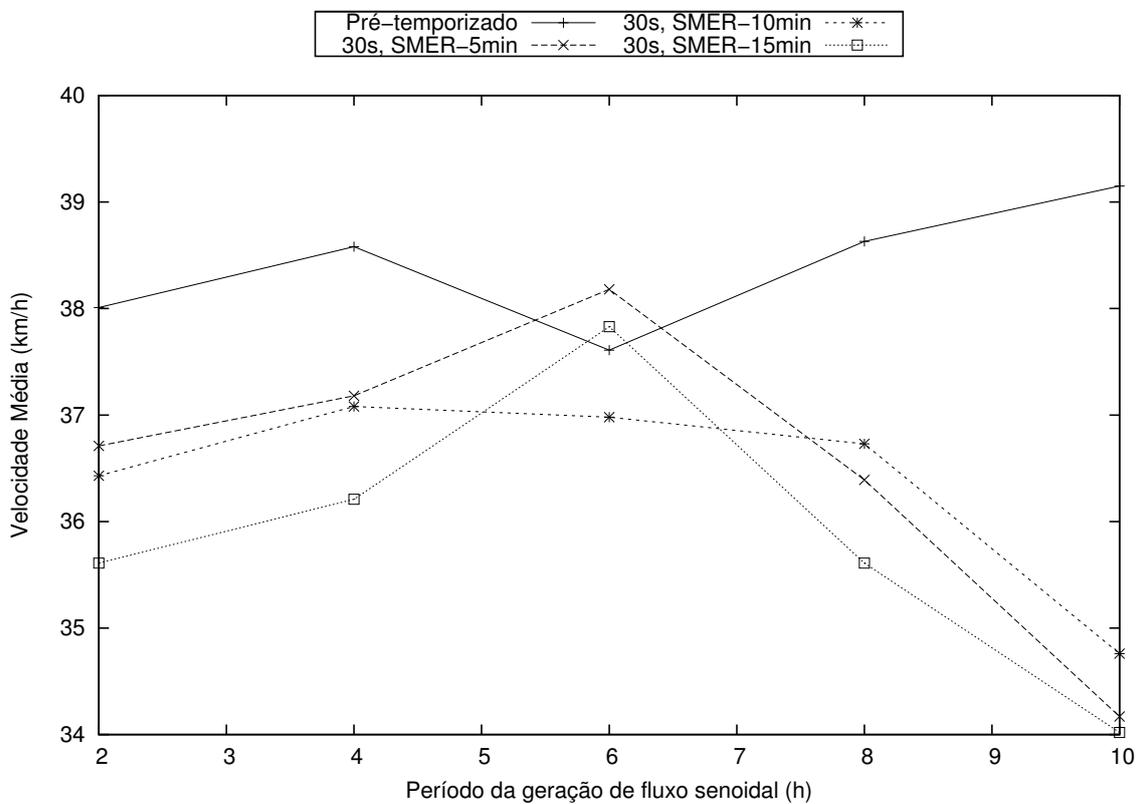


Figura C.14: Velocidade média para o cenário da tabela 6.9

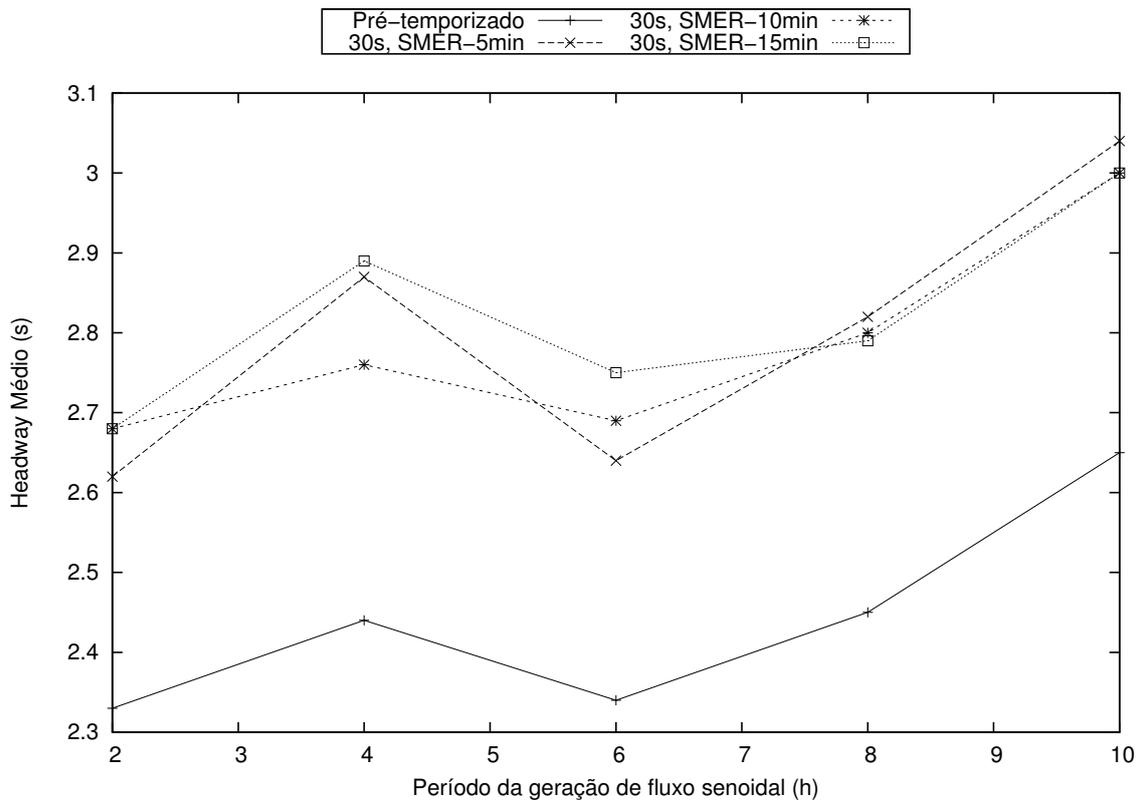


Figura C.15: *Headway* para o cenário da tabela 6.9