

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE INFORMÁTICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM COMPUTAÇÃO

MAICON DE BRITO DO AMARANTE

**Uma abordagem baseada em agentes para
avaliação do balanceamento de carga em
redes veiculares: dois estudos de caso**

Dissertação apresentada como requisito parcial
para a obtenção do grau de
Mestre em Ciência da Computação

Prof. Dr. Ana L. C. Bazzan
Orientador

Porto Alegre, abril de 2012

CIP – CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO

Amarante, Maicon de Brito do

Uma abordagem baseada em agentes para avaliação do balanceamento de carga em redes veiculares: dois estudos de caso / Maicon de Brito do Amarante. – Porto Alegre: PPGC da UFRGS, 2012.

87 f.: il.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Programa de Pós-Graduação em Computação, Porto Alegre, BR–RS, 2012. Orientador: Ana L. C. Bazzan.

1. Modelagem e simulação baseada em agentes. 2. Tráfego veicular. 3. Balanceamento de carga. I. Bazzan, Ana L. C.. II. Título.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Reitor: Prof. Carlos Alexandre Netto

Vice-Reitor: Prof. Rui Vicente Oppermann

Pró-Reitor de Pós-Graduação: Prof. Aldo Bolten Lucion

Diretor do Instituto de Informática: Prof. Luís da Cunha Lamb

Coordenador do PPGC: Prof. Álvaro Freitas Moreira

Bibliotecária-chefe do Instituto de Informática: Beatriz Regina Bastos Haro

*“Nascer, morrer, renascer ainda,
progredir sem cessar, tal é a lei.”*

— ALLAN KARDEC.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por me oportunizar uma vida cheia de desafios, descobertas e conquistas. Ao CNPq que proveu minha bolsa de mestrado, dando a imprescindível sustentação financeira. Aos meus pais, por me mostrarem o caminho e me ensinarem a seguir em frente. A minha irmã, pela sinceridade e companheirismo. A minha esposa, pelos sacrifícios, devotamento e carinho. Aos meus filhos, Francisco e João, por me fortalecerem e inspirarem o melhor dos sentimentos. Aos compadres, Adair e Marcelo, pelo suporte durante minha estada em Porto Alegre. Aos familiares, amigos, colegas e professores, pela atenção e pelos ensinamentos. Aos colegas do IF Farroupilha, pela compreensão e coleguismo nos momentos em que “apertou o sapato”. A minha orientadora, professora Ana Bazzan, pelo maior ensinamento de todos, o seu exemplo. Aos colegas do MASLAB, pelo apoio, amizade e pela salutar troca de experiências. A todos que direta ou indiretamente contribuíram para minha formação pessoal, profissional e acadêmica, muito obrigado!

SUMÁRIO

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	7
LISTA DE SÍMBOLOS	9
LISTA DE FIGURAS	10
LISTA DE TABELAS	11
RESUMO	12
ABSTRACT	13
1 INTRODUÇÃO	14
1.1 Contribuição	16
1.2 Organização dos capítulos	17
2 TRÁFEGO VEICULAR INTELIGENTE	18
2.1 Tecnologia da Informação no Tráfego Veicular	18
2.2 Simulação de Tráfego Veicular	19
2.3 Oferta e Demanda	21
2.4 Modelagem e Simulação baseada em Agentes	21
2.5 Resumo	23
3 TRABALHOS RELACIONADOS	24
3.1 Teoria dos Jogos	24
3.2 Aprendizado	26
3.3 Comunicação	28
3.4 Resumo	29
4 ABORDAGEM AVNET	31
4.1 Apresentação do AVNET	31
4.2 Estrutura do AVNET	32
4.2.1 AVNET sob a perspectiva da oferta	33
4.2.2 AVNET sob a perspectiva da demanda	33
4.2.3 AVNET sob a perspectiva do agente	35
4.3 Resumo - AVNET = oferta + demanda + agentes	36

5	METODOLOGIA	37
5.1	ITSUMO	37
5.1.1	Núcleo do Simulador	37
5.1.2	Base de Dados	38
5.1.3	Controle: módulo de agentes semafóricos	39
5.1.4	Motoristas	40
5.1.5	Saída: Estatísticas e Visualização	40
5.2	Arquitetura do AVNET	41
5.2.1	Oferta	41
5.2.2	Demanda	41
5.2.3	Agentes	42
5.3	Resumo	43
6	RESULTADOS EXPERIMENTAIS	45
6.1	Parametrização dos experimentos	45
6.2	Fluxo operacional da simulação	46
6.3	Estatísticas	47
6.4	Organização dos resultados e análises	47
6.4.1	Classes de duração de viagens	47
6.4.2	Níveis de Análise	48
6.5	Topologia 1: Arteriais	50
6.5.1	Análise detalhada de oferta, demanda e agentes para 40.000 viagens	51
6.5.2	Análise detalhada de oferta, demanda e agentes para 30.000 viagens	57
6.5.3	Análise detalhada de oferta, demanda e agentes para 20.000 viagens	60
6.5.4	Análise com agrupamento de demandas	64
6.6	Topologia 2: Grade	65
6.6.1	Análise detalhada de oferta, demanda e agentes	67
6.6.2	Análise com agrupamento de demandas	67
6.7	Análise com agrupamento dos tipos de agentes	68
6.8	Discussão das principais conclusões	69
7	CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS	71
7.1	Considerações Finais	71
7.2	Sugestões para Pesquisas Futuras	74
APÊNDICE A	ANÁLISE DA TOPOLOGIA GRADE	75
A.1	Topologia 2: Grade	75
A.1.1	Análise detalhada de oferta, demanda e agentes para 4.200 viagens	75
A.1.2	Análise detalhada de oferta, demanda e agentes para 6.000 viagens	78
A.1.3	Análise detalhada de oferta, demanda e agentes para 8.000 viagens	81
REFERÊNCIAS		85

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ATIS *advanced traveller information system* ou sistemas avançados de informação ao motorista

ATMS *advanced travel management system* ou sistemas avançados de gerenciamento de viagens

AVNET *Agent-based approach to Vehicular Network load balance Evaluation*

CA *cellular automata*

COIN *collective intelligence*

CMP custo médio percorrido

DpC densidade por classe

DMP distância média percorrida

DR *delay re-planning*

FC *floating cars*

IA inteligência artificial

ITS *intelligent transportation systems*

MG *minority game*

MSBA modelagem e simulação baseada em agentes

MVC média de viagens concluídas

OD origem-destino

OSM *Open Street Maps*

PoA *price of anarchy*

RTV rede de tráfego veicular

SMA sistema multiagente

TMV tempo médio de viagem

V2V *vehicle-2-vehicle*

WLU *wonderful life utility*

LISTA DE SÍMBOLOS

v	velocidade de um veículo
v_{max}	velocidade máxima de um veículo
gap	distância até um próximo veículo
p_{desac}	desaceleração de um veículo
M	matriz de origens e destinos
M_{ij}	valor da i -ésima linha e j -ésima coluna da matriz M
e^i	i -ésima aresta
N_c^i	número de células na i -ésima aresta
N^i	número de veículos na i -ésima aresta
L^i	tamanho artificial da i -ésima aresta
l^i	comprimento da i -ésima aresta
\mathcal{P}^j	rota do j -ésimo agente
τ	fator de atraso

LISTA DE FIGURAS

1.1	Interação Ação/Percepção	16
2.1	Ação e percepção do <i>agente-motorista</i> no ambiente.	22
3.1	Rede utilizada para demonstrar os experimentos de Zheng e Chen. . .	25
4.1	Abstração de uma rede de tráfego veicular (RTV) em grafo.	34
5.1	Interação entre os módulos do ITSUMO.	38
5.2	Estrutura da RTV no ITSUMO.	39
5.3	Etapas do processo.	41
6.1	Organização da análise dos resultados	48
6.2	Eixos do agrupamento das ações e percepções dos agentes utilizado para a análise dos resultados.	49
6.3	Rede Arteriais	50
6.4	TMV para 40.000 viagens OD (acima) e uniforme (abaixo).	52
6.5	DMP para 40.000 viagens OD (acima) e uniforme (abaixo).	53
6.6	CMP para 40.000 viagens OD (acima) e uniforme (abaixo).	55
6.7	Média de viagens concluídas (MVC), demanda OD com 40 mil viagens	56
6.8	Densidade por classe - 40.000 viagens OD e uniforme.	57
6.9	TMV e DMP para 30.000 viagens OD (esquerda) e uniforme (direita).	57
6.10	CMP e MVC para 30.000 viagens OD (esquerda) e uniforme (direita).	59
6.11	Densidade por classe - 30.000 viagens OD e uniforme.	60
6.12	TMV e DMP para 20.000 viagens OD (esquerda) e uniforme (direita).	61
6.13	CMP e MVC para 20.000 viagens OD (esquerda) e uniforme (direita).	63
6.14	Densidade por classe - 20.000 viagens OD e uniforme.	64
6.15	Rede Grade	66
A.1	TMV e DMP para 4200 viagens OD (esquerda) e uniforme (direita). .	75
A.2	CMP e MVC para 4200 viagens OD (esquerda) e uniforme (direita). .	77
A.3	Densidade por classe - 4200 viagens OD e uniforme.	78
A.4	TMV e DMP para 6000 viagens OD (esquerda) e uniforme (direita). .	79
A.5	CMP e MVC para 6000 viagens OD (esquerda) e uniforme (direita). .	80
A.6	Densidade por classe - 6000 viagens OD e uniforme.	81
A.7	TMV e DMP para 8000 viagens OD (esquerda) e uniforme (direita). .	82
A.8	CMP e MVC para 8000 viagens OD (esquerda) e uniforme (direita). .	83
A.9	Densidade por classe - 8000 viagens OD e uniforme.	84

LISTA DE TABELAS

4.1	Resumo dos tipos de agentes.	36
6.1	Resumo da parametrização do simulador.	46
6.2	Matriz OD da rede Arteriais	51
6.3	Matriz OD da rede Grade.	66
6.4	Demanda em que o replanejamento durante a viagem demonstrou os melhores resultados, em cada RTV.	69

RESUMO

O fenômeno do congestionamento, decorrente do rápido aumento da demanda por todos os meios de transporte só tende a se agravar, já que sistemas de transporte (vistos como um todo) têm um grande impacto na economia mundial. No caso do transporte veicular em particular, é notório que a demanda por mobilidade é uma das características da nossa sociedade. O impacto direto e indireto dos congestionamentos em áreas urbanas e interurbanas é imenso, e precisam ser avaliados adequadamente para que seus efeitos sejam pelo menos minorados.

Esta dissertação apresenta o AVNET, uma modelagem baseada em agentes para avaliação do balanceamento de carga em redes de tráfego veicular, capaz de investigar microscopicamente a interação entre oferta, demanda e as particularidades do comportamento dos motoristas, aqui tratados como agentes autônomos capazes de perceber o estado do ambiente e se adaptar a ele utilizando replanejamento heurístico. O principal objetivo do AVNET é investigar a interação entre a percepção que o agente possui do tráfego e a consequente adaptação através da mudança de rota durante a viagem. De forma cíclica, o AVNET propõe que o estado do ambiente influencia na percepção do agente, e a ação do agente influencia no estado do ambiente. As medidas de balanceamento de carga visam avaliar o desempenho do ponto de vista do motorista, ao invés de abordar a avaliação do ponto de vista da rede como algumas abordagens tradicionalmente propõe.

Experimentos foram realizados a partir da variação nas condições de oferta - utilizando uma rede com topologia em estilo de grade e uma abstração de algumas vias arteriais da cidade de Porto Alegre/RS - variação nas condições de demanda - o tipo de distribuição e número de viagens - e dos tipos de agentes utilizados. Os resultados ajudam a responder como será o balanceamento de carga de redes de tráfego veicular conforme as condições de oferta e demanda do ambiente, e de percepção/ação dos agentes.

Palavras-chave: Modelagem e simulação baseada em agentes, Tráfego veicular, Balanceamento de carga.

ABSTRACT

The phenomenon of congestion, due to the rapid increase in demand for all means of transport is only going to worsen, since systems transport (seen as a whole) have a major impact on the world economy. In the case of vehicular transport in particular, it is clear that the demand for mobility is a characteristic of our society. The direct and indirect impact of congestion in urban and long distance is immense, and must be properly evaluated for their effects are at least mitigated.

This dissertation presents the AVNET, an agent-based modelling to evaluate load balancing in networks of vehicular traffic, able to microscopically investigate the interaction between supply, demand and the peculiarities of the behavior of drivers, here treated as autonomous agents, capable to perceive the state of the environment and adapt to it using heuristic redesign. The main goal of AVNET is to investigate the interaction between the perception that the agent has the traffic and the consequent adaptation by changing the route during the trip. Cyclically, the AVNET propose that the state of the environment influences the perception of the agent and the agent's action influences the state of the environment.

Experiments were performed from the variation in supply conditions - using a network grid topology and an abstraction of some arterial roads in the city of Porto Alegre/RS - changes in demand conditions - the type of distribution and number of trips - and the types of agents used. The results will help answer how the balancing network load of vehicular traffic as conditions of supply and demand of the environment, and perception / action agents.

1 INTRODUÇÃO

O transporte sempre desempenhou um papel de destaque na história da humanidade, desde os povos que se deslocavam de um canto a outro do planeta atrás de alimento, muito antes do advento da agricultura. Impérios expandiam suas fronteiras, dominando e anexando novos territórios. A rota para o oriente atrás de especiarias, as grandes navegações e a descoberta de novos continentes, e finalmente a revolução industrial. Não é difícil perceber o quão importante foi e continua sendo o transporte em nossas vidas. Os impactos sentidos pela revolução industrial, e mais tarde, o pós guerra, não só tornaram o transporte ainda mais importante quanto trouxeram consigo o surgimento dos congestionamentos. Ao que a nossa experiência indica, este problema só tende a piorar, pois a demanda por transporte tem aumentando cada vez mais, acompanhado o crescimento populacional e da própria economia.

Em artigo publicado no Jornal de Comércio (“Os custos dos congestionamentos de trânsito” de 03/01/2012), são divulgados os resultados de um estudo realizado por Marcos Cintra (Fundação Getúlio Vargas/SP), com dados referentes a 2008, onde os congestionamentos na cidade de São Paulo acarretam custos econômicos anuais na ordem de 33,5 bilhões de reais, o que equivale a aproximadamente 10% do seu PIB. Em conteúdo especial sobre o trânsito, a revista Veja divulga em seu site¹ que o Instituto de Estudos Avançados da USP estima o desperdício de 200 milhões de litros de gasolina e álcool e 4 milhões de litros de diesel por ano nos engarrafamentos da cidade. É um problema que tem consequências nos custos logísticos (mais tempo para rodar, mais cara a entrega), gastos com combustível e poluição, perdas no consumo (mais horas no trânsito, significa menos horas para aproveitar os produtos e serviços), e ainda impactos na qualidade de vida do cidadão.

Esses problemas podem ser amenizados pela construção de novas vias (mais opções de rotas), mas isso tem consequências tanto econômicas quanto ambientais. A alternativa mais viável à expansão da malha viária é a otimização do fluxo de tráfego na malha existente. Enquanto a expansão da malha viária é um problema de oferta, a otimização do fluxo de tráfego é um problema de demanda. Conforme Roess e colaboradores (2004) os sistemas de transporte também são estudados do ponto de vista econômico por uma abordagem do tipo oferta e demanda. Provisão ou oferta neste caso é a expressão da capacidade da infraestrutura de transporte e meios de transporte, medida em termos de infraestrutura e de serviços, em unidades como número de passageiros transportados, volume e massa (carga), etc. Já a demanda por transporte é diretamente relacionada a padrões urbanos e rurais, além do tipo de sistema de transporte. Num exemplo urbano, um percurso residência-local de trabalho depende diretamente da localização destes pontos,

¹ disponível em <http://veja.abril.com.br/idade/exclusivo/transito/contexto1.html>

do horário de trabalho e do meio de transporte disponível.

Conforme pontuado anteriormente, a otimização do fluxo de tráfego (distribuição espacial) é uma alternativa econômica e ecologicamente mais viável do que a expansão viária. Esta é uma das razões pelas quais esta dissertação está voltada ao problema da demanda. No centro da questão da demanda estão os motoristas dos centros urbanos, especialmente aqueles que dirigem até o trabalho diariamente. Estes motoristas utilizam o conhecimento acumulado durante suas viagens, e também informações recebidas em transmissões de rádio ou painéis informativos, para planejar suas rotas no intuito de se deslocar com agilidade. No entanto, as suas decisões não obedecem a nenhum tipo de coordenação e improvavelmente levam ao uso balanceado da rede de tráfego veicular (RTV). Uma situação de tráfego balanceado é de interesse coletivo, pois permite reduzir continuamente os tempos de viagem. É neste ponto que esta dissertação se concentra, investigando como a forma de distribuição dos motoristas na RTV, as suas capacidades de percepção e adaptação, impactam no balanceamento da RTV ainda que não exista nenhum tipo de coordenação.

A criação de instrumentos para investigação e redução de congestionamentos, perpassa diversas áreas do conhecimento, e tem uma ligação muito estreita com abordagens baseadas em modelagem e simulação baseada em agentes. Esta relação se deve ao fato dos agentes capturarem as características essenciais do ambiente de tráfego veicular, em um nível microscópico, que muitas abordagens ignoram ou relegam para segundo plano. Uma estratégia bastante intuitiva, é tratar o motorista como um agente, o que será discutido no Capítulo 2. Alguns destes estudos vem utilizando teoria de jogos para induzir os agentes a algum tipo de coordenação que permita balancear o tráfego veicular. Nesta linha, pode-se citar Zheng e Chen (2011) e seu estudo baseado em *congestion games* e Galib e Moser (2011) e sua abordagem baseada em *minority games*. Há também as pesquisas voltadas para o aprendizado de máquina, onde a estratégia é fazer com que os agentes aprendam a melhor estratégia para deslocamento na RTV. A pesquisa de Tumer e colegas (2008), utilizando um *framework* para sistemas coletivos (COIN), é um exemplo de aplicação do aprendizado. Há também estratégias baseadas na disseminação de informações aos agentes sobre o estado da RTV, como por exemplo, as pesquisas de Yamashita e colegas (2004) e Lin e colegas (2007). Estas e outras investigações sobre o problema do congestionamento serão discutidas em detalhes no Capítulo 3.

No entanto, as abordagens citadas no parágrafo anterior, ou não tratam o motorista como uma entidade autônoma ou não abstraem um modelo de motorista com tantos detalhes quanto se possa desejar. Considerando que esta dissertação está voltada à otimização do fluxo do tráfego veicular, a aplicação da tecnologia da informação neste cenário é fundamental. Os instrumentos tecnológicos, especialmente os baseados na disseminação da informação, parecem promissores para minorar os congestionamentos, e por isso precisam ser estudados a fundo. Mas para estudar o impacto da tecnologia no trânsito, precisamos que o modelo de motorista tenha suporte para processar estas informações, como por exemplo, considerar a sua autonomia decisória. Para esta dissertação, um modelo de motorista autônomo capaz de reagir à tecnologia, é fundamental. Neste modelo, o agente percebe as informações e conseqüentemente reage ao seu conteúdo, na tentativa de se adaptar ao estado da RTV, reduzindo seu tempo de viagem.

Partindo das premissas apresentadas até aqui, supõem-se a existência de um ciclo reatualizado, tal qual mostra a Figura 1.1, em que o estado do ambiente influencia a percepção do agente, e a ação do agente influencia na mudança de estado do ambiente. Com base nesta suposição, esta dissertação propõem uma modelagem e simulação ba-

seada em agentes para avaliação do balanceamento de carga em redes veiculares, que permita investigar a interação entre a percepção e a adaptação do agente em uma RTV. Através desta investigação, pretende-se responder ao seguinte questionamento:

Dadas as condições de oferta e demanda do ambiente, e de percepção/ação dos agentes que trafegam na RTV, como será o balanceamento de carga nesta RTV?



Figura 1.1: Interação Ação/Percepção

1.1 Contribuição

Partindo da proposta apresentada neste capítulo, surge o AVNET, do inglês *Agent-based approach to Vehicular Network load balance Evaluation* (AVNET). O AVNET consiste em um fluxo de atividades que possui como entradas as características da RTV em nível de oferta e demanda, e as características que definem o comportamento dos agentes; como processamento, a atuação dos agentes em nível microscópico sobre o ambiente, trafegando e percebendo o tráfego na RTV, para então atuar e se adaptar replanejando sua rota durante a viagem; e como saída as estatísticas que demonstrem os níveis de balanceamento de carga da RTV, do ponto de vista do indivíduo ao invés de apresentar medidas da rede.

A necessidade de estudar os efeitos desta abordagem em nível microscópico, estimulou o uso de um simulador de tráfego veicular que permitisse representar os componentes de oferta, demanda e motoristas (ou agentes), em um nível microscópico. Por esta razão foi escolhido o ITSUMO, *Intelligent Transportation System for Urban Mobility*, que possui grande parte das características desejadas e a flexibilidade de ser adaptado as necessidades desta investigação.

O AVNET prevê a existência de agentes que são classificados de acordo com suas capacidades de percepção e ação. Através da combinação entre as capacidades de percepção completa, parcial e parcial estendida pela comunicação *vehicle-2-vehicle* (V2V), com a capacidade de ação de replanear a rota durante a viagem, o AVNET é constituído de seis tipos de agentes. A arquitetura do AVNET prevê a existência destes seis tipos de agentes, bem como a utilização de demandas uniformemente distribuídas e baseadas em matrizes de origem/destino, com diferentes números de viagens. A partir da coleta das estatísticas, o AVNET permite avaliar e comparar os níveis de balanceamento de carga da RTV, mostrando microscopicamente, situações que macroscopicamente passariam despercebidas.

Em suma, a contribuição desta dissertação é investigar os efeitos da interação entre oferta, demanda e agentes, apresentando resultados que demonstrem os níveis de balanceamento de carga possíveis de se atingir em uma RTV, enquanto procuramos o alinhamento

entre o ótimo local dos agentes ao ótimo global do sistema, mesmo sem a existência de um mecanismo explícito de coordenação. Indiretamente esta dissertação contribui com uma série de extensões realizadas no simulador ITSUMO, como por exemplo, a criação de motoristas capazes de determinar sua própria rota, as capacidades de representação parcial dos custos de tráfego e de comunicação V2V, o uso de algoritmos de caminhos mínimos e o mecanismo de manipulação de travamentos (*deadlocks*).

1.2 Organização dos capítulos

O texto desta dissertação está organizado da seguinte forma:

Capítulo 2 Introduce conceitos relacionados à tecnologia da informação aplicada ao tráfego veicular, à simulação e modelagem baseada em agentes.

Capítulo 3 Discute alguns trabalhos relacionados com esta dissertação, comparando abordagens, demonstrando os pontos em comum e os diferenciais da abordagem proposta.

Capítulo 4 Apresenta a abordagem utilizada nesta dissertação, o AVNET, sua descrição, sua estrutura, seus objetivos.

Capítulo 5 Apresenta a metodologia utilizada para experimentação do AVNET, mostrando detalhes da arquitetura e do ambiente utilizado nesta investigação.

Capítulo 6 Demonstra e analisa os resultados obtidos com o AVNET nos cenários propostos.

Capítulo 7 Aponta as conclusões desta dissertação e perspectivas para trabalhos futuros.

2 TRÁFEGO VEICULAR INTELIGENTE

A investigação do balanceamento de carga em redes de tráfego veicular (RTVs) proposta no Capítulo 1, advém da crescente demanda por mobilidade urbana da atualidade. No centro desta investigação estão os motoristas, que respondem por esta demanda. Computacionalmente, as percepções e ações que constituem a sua capacidade de decisão, estão em conformidade com o conceito de agentes autônomos proposto por Wooldridge (2002). Para Wooldridge, a interação destes motoristas ou agentes no ambiente de tráfego veicular, pode ser abstraída na forma de um sistema multiagente (SMA). Estas relações entre ciência, tecnologia e o problema do tráfego veicular vem se tornando cada vez mais comuns.

Atualmente, a tecnologia vem sendo aplicada como solução efetiva no tráfego veicular, procurando minimizar os efeitos colaterais que a própria solução acarreta à rotina dos cidadãos. No entanto, nem sempre a solução projetada alcança os resultados desejados. Surge, então, a simulação do tráfego veicular para contribuir com o estudo de viabilidade das novas soluções e até mesmo para investigar métodos inovadores, que jamais seriam aplicados na prática sem o respaldo de um estudo preliminar.

No decorrer deste capítulo, será discutida a simulação de tráfego veicular e sua relação com esta dissertação. Na Seção 2.1 será abordada a tecnologia da informação frente ao problema do tráfego veicular. Já a tecnologia vista a partir da simulação de tráfego veicular, será tratada na seção 2.2. Um aspecto importante, e fundamentalmente relacionado com esta dissertação, é o tráfego veicular sob a ótica econômica de oferta e demanda, o que será discutido na seção 2.3. Finalmente, e agrupando os assuntos discutidos no decorrer deste capítulo, a seção 2.4 apresenta a simulação e modelagem baseada em agentes.

2.1 Tecnologia da Informação no Tráfego Veicular

Como vimos na abertura do Capítulo 1, a crescente demanda por mobilidade no tráfego veicular é um problema preocupante e que tende a piorar. Como a expansão da malha viária nem sempre é possível, surge a necessidade de otimizar o fluxo de tráfego na malha existente. Algumas soluções visam restringir o tráfego em determinadas áreas ou a circulação em determinados dias da semana, como ocorre com o sistema de rodízio de veículos na cidade de São Paulo. Infelizmente, estas soluções impactam na rotina dos cidadãos, restringindo sua liberdade de movimento. Conforme observam Bazzan e Klügl (2007), uma solução menos restritiva é fornecer informações aos motoristas contribuindo no planejamento do seu itinerário. Esta difusão de informações pode ocorrer via rádio, telefone, internet (*smartphones, tablets, etc.*), painéis de mensagens, computadores de bordo, dentre outros meios.

Roess e colaboradores (2004) definem esta aplicação da tecnologia da informação

em cenários de tráfego veicular como Sistemas Inteligentes de Transporte ou *intelligent transportation systems* (ITS). Além da difusão de informações, ITS envolve a automação de estradas, arrecadação automática de pedágio, GPS, controle inteligente (e.g. semáforos que se adaptam ao tráfego), etc. Ainda para Roess e colaboradores, ITS compreende duas grandes áreas: *advanced travel management system* ou sistemas avançados de gerenciamento de viagens (ATMS) e *advanced traveller information system* ou sistemas avançados de informação ao motorista (ATIS). A primeira se refere à infraestrutura, enquanto a segunda está ligada ao usuário do sistema de transporte. Esta dissertação está diretamente relacionada com ATIS, na medida que parte da abordagem de Bazzan e Klügl (2007), onde a informação ao motorista ocupa lugar central.

É comum que os sistemas de ATIS forneçam informações aos usuários geradas pelo ATMS. Nesta abordagem, uma entidade central detém a informação e é responsável por difundí-la. Entretanto, uma tecnologia que merece destaque é a comunicação entre veículos (*vehicle-to-vehicle* ou *V2V*). Além da aplicação em otimização de rotas (evitar congestionamentos), esta tecnologia também pode ser aplicada para evitar acidentes. É de se esperar que esta e outras tecnologias contribuam para minorar os efeitos da crescente demanda por mobilidade. Porém, é possível que a otimização dos sistemas, ao invés de somente otimizar a oferta, também produza o aumento da demanda. Assim, rapidamente a solução se torna ultrapassada e novas medidas são necessárias. Esta complexidade exige que as soluções sejam testadas em ambientes simulados antes de serem colocadas em prática. Por esta razão, a Seção 2.2 abordará alguns aspectos da simulação de tráfego veicular, importantes para esta dissertação.

2.2 Simulação de Tráfego Veicular

A complexidade da área de transportes detém a atenção de diversos ramos da ciência, o que acarreta na existência de inúmeras ferramentas acadêmicas e comerciais. Porém, as ferramentas consolidadas pelo tempo, não têm seus códigos-fonte disponibilizados livremente. A criação de novas ferramentas se faz necessária seja pelos custos envolvidos, seja pelas exigências que alguns cenários impõem e que não são capturadas pelas ferramentas disponíveis. Estas ferramentas estão enquadradas em um dentre três tipos de modelos de simulação: macroscópico, mesoscópico e microscópico.

Os modelos de simulação clássicos e macroscópicos não consideram o fator comportamental dos motoristas, que é fundamental para analisarmos os impactos que as novas tecnologias podem causar, como o uso de ATIS. Um método macroscópico está preocupado com fluxo do tráfego, que pode ser expresso por um conjunto de equações. Já o modelo microscópico permite incluir níveis de detalhamento sobre os veículos, os motoristas, os movimentos permitidos, características como aceleração e desaceleração, troca de pista, dentre outros. Ao tratar individualmente o mecanismo de decisão do motorista, este modelo permite investigar o impacto da informação (e.g. comunicação *V2V*) sobre o mecanismo de decisão. O modelo mesoscópico une as características micro e macro, representado em detalhes as entidades de interesse e abstraindo entidades ou interações que não são tão importantes para o modelo. Por exemplo, a manobra de mudança de pista pode ser representada como um evento instantâneo (para todos os veículos) e ser baseada na densidade da pista e não na interação entre os veículos propriamente ditos.

A grande vantagem dos modelos macroscópicos é o seu desempenho computacional, enquanto os modelos microscópicos são geralmente complexos e exigem um número muito maior de parâmetros. No entanto, a aplicação de novas tecnologias no cenário de

tráfego veicular exige que os comportamentos individuais (microscópicos) sejam estudados. Segundo Bazzan e Klügl (2007) um dos modelos microscópicos mais utilizados é o de *car following*, no qual dois ou mais veículos trafegam na mesma pista, um *follower* (ou posterior) seguindo o *leader* (ou anterior). As velocidades dos veículos posterior e anterior, a distância entre eles, as taxas projetadas de desaceleração, o tempo de reação do motorista posterior e outros parâmetros específicos do veículo anterior, definem a interação entre os veículos deste modelo. Há também o modelo baseado no autômato celular ou *cellular automata* (CA) de Nagel-Schreckenberg (NAGEL; SCHRECKENBERG, 1992). A eficiência da discretização do tempo e do espaço através do autômato celular em comparação com o *car following* é a grande motivação deste modelo.

No modelo Nagel-Schreckenberg as vias são divididas em células de comprimento fixo (normalmente 7,5 metros, em auto-estrada, 5 em cenários urbanos), que possuem um estado que poderá ser ocupado por um veículo ou livre. Os veículos tem uma velocidade v , indicando o número de células deslocadas a cada passo de simulação, que em geral representam um segundo. Esta velocidade chega a v_{max} (e.g. $v_{max} = 3$ cel./s corresponde a 54 Km/h). O número de elementos vazios à frente do veículo (posição relativa entre eles) é dado pela variável gap , em número de células. As quatro regras principais que guiam a movimentação física de cada veículo neste modelo são (NAGEL; SCHRECKENBERG, 1992):

Regra I Aceleração: Se a velocidade v do veículo é inferior a v_{max} e a distância até o próximo veículo é superior a $v + 1$, então ele deve acelerar, aumentando sua velocidade ($v \leftarrow v + 1$);

Regra II Interação/Desaceleração: Caso a distância até o próximo veículo seja inferior ou igual a sua velocidade ($v \geq gap$) então o veículo deve reduzir sua velocidade ($v \leftarrow gap$);

Regra III Aleatoriedade: cada veículo pode, com uma probabilidade p_{desac} , reduzir sua velocidade em uma unidade ($v \leftarrow v - 1$);

Regra IV Movimentação: cada veículo avança v células.

A discretização deste modelo no tempo e no espaço, assim como o seu conjunto de regras, permite simular os efeitos de ações individuais como a aceleração e desaceleração. Apesar da simplificação da realidade, este modelo pode ser estendido para contemplar diferentes tipos de motoristas. Este modelo estendido ajudaria a investigar o comportamento dos motoristas, por exemplo, sob a influência de informações recebidas por ATIS. Do ponto de vista tático, o movimento dos veículos seguiria as regras estabelecidas pelo CA; porém, do ponto de vista estratégico, os motoristas utilizariam mecanismos sofisticados para escolha de rotas. Uma extensão seguindo estes critérios foi apresentada por Bazzan e colaboradores (2011).

Esta separação tático-estratégica, pode ser alcançada através de uma Modelagem e Simulação Baseada em Agentes, onde os motoristas são agentes autônomos no que se refere à escolha das rotas, mas sem interferirem nas regras elementares de movimentação do veículo. Esta será a abordagem discutida nas próximas seções. A Seção 2.3 trata do mecanismo de escolha de rotas, sob a perspectiva econométrica de oferta e demanda. Já a Seção 2.4 discute as bases deste modelo híbrido, que separa a camada tática (veículo) e estratégica (motorista), através de uma modelagem e simulação baseada em agentes (MSBA).

2.3 Oferta e Demanda

Os sistemas de transporte são também estudados do ponto de vista econômico por uma abordagem do tipo oferta e demanda (ROESS; PRASSAS; MCSHANE, 2004). Em um cenário urbano, a demanda por transporte pode representar a localização das áreas residenciais e comerciais (deslocamento diário de casa para o trabalho), do horário de trabalho e do meio de transporte disponível. A oferta neste caso é a capacidade da infraestrutura de transporte e meios de transporte disponíveis, em geral representada por modelos da teoria dos grafos.

Para Bazzan e Klügl (2008) a escolha de rotas é essencial na simulação do tráfego veicular, quando se deseja atribuir uma demanda em locais específicos da RTV. A estimativa de demanda é expressa através de uma matriz que informa quantas viagens serão realizadas nesta rede; além disso, há uma RTV e uma função que relaciona densidade e velocidade de viagem. A saída é a atribuição de cada motorista para uma rota. Tradicionalmente, a escolha de rotas é abordada por meio de modelos matemáticos. No entanto, para considerar as ações a nível individual, o motorista ou agente, deve escolher a sua rota.

Considerando a rede na forma de um grafo, e o motorista como uma entidade individual que ocupa um lugar no espaço, é natural a aplicação de algoritmos de busca ou de caminhos mínimos para determinar a rota do agente. Além disso, também é possível considerar o replanejamento da rota durante a viagem. A obtenção de rotas e o replanejamento durante a viagem, são alguns dos tópicos tratados por Bazzan e colaboradores (2011). Nesta publicação, a obtenção de rotas foi testada através de vários algoritmos como Dijkstra, A*, ARA*, *anytime* e *dynamic shortest paths*. Os experimentos indicam vantagens no tempo de processamento ao usarmos o algoritmo A*, e por isso é utilizado nesta dissertação.

O mecanismo para escolha de rotas, apesar de importante, é apenas um aspecto a ser considerado no comportamento do agente. O mecanismo decisório do agente também depende da percepção do ambiente e da sua interação com outros agentes. Na Seção 2.4 serão mostrados estes aspectos, sua modelagem e simulação voltadas para o problema do tráfego veicular.

2.4 Modelagem e Simulação baseada em Agentes

Na abertura deste capítulo, definimos que um agente é uma entidade autônoma que busca alcançar seus objetivos em um ambiente. Quando estes agentes interagem entre si, temos um SMA. Aplicando estes conceitos em um ambiente de tráfego veicular, os motoristas podem ser modelados na forma de agentes, como ilustra a Figura 2.1. Intuitivamente, podemos adaptar o modelo de simulação microscópico baseado em CA, apresentado na Seção 2.2, substituindo a tomada de decisão probabilística por *agentes*, ou *motoristas*, que tomam suas decisões autonomamente.

Esta relação que se estabelece entre agentes e motoristas pode ser tratada por meio de uma modelagem e simulação baseada em agentes (MSBA) (do inglês *agent-based modeling and simulation*). Enquanto o modelo abstrai um sistema real, a simulação executa este modelo.

Para Uhrmacher e Weyns (2009) modelagem e simulação baseada em agentes (MSBA) representa indivíduos (agentes) que se desenvolvem pela interação mútua dentro de um ambiente. Devido ao comportamento emergente desta interação, é possível represen-

tar situações complexas onde estruturas globais resultam das interações entre os indivíduos. Este comportamento emergente permite que, mesmo um sistema simples possa exibir comportamentos complexos, fornecendo informações valiosas sobre a dinâmica do mundo real que é simulada. Para Epstein (2007), esta natureza emergente (*bottom-up*) é a característica mais importante de um MSBA.



Figura 2.1: Ação e percepção do *agente-motorista* no ambiente.

A interação entre agentes autônomos dentro do modelo microscópico de simulação baseado no CA, resulta na complexidade de um cenário de tráfego urbano. Em outras palavras, o resultado é mais do que a soma das partes.

Ainda para Uhrmacher e Weyns, além de capturar o fenômeno emergente, MSBA é vantajosa em relação a outras abordagens analíticas, como a modelagem baseada em equações, pela capacidade de integração e flexibilidade. É possível integrar, no mesmo modelo, variáveis quantitativas, equações diferenciais e comportamentos baseados em lógica. Também é muito simples introduzir modificações no comportamento dos agentes, adicionando novas regras de comportamento em nível individual. É possível incluir novos agentes com novos comportamentos para interagirem com os agentes que já existem. Além das características de integração e flexibilidade, a descrição do sistema de uma forma natural por meio de uma MSBA, torna o modelo mais próximo da realidade. Por exemplo, é mais intuitivo descrever um sistema de tráfego através do comportamento dos motoristas, do que através de equações que governam o movimento destes “motoristas”.

Macal e North (2005) citam algumas situações onde MSBA é vantajosa em relação a outras abordagens tradicionais: quando há uma representação natural dos agentes (e.g. motoristas); as decisões podem ser definidas discretamente; é importante considerar mudanças no comportamento (adaptação); ocorrem relações dinâmicas entre os agentes (aparecem e desaparecem rapidamente); os agentes possuem uma localização espacial; o presente não garante uma predição do futuro, etc. Seguramente, no cenário de tráfego veicular, identificamos os elementos citados por estes pesquisadores.

Klügl e colegas (2005) propõem como ingredientes básicos para um MSBA os *agentes*, o *ambiente* e a *infraestrutura de simulação*. Conforme dito anteriormente, o agente é a entidade autônoma do sistema. O ambiente é o meio onde estes agentes interagem entre si; interações sem as quais não poderíamos conceber a existência de uma SMA. Finalmente, a infraestrutura de simulação fornece os meios para que o modelo seja executado. No AVNET estes ingredientes são encontrados nas relações entre: agente e motorista, ambiente e modelo de simulação de tráfego veicular, infraestrutura e simulador ITSUMO.

2.5 Resumo

Os problemas relacionados ao tráfego veicular, em especial os congestionamentos, são reflexo de uma série de componentes envolvidos neste ambiente, como a malha viária, a infraestrutura de controle e o próprio motorista. Ao analisarmos as ações e percepções do motorista, é evidente a sua relação com a tecnologia de agentes. Na abertura deste capítulo, esta relação foi estabelecida através dos conceitos de agente e SMA propostos por Wooldridge (2002).

Na busca de soluções menos restritivas à rotina dos cidadãos, verifica-se a importância da tecnologia da informação aplicada ao tráfego veicular. Atualmente, já existem inúmeras aplicações e outras ainda irão surgir. No entanto, é necessário verificar o impacto que estas soluções carregam consigo antes de viabilizá-las na prática. Deste modo, precisamos verificar os efeitos da tecnologia sobre o tráfego através de ambientes simulados. A simulação nestes casos, precisa considerar o aspecto comportamental dos motoristas para investigar o impacto da informação sobre o seu mecanismo de decisão. Este mecanismo trata de métodos para a obtenção de rotas e até mesmo para a mudança de rota durante a viagem. Por estas razões é que as simulações microscópicas são indicadas neste tipo de cenário.

A visão microscópica do tráfego veicular, o motorista abstraído como um agente autônomo, o comportamento do motorista e o processamento da demanda, culminam com o conceito de MSBA. Assim teremos condições de verificar a tecnologia da informação a serviço do motorista, investigando os efeitos desta colaboração em um ambiente simulado. Como observado por Bazzan e Klügl (2007), o agente motorista pode ser modelado por meio de um MSBA de diversas formas, as quais estão contempladas nesta dissertação:

- Agentes capazes de escolher rota: além da tarefa operacional de conduzir o veículo, um agente também pode ser empregado para modelar a tarefa de escolha de rota;
- Agentes deliberativos reproduzindo comportamentos complexos: além de conduzir e escolher rotas, um agente deve conseguir lidar com replanejamento durante a rota e outras contingências.

3 TRABALHOS RELACIONADOS

Como vimos no Capítulo 1, os congestionamentos são cada vez maiores e mais frequentes, exigindo a criação de instrumentos para minorar esta situação. Segundo Chen e Cheng (2010), a tecnologia de agentes fornece os meios adequados para simular sistemas de tráfego veicular, pois oferece um modo intuitivo para descrever entidades autônomas, como mostrou o Capítulo 2. Ainda segundo Chen e Cheng, o comportamento autônomo dos “agentes-motoristas” pode ser tático ou estratégico. As tarefas táticas são ações de curto prazo como a troca de pista, a aceleração e a desaceleração. O modelo de simulação adotado pelo AVNET, e apresentado na Seção 2.2, é responsável pelas ações táticas. As tarefas estratégicas são ações de longo prazo, como a escolha de rotas, que é onde o AVNET se concentra.

A estratégia de escolha de rotas, e o desafio dos congestionamentos no tráfego veicular, fazem com que muitos pesquisadores investiguem mecanismos para escolha de rotas que, mesmo sem a existência de coordenação entre os agentes, permitam mitigar os congestionamentos. Alguns estudos direcionam sua atenção na limitação da percepção que o motorista possui sobre o estado da rede, enquanto outros pesquisam meios de expandir esta percepção. No decorrer deste capítulo serão discutidas algumas destas pesquisas, divididas em três grupos: teoria dos jogos, aprendizado e comunicação.

3.1 Teoria dos Jogos

O AVNET permite analisar o balanceamento de carga em uma rede de tráfego veicular prevendo a existência de agentes heterogêneos (motoristas), que possuem diferentes ações e percepções sobre o estado do tráfego. Esta rede de tráfego veicular é modelada na forma de um grafo, onde os nodos são os cruzamentos e as arestas são as vias. Similarmente, Zheng e Chen (2011) partem do pressuposto que os motoristas contribuem de formas distintas para o congestionamento nas redes de tráfego veicular, e que portanto, são heterogêneos. Utilizando um modelo baseado em *congestion games*, onde as arestas da rede possuem um tempo de percurso associado (assim como o AVNET prevê), cada motorista aumenta este tempo de acordo com a sua técnica de direção.

Na abordagem de *congestion games* definida por Rosenthal (1973), cada jogador escolhe as jogadas desejadas dentre um conjunto de jogadas possíveis. O *payoff* de cada jogador depende do número de jogadores que selecionaram a mesma opção. Zheng e Chen utilizam este princípio para modelar a escolha de rotas, onde cada motorista tem a opção de escolher uma dentre duas arestas que ligam o ponto de origem “O” ao ponto de destino “D”, mostradas na Figura 3.1. O *payoff* dos motoristas que escolheram a aresta “A” dependerá da quantidade de outros motoristas que também escolheram “A”, levando em consideração a capacidade da aresta e o seu estado.

Na definição de Roughgarden e Tardos (2002), a rede de tráfego apresentada por Zheng e Chen trata de um conjunto de agentes independentes, participando de um jogo não-cooperativo, no qual esperamos que as rotas sejam escolhidas na forma de um equilíbrio de Nash. Em outras palavras, cada agente escolhe o caminho mais rápido do seu ponto de vista. Por definição, um equilíbrio de Nash ocorre quando nenhum agente gostaria de mudar sua estratégia, sabendo das estratégias que os outros agentes estão seguindo (SHOHAM; LEYTON-BROWN, 2009). Porém, em geral, o equilíbrio de Nash não otimiza os ganhos do sistema (*social welfare*). Roughgarden e Tardos estavam interessados em comparar o tempo total de viagem do equilíbrio de Nash com a atribuição ótima das rotas. Assim como Zheng e Chen, utilizaram para isso o *price of anarchy* (PoA).

PoA é um tipo de *Congestion game* não atômico (jogado por um número muito grande de jogadores), estabelecido por Koutsoupias e Papadimitriou (1999), e que Papadimitriou (2001) dá o nome de “preço da anarquia”. Através do PoA, é possível determinar a degradação do desempenho devido a falta de regulação de uma autoridade central (“anarquia”). Esta degradação é calculada através da razão entre o ganho que o sistema obtém no pior caso do equilíbrio de Nash e o ganho ótimo do sistema (onde há uma entidade reguladora).

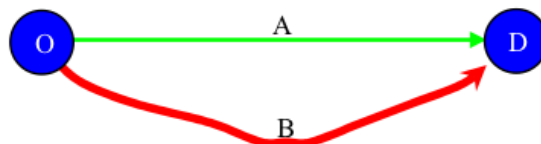


Figura 3.1: Rede utilizada para demonstrar os experimentos de Zheng e Chen.

Assim como o AVNET, Zheng e Chen modelaram a rede de tráfego como um grafo, mas com proporções muito diferentes. Enquanto os autores utilizaram uma rede com dois nodos e duas arestas, as redes testadas nesta dissertação contam com algumas dezenas de nodos e arestas. Essencialmente, a principal semelhança entre a proposta desta dissertação e a proposta de Zheng e Chen é considerar que não há coordenação entre os agentes. Entretanto, os autores utilizam um modelo macroscópico, no qual as decisões só dependem do tempo de viagem em cada aresta. Além disso, e a heterogeneidade diz respeito apenas ao tempo que cada agente contribui para o congestionamento. O AVNET, por outro lado, emprega um modelo microscópico que considera a heterogeneidade na forma de percepções distintas do estado da rede e de capacidades distintas para escolha de rotas (replanejamento durante a viagem).

Tratando ainda da falta de coordenação entre os agentes, Galib e Moser (2011) procuram contornar este problema através da ação individual dos motoristas assistida pelo algoritmo *minority game* (MG). Nesta abordagem, e semelhante a esta dissertação, os motoristas possuem um par origem-destino (OD) por onde devem trafegar, entretanto, ao invés de calcularem a rota entre estes pontos, os agentes escolhem para onde ir a cada intersecção. Utilizando o algoritmo MG como mecanismo de predição, os agentes escolhem a aresta com tráfego minoritário. O conceito de MG foi introduzido por Challet e Zhang (1997), definido na forma de um jogo evolutivo. Os jogos evolutivos pressupõem que os jogadores não possuem nenhuma racionalidade ou que a sua racionalidade seja limitada. O jogador racional é aquele que age para atingir a maior utilidade possível. Na teoria dos jogos evolutivos, ao invés de assumir que o jogador é racional, considera-se apenas que ele possui pelo menos uma estratégia (opção de jogada).

Challet e Zhang apresentaram o algoritmo MG para simplificar o problema do bar *El Farol* formulado por W. Brian Arthur (1994). Neste problema, há uma população

de n pessoas, que todas as quintas-feiras à noite, sem nenhuma comunicação, decidem se irão ou não ao bar *El Farol*. Como o bar é pequeno, se estiver lotado, as pessoas não irão se divertir. Cada agente tem seu mecanismo de predição baseado no histórico de ocupação do bar. A partir deste histórico, o agente utilizará uma estratégia (regra) indutiva, considerando, por exemplo, que na próxima semana o número de pessoas será: a) igual ao da semana passada, b) 50% da semana passada, c) a média das últimas quatro semanas, e assim por diante.

Através do algoritmo MG, Challet e Zhang começam simplificando o primeiro problema, que é a necessidade de definir quais serão as estratégias. Ao iniciar o jogo, as estratégias são aleatoriamente definidas, sem nenhuma preferência por qualquer uma delas. O segundo problema é a redução do espaço de busca, ou do tamanho da memória do agente. Ao invés de considerar a ocupação do bar (n agentes \times m estratégias), o algoritmo MG trata apenas do histórico de escolhas vitoriosas (2 ações \times m estratégias). O algoritmo considera ainda um número ímpar de jogadores, para que sempre exista um lado minoritário. Cada agente sinaliza com o valor +1 quando deseja ir ao bar, e -1 quando deseja ficar em casa (ações). Os agentes do lado minoritário ganham 1 ponto, que irá compor seu *payoff* total, e cada estratégia recebe uma pontuação correspondente a sua escolha. A estratégia de maior pontuação passará a ser escolhida.

A pesquisa de Galib e Moser utiliza um método híbrido usando o conceito de MG e do problema do bar *El Farol* de W. Brian Arthur, que consiste em adaptar o algoritmo MG para retornar o percentual de ocupação da aresta ao invés de indicar uma dentre duas opções, como ocorre na abordagem original. Galib e Moser assumem que cada motorista possui, além do par OD, algum conhecimento prévio por já ter viajado na rede de tráfego veicular. A cada intersecção, o motorista decide para onde ir, utilizando preditores que antecipam o nível de ocupação atual da aresta. O motorista escolherá a aresta com menor ocupação. Ao final da viagem, o motorista irá pontuar os preditores a partir da relação entre o tempo de viagem esperado e o tempo efetivamente gasto. Nas próximas viagens, o motorista escolherá os preditores com maior pontuação, e em caso de empate, fará uma escolha aleatória.

Enquanto a pesquisa de Galib e Moser permite que os agentes escolham suas rotas com base em preditores de ocupação das arestas, o AVNET utiliza uma função de custo também baseada na ocupação das arestas. Mas esta é apenas uma parte do problema tratado pelo AVNET. Novamente, a principal semelhança entre o trabalho proposto pelos autores e esta dissertação, é não prever a possibilidade de coordenação entre os agentes. Entretanto, os agentes não são considerados no mesmo nível de abstração desta dissertação, pois não exploram o conceito de replanejamento (a “rota” é definida a cada intersecção), e não considera as diversidades de percepção e ação dos agentes, fundamentais para investigar como as características heterogêneas dos agentes influenciam no balanceamento de carga da RTV. Além disso, a rede testada possui 10 nodos e 24 arestas, por onde trafegaram 1001 motoristas, números bastante inferiores aos tratados nesta dissertação.

3.2 Aprendizado

Como vimos até aqui, o alinhamento entre os ganhos individuais e os ganhos do sistema é a peça chave para o problema do tráfego veicular. A coordenação neste tipo de problema é extremamente complexa pois o contingente de agentes é grande, o ambiente muda rapidamente e os recursos para sincronizar as ações individuais são no mínimo escassos. Zheng e Chen medem o preço desta falta de coordenação, para utilizar isso em

benefício do sistema. Galib e Moser utilizam um algoritmo que procura minimizar a falta de coordenação, também em benefício do sistema. Pensando neste problema é que Turner e Wolpert (2004) apresentam o *collective intelligence* (COIN), para sistemas que são definidos por duas características: primeiro, devem conter um ou mais agentes que buscam maximizar uma determinada função de utilidade privada. Segundo, precisam ter uma função global de utilidade para avaliar o sistema como um todo. Na prática, os coletivos são muito grandes, distribuídos, e suportam pouco ou nenhum controle de comunicação central. Exatamente como o problema do tráfego veicular.

A questão central do projeto do COIN é como inicializar/atualizar as funções de utilidade dos processos individuais de modo a induzir o comportamento da coletividade a ter bons resultados globais. A função de utilidade global é quebrada em funções menores e distribuída entre os agentes, que a otimizam através da interação com outros e da sua própria capacidade de aprendizado. Uma das funções de utilidade propostas pelos autores é a *wonderful life utility* (WLU), Esta função parte de dois princípios: fatorabilidade (*factorability*), que é o grau com que a função de utilidade local está alinhada com a função de utilidade global, e a aprendibilidade (*learnability*), que é a sensibilidade que o agente tem de perceber qual o impacto das suas próprias ações (ruído), o que é fundamental para o problema do aprendizado em sistemas de grande porte.

O *framework* COIN não serve para um único propósito, pois pode ser aplicado a uma diversidade de sistemas, desde que possuam as características elencadas anteriormente. No caso específico do tráfego veicular, Turner e colegas (2008) utilizam o COIN para discutir o alinhamento do sistema com as preferências dos agentes no intuito de reduzir o congestionamento. Neste trabalho, os autores investigam como coordenar os horários de partida dos motoristas para evitar picos de ocupação na RTV a partir de duas abordagens. Primeiro, os ganhos dos motoristas são medidos através de uma função que avalia seu desempenho do ponto de vista do sistema, através da média dos atrasos de todas as viagens. Segundo, os ganhos dos motoristas são medidos por suas próprias funções, que correspondem aos seus desejos e preferências. Por fim, os autores verificam os resultados quando os agentes utilizam suas próprias funções, porém alinhado suas preferências com os ganhos dos demais motoristas.

O alinhamento entre sistema-indivíduo é obtido através da análise que os autores realizam dos resultados obtidos do ponto de vista global e do ponto de vista dos indivíduos, formulando matematicamente uma função capaz de capturar este alinhamento. Esta é a grande dificuldade de aplicar esta abordagem, pois a função varia conforme o tipo de problema. Estas funções representam o *payoff* que os agentes procuram maximizar através de algum algoritmo de aprendizado de máquina (normalmente aprendizado por reforço). A aprendibilidade proposta pela função WLU, consiste em verificar o ganho do sistema quando o agente não está presente, para que ele perceba o quanto ele contribui para melhorar os ganhos do sistema. Daí vem o nome da função WLU, que se deve ao filme de Frank Capra que aborda o impacto do protagonista na vida das outras pessoas.

Semelhante à abordagem desta dissertação, os motoristas desejam maximizar sua utilidade (ou reduzir seu tempo de viagem) e também há a compreensão de que não basta que apenas alguns agentes ganhem com isso; são esperadas otimizações nos resultados em nível global. Entretanto, diferentemente da abordagem proposta nesta dissertação, não há uma função global com a qual os agentes procuram se alinhar, porque fundamentalmente, os agentes da abordagem proposta nesta dissertação não empregam nenhum mecanismo de aprendizado.

Uma forma de induzir algum modo de coordenação entre os agentes, mesmo que in-

diretamente, é empregar mecanismos de comunicação que informem os motoristas sobre o estado da rede. Klügl e Bazzan (2004) investigam os efeitos da comunicação, ao tratar dos desafios para encontrar formas eficientes de prever os volumes de tráfego em redes veiculares. Nestes sistemas a inter-dependência das ações leva naturalmente a decisões coordenadas. Atualmente já existem sistemas projetados para auxiliar os motoristas nestas tarefas (rádio, internet, etc.), mas que não são considerados ou modelados na forma como os motoristas decidem. Os autores investigaram os efeitos que as decisões locais dos motoristas, influenciam nas ações no sistema como um todo, e como a informação impacta nos resultados alcançados. A investigação dos autores se assemelha à abordagem desta dissertação, que propõem um ciclo em que o estado do ambiente impacta nas ações do agente e as ações do agente no estado do ambiente.

No cenário testado, motoristas que viajam regularmente para o trabalho precisam escolher uma dentre duas rotas, uma principal e outra secundária. A cada manhã, ao planejar sua viagem de casa para o trabalho, os motoristas escolhem a rota que acreditam ser a mais rápida. Através de experimentos realizados com pessoas, os autores puderam analisar um modelo real de decisão, possibilitando a comparação com a teoria. Os agentes recebem recompensas pela sua escolha, de acordo com o nível de ocupação da rota escolhida, através de uma função de *payoff* proposta pelos autores. A adaptação do agente consiste em aumentar seu ganho, mesmo desconhecendo a função de *payoff* do ambiente. Os experimentos foram conduzidos considerando dois casos: no primeiro não há a transmissão de informações sobre o estado das vias, e no segundo os motoristas são informados sobre o estado das vias antes de planejarem suas rotas. Os autores concluem que quanto mais os motoristas reagem a mesma informação, mais ineficiente é a sua escolha. Há uma tendência de que os motoristas escolham a mesma rota e portanto fiquem congestionados.

Apesar da semelhança com o ciclo ação/percepção dos agentes proposto nesta dissertação, a abordagem utilizada para a escolha de rotas no AVNET se baseia no cálculo de caminhos mínimos entre os pontos de origem e destino, não se restringindo a análise de regiões determinadas (ou vias) da rede. Uma conclusão dos autores, que poderá ser verificada nesta dissertação, é de que a reação à mesma informação, induz os agentes a fazerem escolhas semelhantes, e conseqüentemente ficam congestionados.

3.3 Comunicação

Seguindo a ideia de compartilhar informações sobre o estado da rede como investigado por Klügl e Bazzan (2004), Yamashita e colegas (2004) investigam os efeitos do compartilhamento das rotas entre os motoristas. O tipo de informação coletada/fornecida parte de uma abordagem preditiva, onde os motoristas informam suas rotas para que seja possível prever o estado da rede com base na sua posição futura. Este trabalho utiliza redes de tráfego semelhantes à rede Grade testada com o AVNET, mas com um modelo de tráfego veicular que não trata, por exemplo, do tempo de espera dos motoristas em intersecções e mudança de pista. Foram empregados três mecanismos de escolha de rotas: a rota mais curta, baseado na topologia da rede; a rota mais rápida, baseada no conhecimento que o motorista possui sobre o estado da rede; e a rota mais rápida usando as informações fornecidas por outros motoristas a respeito do estado da rede.

A informação sobre as rotas é utilizada para prever o estado da rede com base na posição futura dos motoristas. Cada aresta que compõem a rota do motorista é ponderada de acordo com o número de outros motoristas que também irão trafegar por aquele caminho. Conforme a distância atual de um motorista, maior será o peso de uma aresta que está

próxima de si, e menor será o peso de aresta que está distante. Entretanto esta abordagem tem um problema crucial: depende de uma autoridade central que receba e distribua as informações. Este é o tipo de coordenação que se quer evitar: os agentes precisam ter autonomia para escolher suas rotas, e lidar com ambientes de racionalidade limitada, quando não se pode saber sobre o estado do tráfego em toda a rede. Apesar disso, este trabalho salienta a importância da comunicação para estender a percepção dos agentes. O AVNET utiliza uma abordagem de comunicação entre os próprios agentes, o que de fato dá autonomia à tomada de decisão.

Pensando na comunicação descentralizada entre os agentes, é que Lin e colegas (2007) tem investigado os benefícios atingidos por agentes chamados “maliciosos” em redes veiculares, que transmitem informações falsas para outros agentes. Os autores exploram um protocolo de comunicação onde os agentes enviam informações falsas sobre o estado da rede, visando afastar outros agentes de uma via que compõem sua rota. Apesar do AVNET assumir que os agentes trocam apenas informações verdadeiras, a investigação de Lin e seus colegas considera uma série de aspectos importantes, e que são tratados no AVNET, como a memória que os agentes possuem do estado da rede, seja pela sua própria percepção ou da percepção estendida pela comunicação entre os veículos. Além disso, a representação da rede na forma de um grafo, o número de agentes e o tamanho da rede testada, são semelhantes aos padrões empregados nesta dissertação.

Os resultados apresentados pelos autores demonstram que o sucesso dos agentes maliciosos é limitado, em contraste a outros domínios como *e-commerce*. A dinamicidade das redes veiculares e o curto raio de alcance da comunicação entre os veículos, são apontados como os fatores responsáveis por isso. Estes resultados encorajam o AVNET a manter o foco nos efeitos da comunicação na percepção dos agentes sobre o estado da rede, sem se preocupar com o protocolo e a confiabilidade na troca de informações. Por outro lado, a investigação de Lin e seus colegas conclui indiretamente que as informações trocadas entre os motoristas auxilia na redução dos tempos de viagem, o que é desejável na abordagem investigada através do AVNET. Porém, diferentemente do que ocorre com o AVNET, a informação é utilizada para compor a memória do agente que será utilizada apenas nas próximas viagens, sem considerar o replanejamento de rota durante a viagem.

3.4 Resumo

As investigações apresentadas neste capítulo, permitem a comparação com alguns aspectos da abordagem proposta nesta dissertação, e também ajudam a salientar as diferenças existentes entre estas abordagens. A dificuldade de aplicar alguma forma de coordenação no tráfego veicular, ou simplesmente a falta de coordenação para este tipo de problema, leva os motoristas a tomarem decisões individuais, que dificilmente otimizam os ganhos do sistema. Entretanto, melhorar o balanceamento de carga em uma rede de tráfego veicular não só é desejável como imperativo.

Zheng e Chen tratam esta situação modelando funções de *payoff* capazes de refletir a heterogeneidade dos agentes, e também de medir de alguma forma o custo que a falta de coordenação acarreta. Já Galib e Moser procuram contornar a falta coordenação através da ação individual dos motoristas assistida pelo algoritmo MG. Tumer e colegas utilizam o *framework* COIN para discutir o alinhamento do sistema com as preferências dos agentes no intuito de reduzir o congestionamento. Klügl e Bazzan (2004) investigam os efeitos da comunicação, buscando formas eficientes de prever os volumes de tráfego em redes veiculares. Yamashita e colegas (2004) investigam os efeitos do compartilhamento das

rotas entre os motoristas, utilizando também uma abordagem preditiva. Lin e colegas utilizam a comunicação entre veículos para estudar os efeitos que agentes maliciosos podem causar ao espalhar informações falsas sobre o estado da rede, e indiretamente contribuem com a discussão sobre a importância da comunicação para otimizar os tempos de viagem.

Como vimos no decorrer deste capítulo, algumas abordagens possuem um detalhamento macroscópico que não permite avaliar o peso das ações individuais. Outras avaliam situações onde a rede de tráfego e o número de agentes é muito pequeno para verificarmos situações do mundo real. O AVNET por sua vez, investiga ações e percepções distintas e sua influência sobre o balanceamento de carga em redes de tráfego veicular. Pretende-se que esta abordagem avalie situações reais, onde o peso das ações individuais seja levado em consideração.

4 ABORDAGEM AVNET

É cada vez mais comum encontrarmos a tecnologia da informação aplicada à otimização do tráfego veicular. Algumas soluções estão mais ligadas à infraestrutura, enquanto outras, ao motorista. Com o foco no motorista, a Seção 2.1 discutiu o impacto causado pela tecnologia aplicada à difusão de informações sobre o estado da RTV. A verificação deste impacto antes de implantar a tecnologia na prática, se faz por meio da simulação de tráfego veicular. No entanto, as soluções consolidadas e amplamente utilizadas, têm uma abordagem macroscópica, que consiste em verificar o tráfego de um modo geral, sem levar em conta o comportamento do motorista em particular. Ao desconsiderarmos a individualidade do motorista, já não é possível investigar o efeito da informação sobre o seu mecanismo de decisão. A solução proposta na Seção 2.4, passa por uma abordagem baseada em MSBA, onde os motoristas são tratados como agentes autônomos, que decidem qual rota trafegar baseados em suas próprias percepções e mecanismo decisório.

As discussões do Capítulo 3 mostram que existem soluções focadas na modelagem do mecanismo de decisão dos motoristas. Ocorre que há abordagens macroscópicas que estão mais preocupadas em analisar os resultados globais, faltando uma análise das ações individuais do motorista. Outras soluções levam em conta o mecanismo de decisão do motorista, mas a sua simplificação não permite a reprodução de cenários mais complexos, por exemplo, tratando do replanejamento durante a viagem. Há também as soluções que são computacionalmente muito caras, que acabam restritas a cenários limitados, seja pelo tamanho, seja pela riqueza de detalhes que deixa de abstrair. Contrapondo a necessidade apresentada no Capítulo 2 e as soluções mostradas no Capítulo 3, esta dissertação propõe uma modelagem e simulação baseada em agentes para avaliação do balanceamento de carga em redes veiculares, que permita investigar a interação entre oferta, demanda e agentes. Os agentes possuem ações e percepções distintas, o que impacta diretamente no balanceamento de carga em redes de tráfego veicular. A abordagem proposta pelo AVNET será discutida na Seção 4.1, enquanto sua estrutura será detalhada no nível da oferta, demanda e agentes no decorrer da Seção 4.2. Sumariamente, a Seção 4.3 resume a abordagem do AVNET e introduz uma arquitetura para sua implementação.

4.1 Apresentação do AVNET

Em um cenário onde os motoristas trafegam cotidianamente de casa para o trabalho, todos esperam chegar aos seus destinos dentro do tempo estimado. Com este propósito, os motoristas tomam decisões individuais sobre quais rotas usar. Estas decisões não obedecem a nenhum tipo de coordenação e improvavelmente levam ao uso balanceado da RTV. Entretanto, uma situação de tráfego balanceado é de interesse coletivo, permitindo reduzir os tempos médios de viagem com o passar do tempo. Como proposto no Capítulo

1, esta dissertação estuda o impacto ao balanceamento de carga de uma RTV, causado pela distribuição dos motoristas e suas capacidades de percepção e adaptação, ainda que não exista nenhum tipo explícito de coordenação.

O estudo realizado nesta dissertação propõe o AVNET, uma modelagem e simulação baseada em agente para avaliar o balanceamento de carga em RTV's. O principal objetivo do AVNET é investigar a interação oferta, demanda e agentes, considerando a percepção que o agente possui do tráfego e a consequente adaptação através da mudança de rota durante a viagem. A Figura 1.1 mostra de um lado a RTV (ícone à esquerda) e de outro o agente (ícone à direita), constituindo um ciclo fechado, retroalimentado, onde a situação do ambiente influencia na percepção do agente, e a ação do agente influencia na situação do ambiente. Conforme apresentado no Capítulo 1, através do AVNET espera-se responder a seguinte questão: **Conforme as condições de oferta e demanda do ambiente, e de percepção/ação dos agentes que trafegam na RTV, como será o balanceamento de carga nesta RTV?**

O AVNET parte do pressuposto que devemos aproveitar a infraestrutura já existente, utilizando recursos tecnológicos que colaborarem com o motorista na sua tomada de decisão. Enquanto a expansão viária cria alternativas de rotas, ou expande as rotas saturadas, o AVNET pressupõe que a infraestrutura existente é subutilizada. É por isso que o balanceamento de carga têm grande importância. Quando algumas (poucas) vias estão saturadas é um indicativo de que existem vias secundárias pouco utilizadas. O balanceamento de carga consiste na dispersão do tráfego, direcionando os motoristas das áreas de maior concentração para as áreas de menor concentração. O objetivo é reduzir as áreas de saturação, procurando um uso equilibrado da infraestrutura existente, através da dispersão dos motoristas pela rede.

No entanto, o balanceamento de carga sofre o impacto de características inerentes à RTV e à demanda. Em algumas situações é mais difícil dispersar o tráfego porque existem poucas rotas alternativas. Em outras situações, as características de concentração da demanda dificultam a dispersão do tráfego, pois as origens e destinos estão necessariamente concentradas em poucos locais da rede. Há também a combinação entre as características da rede e da demanda que, juntas, influenciam sobremaneira na dispersão ou concentração do tráfego. Ao somarmos as características da RTV e da demanda ao mecanismo decisório dos motoristas, temos um cenário ainda mais complexo. Mas esta complexidade precisa ser investigada, se quisermos saber os impactos que estes três elementos combinados têm sobre o balanceamento de carga do tráfego veicular. Por esta razão o AVNET propõe a investigação dos efeitos resultantes da interação entre oferta, demanda e motoristas, considerando ainda que os motoristas podem ter diferentes características de percepção e ação.

4.2 Estrutura do AVNET

O AVNET trata a movimentação dos veículos na RTV em duas camadas, uma tática e outra estratégica. Na camada tática, os veículos executam movimentos que obedecem às regras do CA apresentadas na Seção 2.2. Na camada estratégica, os motoristas tomam decisões a partir da sua própria percepção, empregando mecanismos para a escolha de rotas conforme apresentado na Seção 2.3. Para governar o movimento dos veículos, a camada tática representada pelas regras do CA, atende a necessidade do AVNET. Já a camada estratégica depende de um modelo de motorista (ou agente), que permita investigar os efeitos que distintas ações e percepções têm sobre o balanceamento de carga do

tráfego veicular. A modelagem decisória do motorista parte de uma abordagem baseada em MSBA, conforme discutido na Seção 2.4. Deste modo, o motorista passa a ser considerado um agente que atua em um ambiente onde interage com outros agentes.

Além do motorista, vimos na Seção 4.1 que para investigar o balanceamento de carga no tráfego veicular, é necessário considerar as características da RTV (oferta) e da demanda. A Seção 2.3 discutiu os aspectos que envolvem a oferta e a demanda. Na Seção 4.1 discutiu-se o impacto que oferta e demanda detém sobre o balanceamento de carga no tráfego veicular. Esta visão abrangente do problema do tráfego veicular, que relaciona oferta, demanda e motoristas ao mesmo tempo, é fundamental para compreendermos o impacto de certas estratégias sobre os congestionamentos. Se tratarmos apenas de um destes aspectos, teremos apenas uma versão do problema. Ao tratarmos de dois destes aspectos combinados, estamos excluindo os efeitos que o aspecto ignorado tem sobre os demais. No entanto, se pudermos visualizar a interação entre os três, teremos uma visão mais abrangente que poderá trazer respostas mais próximas do nosso cenário de tráfego veicular da atualidade.

Considerando esta necessidade de investigar a interação entre as condições de oferta (RTV), demanda (viagens) e as características dos motoristas (agentes) e o seu impacto sobre o balanceamento de carga no tráfego veicular, é que o AVNET determina as características desejadas para cada um destes elementos. No decorrer deste capítulo serão discutidos individualmente os três aspectos, oferta (Seção 4.2.1), demanda (Seção 4.2.2) e agentes (Seção 4.2.3).

4.2.1 AVNET sob a perspectiva da oferta

Conforme introduzido na Seção 2.3, a oferta é a capacidade da infraestrutura de transporte. Em outras palavras, é a própria RTV. O modelo da RTV poderá descrever as características topológicas de um ambiente real ou até mesmo de um ambiente abstrato, de acordo com a necessidade. A depender desta necessidade, as características podem descrever uma RTV com um grande número de rotas alternativas para qualquer ponto ou com poucas rotas alternativas; com algumas vias arteriais de trânsito rápido ou apenas com vias de trânsito lento. Naturalmente que estas características impactam diretamente no balanceamento de carga desta RTV. Além da natureza topológica, há ainda a capacidade da rede que precisa ser considerada. Uma RTV pode suportar um grande número de veículos, ou apenas alguns veículos; além disso, a capacidade da RTV pode ser maior em áreas específicas do mapa.

Em geral, para a representação da oferta em termos de infraestrutura, são utilizados modelos da teoria dos grafos. A Figura 4.1 faz alusão à abstração da RTV, partindo de uma visão topológica do ambiente, e a partir daí, identifica os nodos e arestas que irão compor o grafo. Partindo do mapa de uma cidade ou de um cenário abstrato, são criadas as RTV's, onde as intersecções são os nodos e as vias são as arestas de um grafo. Para o AVNET, esta estrutura de grafo é suficiente para modelar o mecanismo de escolha de rotas dos agentes em termos de oferta.

4.2.2 AVNET sob a perspectiva da demanda

A Seção 2.3 define que a demanda por transporte pode representar a localização das áreas residenciais e comerciais (deslocamento diário de casa para o trabalho). Para o AVNET, a modelagem da demanda possui um tamanho e uma distribuição. O tamanho é o número de viagens, enquanto a distribuição representa as áreas onde estão os pontos de origem e destino. Por exemplo, uma distribuição uniforme dispersa as origens e desti-

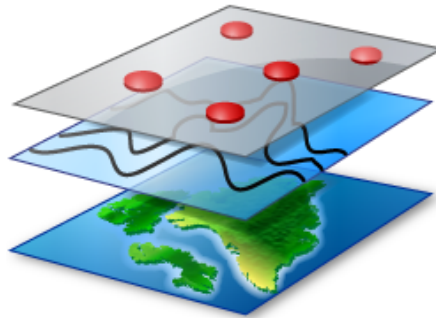


Figura 4.1: Abstração de uma RTV em grafo.

nos pela RTV com probabilidades iguais de qualquer nodo da RTV ser escolhido. Uma distribuição arbitrária, por outro lado, determina quais locais da rede concentrarão mais pontos de origem ou de destino. Tanto o tamanho quanto a distribuição estão diretamente relacionadas a RTV. A capacidade da RTV influencia no tamanho da demanda, enquanto a sua topologia influencia na distribuição da demanda. Em suma, a modelagem da demanda do AVNET é realizada através de um conjunto de pares origem-destino, onde cada ponto representa um nodo da RTV, gerados a partir de uma distribuição aleatória, com probabilidade uniforme ou arbitrária. O método para geração destes pontos é apresentado na Seção 5.2.2.

Diferentes tamanhos de demanda permitem investigar diferentes níveis de ocupação da RTV. Quanto maior o tamanho da demanda, maiores as chances de congestionamento. Os níveis de ocupação serão mais ou menos sensíveis às tentativas de balanceamento de carga, dependendo do tamanho e da distribuição da demanda. Uma demanda pequena em relação ao tamanho da RTV, possivelmente não terá benefícios com a tentativa de balancearmos a carga, porque raramente apresenta congestionamentos. Uma demanda muito grande em relação ao tamanho da RTV também dificultará a tentativa de balancearmos a carga, pois a saturação do tráfego é tamanha, que até mesmo as rotas alternativas estarão congestionadas. Por estas razões, a variabilidade do tamanho da demanda é fundamental para a investigação do balanceamento de carga. Ao alternarmos o tamanho, podemos verificar o impacto que a quantidade de viagens exerce sobre os congestionamentos.

Como dito no parágrafo anterior, as tentativas de balancearmos a carga também dependem da distribuição da demanda. Uma demanda uniforme dispersa o tráfego *a priori*, otimizando a utilização da RTV. Nesta distribuição, o surgimento de congestionamentos é mais provável nas áreas de maior capacidade da rede. Por se tratar de uma distribuição uniforme, espera-se que as áreas maiores recebam mais pontos de origem e destino. Entretanto, esta distribuição raramente é encontrada na prática. Daí a necessidade de utilizarmos uma distribuição arbitrária. Nesta distribuição, podemos definir, com base em observações ou coletas de dados reais, as concentrações de origem e destino de cada local. É de se esperar que os locais com maior concentração, ou ainda, os locais que ligam as áreas de maior concentração, estejam mais congestionados. Por estas razões, a variabilidade da distribuição da demanda é importante para investigação do balanceamento de carga. Ao alternarmos o tipo de distribuição, podemos verificar o impacto exercido sobre os congestionamentos.

4.2.3 AVNET sob a perspectiva do agente

A necessidade de investigação do impacto causado pela tecnologia da informação sobre o comportamento dos motoristas, conforme discutido na Seção 2.1, exige a utilização de modelos de simulação compatíveis com a granularidade do problema investigado. Na Seção 2.1, vimos que é fundamental tratar as características do ambiente e do próprio motorista em detalhes, utilizando uma modelagem compatível com o problema. Especificamente com relação ao motorista, discutiu-se na Seção 2.4, que uma modelagem baseada em MSBA permite tratar o motorista com a riqueza de detalhes necessária. Neste modelo, o motorista é tratado como um agente autônomo, que possui uma capacidade de percepção e um mecanismo decisório (ação), que lhe permitem o planejamento dos seus deslocamentos pela RTV.

As Seções 4.2.1 e 4.2.2, determinam, respectivamente, que a variabilidade da oferta e da demanda são fundamentais para investigação do balanceamento de carga. Além disso, também devemos considerar a variabilidade das próprias características dos agentes, tratando da sua heterogeneidade da capacidade de percepção e ação. Isto permite verificar o impacto que características distintas terão sobre a dispersão dos agentes pela RTV. O AVNET classifica os agentes conforme suas capacidades de percepção e de ação. A percepção poderá ser completa, parcial e parcial estendida pela comunicação com outros agentes (comunicação V2V, introduzida na Seção 2.1). A ação corresponde à capacidade de replanejar a rota durante a viagem, visando a adaptação às mudanças ocorridas no ambiente. A seguir, estas características serão discutidas na forma de tópicos.

Percepção do tráfego - a percepção que o agente possui do estado da RTV representa o custo para trafegar pelas arestas desta rede RTV. Este custo é determinado por uma função que será apresentado na Seção 5.2.3. Se a percepção que o agente possui é completa, ele processará o estado de todas arestas da RTV para calcular sua rota. Se a percepção é parcial, o agente processará o estado apenas das arestas por onde trafegou, consultando as informações armazenadas na sua memória (histórico).

Comunicação V2V - Para expandir a capacidade de percepção parcial dos agentes, é empregada a comunicação V2V. Desta forma, o motorista (receptor) consulta os custos de trafegabilidade aos demais motoristas (transmissores), obedecendo a um raio de comunicação limitado, o que faz uma analogia às redes de transmissão sem fio. Após o recebimento das informações solicitadas, o agente armazena a média dos custos recebidos representando a média dos conhecimentos dos agentes transmissores.

Replanejamento em viagem - O replanejamento em viagem permite que o motorista recalcule sua rota do local onde está até o ponto de destino. O conhecimento dos custos da RTV, completo ou parcial (com ou sem comunicação), serão utilizados durante o replanejamento.

A combinação de diferentes capacidades de ação e percepção origina a existência de seis tipos de agentes. Assim, o AVNET possibilita avaliar o impacto que diferentes ações e percepções causam sobre o balanceamento de carga. A Tabela 4.1 mostra estas combinações e os tipos de agentes daí provenientes.

As capacidades de percepção estão combinadas com a habilidade/inabilidade dos agentes replanejarem suas rotas durante a viagem. Deste modo é possível verificar o impacto que a percepção do agente exerce sobre o balanceamento de carga, com ou sem

Tabela 4.1: Resumo dos tipos de agentes.

Percepção	Replanejamento	Símbolo
Completa	Não	F (<i>Full</i>)
	Sim	FR (<i>Full+Replan</i>)
Parcial	Não	P (<i>Partial</i>)
	Sim	PR (<i>Partial+Replan</i>)
Parcial e Comunicação	Não	PC (<i>Partial+Replan</i>)
	Sim	PCR (<i>Partial+Comm.+Replan</i>)

a habilidade de replanejar as rotas durante a viagem. Isso permitirá investigar o quanto um determinado tipo de agente é influenciado pela capacidade de replanejar suas rotas. Este modelo de agente, com capacidades distintas de ação e percepção, ocasiona a variabilidade necessária para avaliarmos a interação entre oferta, demanda e motoristas. Cada um destes três aspectos varia de alguma forma: a oferta e distintas topologias, a demanda e distintos tamanhos e distribuição, os motoristas e seus diversos tipos. Para o AVNET é fundamental que exista esta diversidade, pois cada elemento tem um impacto sobre o balanceamento de carga, e os efeitos dos três juntos precisa ser investigado. Na Seção 4.3, será tratado da interação entre oferta, demanda e agentes.

4.3 Resumo - AVNET = oferta + demanda + agentes

Na Seção 4.2.1 foram apresentadas as características da oferta, ou RTV, e a importância da sua variabilidade para a investigação do balanceamento de carga. Na Seção 4.2.2 discutiu-se as características da demanda e a importância de explorarmos as variações destas características. Finalmente na Seção 4.2.3 foram apresentados os agentes, suas características e os tipos decorrentes das combinações destes atributos.

Para o AVNET, oferta, demanda e agentes não podem ser investigados isoladamente. É fundamental que os três sejam considerados ao mesmo tempo, avaliando o impacto que um têm sobre o outro. De um modo geral, este capítulo apresentou a modelagem da oferta, através de grafos; da demanda através de um conjunto de pontos de origem e destino; e dos agentes, atribuindo-lhes características de percepção e ação que definem seu mecanismo decisório. Naturalmente foram discutidas apenas as características de cada modelo, pois as especificidades de cada um fazem parte da arquitetura que lhes implementa.

Portanto, a abordagem do AVNET prevê interação entre oferta, demanda e agentes, assim como as características de cada uma destas partes. Esta interação, por sua vez, só é possível dentro de um ambiente de simulação, onde a arquitetura do AVNET será implementada. Esta arquitetura, que é apresentada no Capítulo 5, define como cada uma das partes é construída e os mecanismos que estabelecem a interação entre elas.

5 METODOLOGIA

Durante a apresentação do AVNET na Seção 4.1, foi proposta a investigação da interação entre três elementos: oferta, demanda e diferentes tipos de agentes. No decorrer da Seção 4.2 e subseções, discutiu-se a estrutura do AVNET, sua abordagem, detalhando o papel de cada elemento. Este capítulo, por sua vez, apresenta a arquitetura que implementa esta abordagem proposta pelo AVNET. Entretanto, antes da definição da arquitetura propriamente dita, a Seção 5.1 apresenta o ambiente de simulação ITSUMO, sobre o qual a arquitetura é implementada. Posteriormente, a Seção 5.2 expõe a implementação da oferta, demanda e agentes para a construção do AVNET.

5.1 ITSUMO

O ITSUMO, *Intelligent Transportation System for Urban Mobility* (SILVA et al., 2006; BAZZAN et al., 2010, 2011), é uma ferramenta de código aberto que permite modelar os atores do tráfego (e.g. motoristas, semáforos) como agentes autônomos; lida com controle semafórico e com replanejamento durante a viagem, permitindo estudar a interação entre ambos, demanda e oferta. Isto é obtido através de técnicas de inteligência artificial, em geral, e técnicas baseadas em agentes, em particular. É possível acoplar medidas de controle semafórico baseadas em aprendizagem de máquina, e investigar a reação dos motoristas à estas medidas. Também é possível aplicar diferentes técnicas de escolha de rotas.

Além do código-fonte não comercial, é uma das poucas ferramentas que são realmente baseada em agentes (portanto microscópico), o que é fundamental para a construção do AVNET. O simulador é composto por cinco módulos: núcleo (*kernel*), base de dados, controle, demanda (motoristas) e módulo de saída (visualização e estatísticas). A Figura 5.1 mostra os principais componentes de cada módulo e a interação entre eles. Nas subseções a seguir, cada módulo é apresentado detalhadamente.

5.1.1 Núcleo do Simulador

Em contraste com os modelos macroscópicos de simulação, no paradigma baseado em agentes cada objeto pode ser descrito com tantos detalhes quanto se deseje, permitindo um modelo mais realista de motoristas. Em uma abordagem baseada em agentes, ambos, viagens e/ou escolha de rotas, podem ser consideradas, o que é a chave para a simulação de tráfego veicular desde que estas escolhas vão se tornando cada vez mais complexas. Também, semáforos podem ser modelados individualmente de acordo com várias abordagens, desde a clássica coordenação *off-line*, para as recentes propostas de aprendizado por reforço (OLIVEIRA et al., 2006; WASKOW; BAZZAN, 2010) e inteligência de enxames

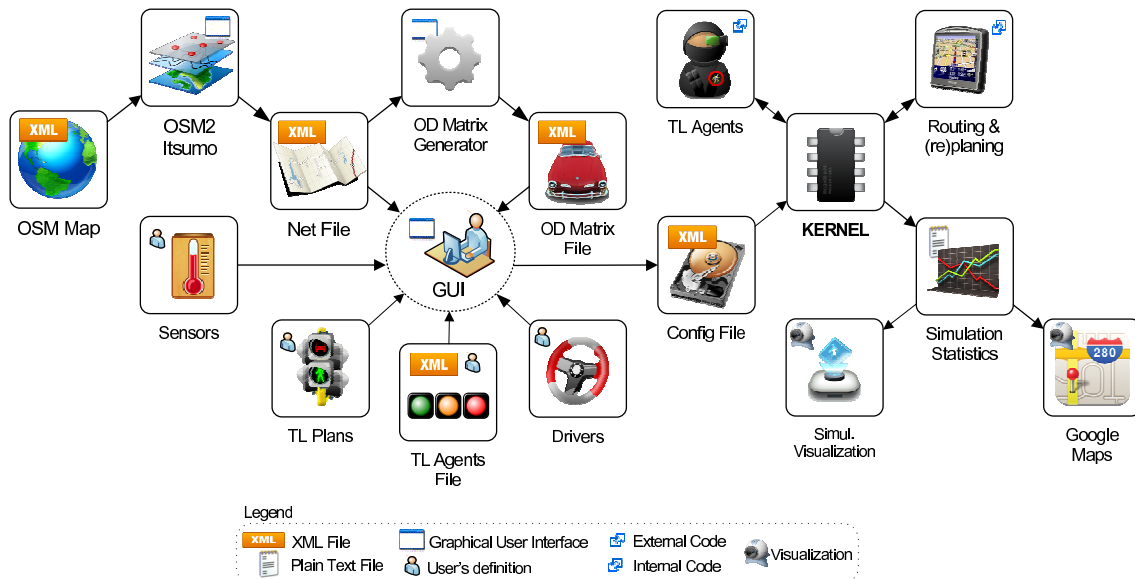


Figura 5.1: Interação entre os módulos do ITSUMO.

(OLIVEIRA; BAZZAN, 2007), etc.

De modo a obter a simplicidade e o desempenho necessários, o núcleo do ITSUMO utiliza o modelo de *Nagel-Schreckenberg* (Na-Sch) de autômato celular (CA) para a movimentação dos veículos, introduzido na Seção 2.2. Conforme Bazzan e colaboradores (2010), a simplicidade do modelo CA implementado (em C++) pelo ITSUMO é eficiente o bastante para simulação de tráfego veicular em tempo real. A simulação ocorre em passos discretos e é implementada como uma série de atualizações na posição dos veículos na RTV.

5.1.2 Base de Dados

O módulo *base de dados* cria, atualiza os dados dinâmicos e armazena os objetos estáticos e dinâmicos para serem utilizados na simulação, ambos relacionados à infraestrutura (oferta) e com a demanda. Os dados dinâmicos correspondem a tudo que ocorre durante a simulação, como a posição dos veículos, velocidade, estado da rede, etc. Já os dados estáticos correspondem, por exemplo, a topologia da RTV, e os pontos de origem e destino que compõem a demanda. Com relação à RTV, os principais atributos são: coordenadas cartesianas das intersecções, caracterização das vias (número de faixas, etc.) e plano semaforicos (conjunto de movimentos permitidos de pista-para-pista). Com relação à demanda, os dados armazenados são: taxa de inserção de veículos em um dado nodo da RTV; origem e destino dos motoristas, etc. Em (SILVA et al., 2006) é possível ver mais detalhes sobre estes atributos.

As informações que compõem uma RTV podem ser inseridas manualmente, através de uma GUI, ou importadas do *Open Street Maps* (OSM)¹ através da aplicação *OSM2ITSUMO*. Utilizando o primeiro método, cada componente da RTV é inserido pelo usuário. Este processo consome tempo, está sujeito a erros e na prática deve ser utilizado apenas com RTV's pequenas. Para mapas maiores, a alternativa é utilizar o segundo método. Contudo, o formato XML utilizado pelo OSM é diferente do formato utilizado no ITSUMO, o que exigiu a criação de um *parser* para capturar os dados do OSM. O

¹Disponível em www.openstreetmap.org.

detalhamento desta ferramenta pode ser encontrado em (BAZZAN et al., 2010).

A Figura 5.2 mostra a estrutura de uma RTV no ITSUMO. Conforme foi apresentado na Seção 4.2.1, do ponto de vista da oferta, uma RTV pode ser modelada como um grafo. Para estabelecer uma rota entre os pontos de origem e destino, a abstração em forma de grafo é o bastante. Entretanto, como o ITSUMO é um simulador microscópico, é preciso tratar a RTV com uma granularidade muito mais fina, prevendo estruturas complexas como as vias (*streets*), as seções (*sections*), os conjuntos de pistas (*lanesets*), os cruzamentos que poderão ou não ter controle semafórico, e finalmente as pistas e sua divisão em células. Ao mapearmos a estrutura de uma RTV do ITSUMO para um grafo, consideramos apenas os cruzamentos, que serão os nodos, e as *lanesets*, que serão as arestas do grafo.

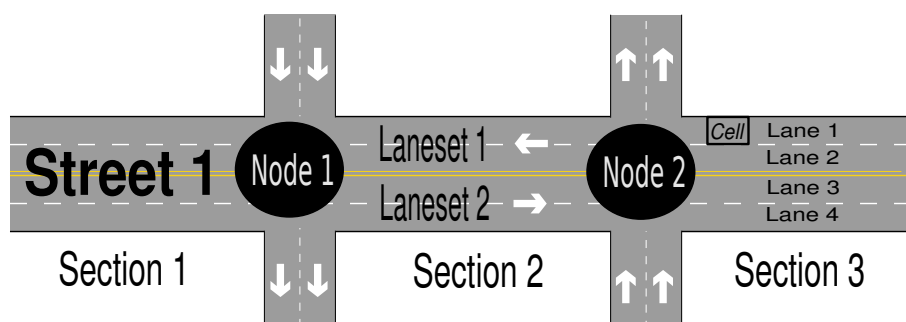


Figura 5.2: Estrutura da RTV no ITSUMO.

Similarmente à criação da topologia da RTV, há dois métodos para criar planos semafóricos no ITSUMO (lembrando que isto é opcional; a simulação poderá ser executada mesmo sem a existência de semáforos ou planos semafóricos). Os planos podem ser criados manualmente ou automaticamente. Na primeira forma, o usuário deverá informar manualmente a descrição completa de todos os planos para cada intersecção semaforizada. Para cada plano semafórico, fases devem ser definidas (utilizando o mouse para conectar pistas de entrada e saída), seus tempos de ciclo e *splits*. Este também é um processo que consome tempo. Se a RTV possui muitas intersecções semaforizadas, o ITSUMO provê um gerador automático de planos semafóricos. O usuário deverá informar o tempo de ciclo, que será dividido igualmente entre todos os movimentos permitidos. Naturalmente será gerado apenas um plano simplificado; entretanto, o usuário poderá editar o plano (usando a mesma interface para edição manual) e alterará-lo como desejar.

5.1.3 Controle: módulo de agentes semafóricos

No ITSUMO o módulo de controle de semáforos é implementado e executado através de agentes semafóricos. Estes agentes podem controlar uma ou mais intersecções, usando o mesmo método de controle, ou métodos diferentes. Isto se deve ao fato dos agentes serem independentes para tomar suas próprias decisões levando em consideração as informações disponíveis e utilizando seus próprios algoritmos. A informação disponível pode inclusive vir de outros agentes semafóricos, evitando que um agente utilize informações excessivamente locais. Em suma, os agentes semafóricos podem ser heterogêneos e lidar com congestionamento de diferentes formas.

Algumas classes básicas para criação de agentes semafóricos auxiliam o desenvolvimento dos controladores de tráfego. Estes agentes são organizados em uma estrutura de dados que é mantida a parte do simulador. O usuário não precisa manipular os códigos

do núcleo do simulador. Além disso, se o usuário desejar criar seus próprios métodos de controle, isto poderá ser feito facilmente (na linguagem de programação que desejar). A comunicação entre os agentes e o núcleo da simulação usa *sockets*, o que permite o núcleo informar aos agentes sobre o estado da rede, e receber destes as ações de controle desejadas (qual plano semafórico será utilizado na intersecção).

5.1.4 Motoristas

O ITSUMO pode gerar demandas com distribuição uniforme ou OD, através da leitura de uma matriz de origens e destinos. Para cada par origem-destino que compõe a demanda, haverá um motorista atribuído para obter e percorrer o caminho entre estes dois pontos. Este ponto está em contraste com o modelo básico Na-Sch onde os veículos são tratados como partículas individuais sem rota definida. Os veículos Na-Sch são roteados a cada intersecção com uma probabilidade de virar à esquerda, à direita ou seguir em frente. Anteriormente, o ITSUMO permitia basicamente a criação de veículos Na-Sch, ou a definição de uma rota por um caminho pré-determinado para veículos chamados *floating cars* (FC). Quando a definição de rotas é manual, na prática, não se pode utilizar muitos veículos. Com as extensões realizadas no ITSUMO agora é possível gerar rotas para os veículos a partir de vários algoritmos, como por exemplo, ARA* (LIKHACHEV et al., 2008) - um algoritmo heurístico de busca (anytime repairing A*), Dijkstra, A*, etc.

Alguns destes algoritmos para escolha de rotas foram testados e comparados por Bazzan e colaboradores (2010). Independentemente dos algoritmos utilizados, o roteamento pode ser feito tanto de forma centralizada (rotas computadas e atribuídas para os veículos) como de forma descentralizada, que é a forma utilizada pelo AVNET. O caso centralizado é trivial e trabalha como os simuladores comerciais: dada uma matriz OD, um algoritmo computa rotas para cada motorista, simula as viagens, e reatribui rotas até que um equilíbrio seja encontrado. No caso descentralizado, cada motorista computa sua própria rota baseado na sua própria estratégia e conhecimento.

Para maximizar o número de veículos trafegando simultaneamente em uma RTV, evitando que fiquem bloqueados, o ITSUMO possui um mecanismo de manipulação de bloqueios (*deadlock handler*). Quando não há espaço disponível na próxima aresta da rota, o ITSUMO retira temporariamente o motorista da simulação, ao invés de deixá-lo esperando e bloqueando a passagem no cruzamento. Para que o motorista seja reinserido na simulação, duas condições precisam ser satisfeitas: primeiro, a próxima aresta da rota não poderá mais estar completamente ocupada; segundo, a aresta de onde o motorista saiu da simulação e para onde voltará, não poderá estar com sua capacidade de ocupação acima de 80%, para evitar novos bloqueios nas arestas adjacentes. O tempo de viagem para os motoristas que foram retirados temporariamente da simulação, será o somatório entre o tempo trafegado e o tempo de espera.

5.1.5 Saída: Estatísticas e Visualização

O ITSUMO possui sensores que coletam e armazenam em arquivos de texto puro todos os tipos de informações sobre o cenário que está sendo simulado, como por exemplo, taxa de ocupação das pistas, a velocidade média dos veículos nas vias, a posição dos veículos em intervalos pré-determinados de tempo, etc. Este último sensor permite a visualização do movimento dos veículos com o passar do tempo, possibilitando uma avaliação qualitativa (visual) do resultado da simulação. Os demais sensores fornecem dados brutos de onde serão extraídas estatísticas, para que o usuário avalie quantitativamente o resultado das simulações.

5.2 Arquitetura do AVNET

A arquitetura do AVNET é composta por três camadas, dispostas de acordo com a Figura 5.3. Cada camada representa o nível de um processo dividido em entrada, processamento e saída. A camada de entrada compreende os agentes, a oferta e a demanda (apresentados no Capítulo 4); a camada de processamento é o ambiente de simulação ITSUMO (introduzido na Seção 5.1) onde os elementos da camada de entrada interagem, e de onde os resultados serão extraídos para a camada de saída. Na sequência desta seção, serão detalhadas a arquitetura da oferta (5.2.1), da demanda (5.2.2) e dos agentes (5.2.3).

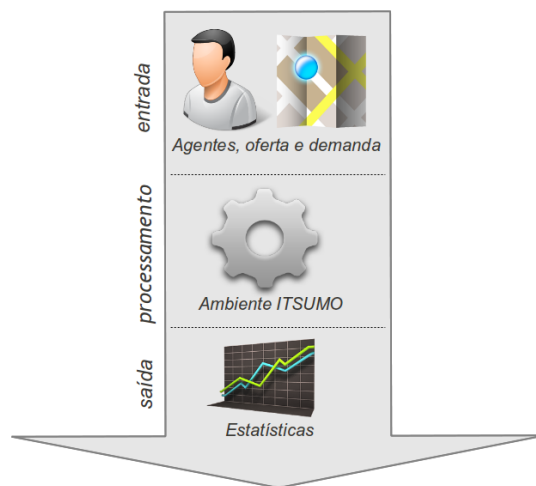


Figura 5.3: Etapas do processo.

5.2.1 Oferta

A Seção 2.3 introduziu o conceito de oferta (RTV) nas simulações de tráfego veicular, enquanto a Seção 4.2.1 discute a oferta no contexto do AVNET, com destaque a sua abstração na forma de um grafo. Esta seção, por sua vez, aborda a implementação da oferta no ITSUMO. Se para o AVNET a abstração na forma de um grafo é o bastante, para o ambiente de simulação a RTV é descrita muito além de nodos e arestas. Por se tratar de um simulador microscópico, o ITSUMO abstrai o maior número de características possíveis da RTV, o suficiente para reproduzir as regras do CA, apresentadas na Seção 2.2. Conforme a Figura 5.2, vimos que uma RTV para o ITSUMO é composta por vias (*streets*), seções (*sections*), conjuntos de pistas (*lanesets*), as intersecções que poderão ou não ter controle semafórico, e finalmente as pistas e sua composição mais fina, as células do CA. Este detalhamento da RTV permite modelar microscopicamente um ambiente de tráfego urbano qualquer. Portanto, a oferta é implementada nos termos de uma RTV no ITSUMO.

5.2.2 Demanda

Também na Seção 2.3, foi introduzido o conceito de demanda nas simulações de tráfego veicular, que é a expressão das necessidades de transporte em uma RTV. Na Seção 4.2.2, discutiu-se que a distribuição da demanda tem grande impacto na investigação dos congestionamentos. Devido a esta necessidade de variar a distribuição de demanda, o AVNET trata de demandas de dois tipos:

- **OD:** proveniente de alguma medida baseada em uma matriz de origens e destinos (Matriz OD);

- **Uniforme:** um caso especial de demanda OD, onde as probabilidades dos nodos serem escolhidos como origem ou destino são uniformes.

A demanda OD depende da escolha dos nodos da RTV e suas respectivas probabilidades de serem sorteados como pontos de origem ou destino, com base em uma matriz OD. Uma matriz OD M é uma matriz de ordem $n \times m$, onde n é o número de nodos escolhidos para serem pontos de origem e m o número de nodos escolhidos para serem pontos de destino. Cada posição da matriz informa a probabilidade do par OD ser selecionado. Por exemplo, um elemento M_{ij} informa a probabilidade de um par OD, com origem no nodo i e destino no nodo j , ser escolhido. O somatório das linhas e colunas é uma importante propriedade da Matriz OD. Enquanto o somatório de todos os elementos da linha i informa a probabilidade do nodo i se tornar um ponto de origem, o somatório de todos os elementos da coluna j informa a probabilidade do nodo j se tornar um ponto de destino. Por exemplo, a probabilidade total p de um nodo de origem i ser selecionado, independentemente do nodo de destino, estará distribuída entre todas as posições da linha i . Os pontos de origem e destino são escolhidos através de um método de roleta, onde cada par possui um espaço proporcional M_{ij} .

A geração da demanda uniforme é um caso específico onde as probabilidades da matriz OD são constantes. Em suma, consiste em escolher aleatoriamente com probabilidade uniforme, pontos de origem e destino. Independe da escolha de nodos específicos da RTV e da definição das probabilidades, porque, além de todos os nodos serem utilizados no sorteio, todos possuem a mesma probabilidade de serem selecionados.

5.2.3 Agentes

As Seções 2.4 e 4.2.3 estabelecem que os motoristas do AVNET são modelados através de uma abordagem baseada em agentes. Mais especificamente na Seção 4.2.3, é apresentada a classificação dos agentes em tipos, oriundos da combinação entre as suas capacidades de ação e percepção, cujas características foram detalhadas na Seção 4.2.3. A seguir, serão relacionados o modelo e a implementação, mostrando na prática como são realizados o cálculo de rotas, a percepção do tráfego, a comunicação V2V e o replanejamento durante a viagem.

Cálculo da rota - O planejamento ou replanejamento das rotas, para qualquer configuração de experimentos, é realizado pelo algoritmo A*, onde a heurística é a distância euclidiana entre os pontos de origem e destino, e os custos utilizados pelo algoritmo refletem a percepção que o motorista possui do estado da rede (ver o próximo item - “Percepção do tráfego”). O A* foi escolhido com base no seu desempenho em comparação a outros métodos, como pode-se constatar na publicação de Bazzan e colaboradores (2011). Ao entrar em uma nova aresta, a percepção do agente é atualizada, guardando a informação sobre o estado da aresta de onde o agente acabou de sair.

Percepção do tráfego - O custo da aresta é calculado com base na sua ocupação. Para isto é tomado como base a velocidade máxima possível dada a condição particular de uma determinada aresta.

A ocupação da aresta é vista como um tipo de distância artificialmente aumentada (BAZZAN et al., 2011). Com a velocidade máxima v um veículo pode chegar a uma aresta e^i como é dado por:

$$v = \min\{v_{max}, (N_c^i - N^i)/N^i\} \quad (5.1)$$

onde v_{max} é a velocidade máxima permitida derivada do modelo Na-Sch de autômato celular (CA), N_c^i é o número de células da aresta (considerando todas as pistas da *laneset*), ou seja, o número máximo de veículos que cabem na aresta; N^i é o número corrente de veículos na aresta. O tamanho artificial L^i da aresta i é computado a partir de: $L^i = l^i \times \frac{v_{max}}{v}$ onde l^i é o comprimento (em metros) de e^i .

Para ilustrar a ideia, imagine que $N_c^i = l^i = 100$ e $v_{max} = 3$. Com menos de 25 veículos em e^i , todos poderão trafegar com v_{max} , uma vez que o comprimento da aresta será $L^i = l^i = 100$ (sem penalidade). Se, por exemplo, $N^i = 90$, o custo da aresta pode ser penalizado exponencialmente: $N^i = 90$, $L^i = 100 \times \frac{3}{0.11} = 2700$.

Comunicação V2V - O agente que possui habilidade de se comunicar, além de armazenar os custos das arestas por onde trafegou, também receberá informações sobre custos conhecidos por outros agentes. Quando um agente *receptor* chega ao final de uma aresta, solicita informações aos agentes *emissores* sobre os custos nas arestas da RTV. Para simular o raio de comunicação de uma rede sem fio, receptor e emissores só podem se comunicar quando estiverem localizados na mesma aresta. Cada emissor informa o custo de todas as arestas da RTV para os quais ele possua informações sobre o estado.

Replanejamento em viagem - Como foi apresentado na Seção 4.1, os motoristas esperam chegar aos seus destinos dentro de um tempo estimado, considerando suas experiências ao trafegar diariamente pelos mesmos lugares. Com este propósito, os motoristas decidem individualmente quais rotas usar.

Para se adaptar às mudanças inerentes ao tráfego veicular, os agentes recalculam suas rotas durante a viagem. O replanejamento em viagem utilizado nesta dissertação, é baseado no chamado fator de atraso (*delay re-planning* (DR)). Quando o agente atinge a aresta $e^i \in \mathcal{P}^j$, onde \mathcal{P}^j é a rota calculada no início da viagem do agente j , o agente irá avaliar o quanto está atrasado em comparação ao tempo estimado. Se o tempo gasto até o momento é τ vezes maior que o esperado, então o motorista irá replanear.

Para evitar o replanejamento precoce ou tardio, a estratégia DR é ativada somente quando o motorista estiver entre 30% e 70% da rota completada. Replanear muito cedo, poderá fazer com que o agente saia de uma rota que será melhor que as rotas alternativas, pois ainda é muito cedo para avaliar. Replanear muito tarde, poderá fazer com que o agente gaste mais tempo trafegando por distâncias maiores do que o tempo necessário para completar a viagem pela rota em curso.

5.3 Resumo

A abordagem proposta pelo AVNET é construída a partir da metodologia apresentada neste capítulo. Um dos elementos fundamentais para esta construção é o simulador microscópico de tráfego veicular ITSUMO, por apresentar as características e a flexibilidade desejadas. Devido a proposta do AVNET em analisar a interação entre oferta, demanda e agentes, cada um destes três aspectos foi implementado para atender as especificações da abordagem, apresentadas no Capítulo 4. Os detalhes destas implementações, como por

exemplo, as características da RTV, os métodos de geração de demandas, assim como as características dos agentes, foram apresentados no decorrer deste capítulo.

6 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Este capítulo avalia o AVNET através de uma série de experimentos, onde houve variações na oferta, demanda e nas características decisórias dos agentes. Inicialmente, a Seção 6.1 apresenta os parâmetros do simulador ITSUMO para execução dos experimentos. Em seguida, na Seção 6.2, é discutido o fluxo operacional da simulação, apresentando a sequência de passos realizados pelo simulador para execução dos experimentos. A Seção 6.3 apresenta as estatísticas que foram coletadas, a sua finalidade, e como elas se relacionam. A Seção 6.4 apresenta a metodologia para análise dos resultados, para a organização dos dados coletados nos experimentos, e os critérios para análise. Finalmente, as Seções 6.5 e 6.6, respectivamente, mostram as características topológicas das RTV's Arteriais e Grade, suas demandas e a análise dos resultados dos experimentos realizados nestas redes.

6.1 Parametrização dos experimentos

A simulação no ITSUMO é controlada por uma série de parâmetros espaço-temporais, alguns inerentes ao modelo de simulação microscópico adotado pelo simulador, outros inerentes ao seu projeto. Nesta seção serão apresentados apenas os parâmetros utilizados na execução dos experimentos desta dissertação.

Parametrização do tempo: o ITSUMO discretiza o tempo através do *step*. Para indicar o tempo total de uma simulação é preciso definir o total de *steps*. Como este parâmetro depende da rede e da demanda que estão sendo simulados, será apresentado nas seções que descrevem as topologias.

Parametrização do espaço: o ITSUMO implementa um modelo de simulação baseado no autômato celular, que prevê a divisão do espaço em células. Como os experimentos tratam apenas de ambientes urbanos, o tamanho de cada célula é de 5 metros para qualquer topologia. Pela mesma razão, a velocidade máxima é de 3 células por *step*, o que equivale a 54 Km/h.

O ITSUMO também permite definir uma taxa de desaceleração para modelar a imprevisibilidade da ação dos motoristas. Entretanto, para evitar a ocorrência de eventos aleatórios indesejados, esta taxa não foi utilizada. Finalmente, a combinação de três parâmetros determina o tipo de agente, conforme apresentado na Seção 5.2.3: (a) percepção *completa* ou *parcial* do estado da RTV, (b) habilidade ou inabilidade de *replanejar* rotas durante a viagem e (c) habilidade ou inabilidade de se *comunicar* com outros motoristas. Lembrando que os detalhes operacionais sobre o cálculo de rotas, da percepção do estado da RTV, da comunicação V2V e do replanejamento durante a viagem, foram discutidos

na Seção 5.2.3. A Tabela 6.1 resume a parametrização do simulador para experimentação através do AVNET:

Tabela 6.1: Resumo da parametrização do simulador.

<i>Parâmetro</i>	<i>Valor</i>
Tamanho da célula	5 metros
Tempo de simulação (steps)	depende da topologia
Velocidade Máxima	3 células por <i>step</i>
Desaceleração	0
Obtenção de rotas	Algoritmo A*
Fator de Atraso (τ)	3

O parâmetro τ , ligado ao replanejamento durante as viagens, e que foi apresentado na Seção 5.2.3, foi definido como $\tau=3$, o que equivale a três vezes atrasado em relação ao tempo previsto (em *steps*). Após estudos preliminares, foi escolhido este valor para evitar o excesso de replanejamentos que dificilmente reduziam o tempo médio de viagem dos agentes, por se tratar de um atraso pequeno. Por outro lado, valores maiores do que este, ignoram uma quantidade demasiadamente grande de replanejamentos, que se fossem realizados, reduziriam o tempo médio de viagem de muitos agentes.

Outro parâmetro importante, que não diz respeito ao simulador, mas ao experimento, é o número de repetições. Cada experimento foi repetido 10 vezes para a coleta da média e do desvio padrão de cada uma das cinco métricas que serão apresentadas na Seção 6.3.

6.2 Fluxo operacional da simulação

Nesta seção será discutido o fluxo das operações realizadas no início, durante e no final de uma simulação.

A simulação inicia a partir da leitura do arquivo de configuração que define os parâmetros da simulação, a oferta e demanda. Quanto a oferta, o simulador armazena nas estruturas de dados adequadas as informações sobre as pistas, os cruzamentos, etc. Quanto a demanda, o simulador atribui cada par de origem e destino a um motorista específico. Este motorista será responsável por completar a viagem do ponto de origem ao ponto de destino calculando a rota através do algoritmo A*.

O que acontece durante a viagem depende muito do tipo de agente. Um agente com comunicação V2V irá se comunicar com outros agentes para obter informações sobre o estado da rede. Um agente com habilidade de replanear suas viagens irá realizar esta operação para otimizar sua rota. Cabe lembrar (ver Seção 5.1.4) que foi adicionado ao simulador um manipulador de *deadlocks* para evitar travamentos na rede devido ao acúmulo excessivo de veículos.

O motorista reinicia seu percurso ao chegar ao final da viagem. Ao recomeçar a viagem, o motorista parte novamente do ponto de origem em direção ao ponto de destino. O reinício da viagem ocorrerá continuamente até que a simulação chegue ao fim, de modo que um motorista poderá realizar várias viagens em uma única simulação. No caso dos motoristas com percepção parcial, o conhecimento que possuem sobre o estado da rede é mantido de uma viagem para outra. A rota é recalculada a cada vez que o motorista inicia uma nova viagem, independente de realizar ou não replanejamento durante a viagem.

6.3 Estatísticas

As estatísticas utilizadas para análise dos resultados consistem de média e desvio padrão, das cinco métricas descritas a seguir:

- **tempo médio de viagem (TMV)**: tempo médio (em *steps*) que os agentes utilizam para concluir suas viagens; permite avaliar quão rápido é o deslocamento pela RTV.
- **distância média percorrida (DMP)**: distância média (Km) percorrida pelos agentes durante suas viagens; permite, por exemplo, verificar a dispersão dos agentes pela RTV.
- **custo médio percorrido (CMP)**: custo médio dos locais por onde os agentes trafegaram durante suas viagens, calculado através da função apresentada na Equação (5.1). O custo mede o nível de ocupação das arestas da RTV: uma aresta com alto nível de ocupação reflete um alto custo, enquanto uma aresta com baixa ocupação reflete um baixo custo. Deste modo, o custo permite avaliar o estado da RTV durante o deslocamento (nível de ocupação nas áreas trafegadas).
- **média de viagens concluídas (MVC)**: média do número de viagens concluídas pelos agentes durante execução do experimento; permite verificar a eficiência dos agentes ao concluírem suas viagens.
- **densidade por classe (DpC)**: densidade de agentes distribuídos nas classes; permite avaliar a quantidade de agentes existentes em cada classe (o conceito de *classe* será introduzido na Seção 6.4.1).

Estas métricas permitirão avaliar a interação entre demanda, oferta e tipos de agente da forma como o AVNET propõe. Os dados utilizados para compor as métricas foram coletados a cada 20 *steps* de simulação. Experimentos preliminares indicam que o valor atribuído a este parâmetro evita a coleta excessiva de dados similares sem que ocorra a perda de informações significativas. A coleta dos dados brutos é processada para que sejam geradas as médias e desvio padrão.

6.4 Organização dos resultados e análises

O fluxo operacional apresentado na Seção 6.2 foi executado com base nos parâmetros da Seção 6.1, onde houve variações nas condições de oferta, demanda e tipos de agentes, com o objetivo de avaliar a interação entre estes três elementos. Como resultado, foram coletados os dados que compõem as cinco métricas apresentadas na Seção 6.3. A metodologia para apresentação e análise destes resultados será discutida no decorrer desta seção. Trata-se de uma metodologia de análise *bottom-up*, quando da verificação das partes constrói-se uma visão do todo. Desta forma é possível identificar comportamentos individuais e a partir daí generalizar padrões de comportamento coletivos. Dois conceitos são fundamentais para compreender esta metodologia: as *classes* de duração de viagem e os *níveis* de análise.

6.4.1 Classes de duração de viagens

A métrica mais importante para avaliar o balanceamento de carga é o tempo de viagem, pois no final das contas, o que queremos é reduzir este tempo. Mas nem sempre esta métrica permite concluir com exatidão o que está ocorrendo na rede. Ao aplicarmos uma técnica para reduzir o tempo de viagem e o resultado está abaixo do esperado, isso não significa necessariamente que a técnica é ruim, mas que as condições de oferta e demanda

não contribuem para o desempenho daquela técnica. Talvez a rede esteja saturada a tal ponto que não restem muitas opções de otimização do tráfego. Apesar disto, a importância desta métrica fez com que as demais métricas coletadas fossem avaliadas com base no tempo de viagem, através da criação de *classes*.

Uma classe C_{ti-tf} é definida pelo intervalo semi-aberto $[ti, tf)$, correspondendo respectivamente, ao tempo mínimo e máximo de duração de uma viagem. Os motoristas cujas viagens tiveram tempo de duração t , dentro do intervalo $[ti, tf)$, pertencem àquela classe ($ti \leq t < tf$). Cada motorista, além do tempo de viagem, também está associado a uma distância percorrida, um custo total de deslocamento, e assim sucessivamente para qualquer uma das cinco métricas. Se, por exemplo, calcularmos a distância média percorrida pelos motoristas da classe C_{ti-tf} , teremos a apresentação dos resultados na forma de classes. Esta divisão ajuda a verificar tendências de comportamento de acordo com a duração das viagens (curtas, médias e longas). Além disso, esta granularidade mais fina, também facilita a compreensão e análise dos resultados, dividindo o problema em porções menores que são mais fáceis de visualizar. Os intervalos das classes dependem da amplitude dos resultados, variando de topologia para topologia. Para uma avaliação geral dos resultados, também foi criada a classe *ALL*, que agrupa todos os resultados de todas as classes (proporcionando uma média geral).

6.4.2 Níveis de Análise

A análise dos resultados está organizada em três níveis, partindo de uma visão micro para uma visão macro destes resultados. Como dito anteriormente, o AVNET preconiza a necessidade de investigar a interação entre oferta, demanda e agentes (motoristas). A análise da interação entre estes três elementos tem seu foco direcionado pela criação de níveis. Analogamente, os níveis são como estágios da escalada a uma montanha. No primeiro nível, no sopé da montanha, o alpinista está vendo detalhes do terreno, como pedras e arbustos. Ao chegar na metade do caminho, o alpinista avista alguns montes e um pequeno riacho ali perto. Alcançando o topo, o alpinista tem uma visão panorâmica do relevo à sua volta. Seguindo esta analogia, no primeiro nível veremos o desempenho de cada tipo de agente, em cada tipo e tamanho de demanda, dentro de uma determinada condição de oferta. No segundo nível veremos o desempenho de cada tipo de agente, agrupando os resultados nas diferentes demandas, dentro de uma determinada condição de oferta. No terceiro nível, veremos o desempenho nas diferentes condições de oferta, agrupando agentes e demanda.

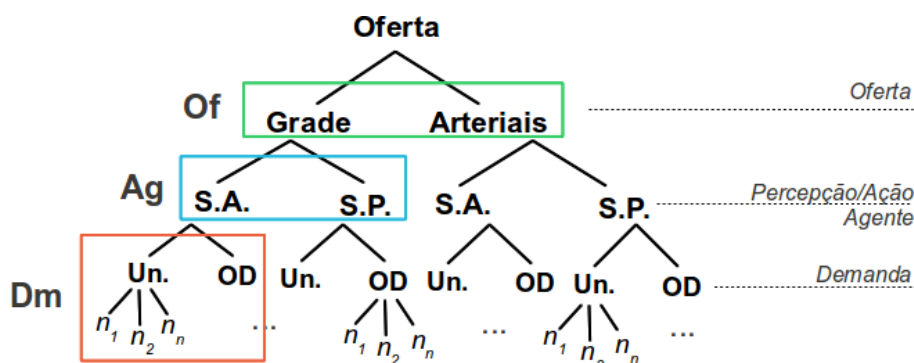


Figura 6.1: Organização da análise dos resultados

A Figura 6.1 mostra os três níveis de abrangência. A análise começa no nível mais abaixo (*bottom*), que possui o detalhamento do maior número de características analisa-

das. Os níveis acima agrupam os detalhamentos dos níveis abaixo, construindo uma visão mais abrangente (*up*) dos resultados. Assim, o detalhamento da demanda aparece no nível *Dm*, o agrupamento da demanda no nível *Ag* e o agrupamento dos agentes no nível *Of*.

No último nível (primeiro a ser analisado), *Dm*, o objetivo é identificar comportamentos detalhados, fracionando a apresentação dos resultados em pequenas partes. Como mostra a Figura 6.1, os resultados são apresentados para cada tipo e o tamanho da demanda, e são discutidos sob a perspectiva da similaridade de ação (*SA*) e de percepção (*SP*) dos agentes. Resumidamente, as análises do nível *Dm* comparam o desempenho das capacidades similares de ação ou percepção em cada tipo e tamanho de demanda. Este agrupamento de similaridades de ação e percepção está demonstrado na Figura 6.2, onde dois eixos horizontais representam a capacidade de ação e três eixos verticais representam a capacidade de percepção dos agentes. Do encontro destes eixos surgem três grupos de similaridade de percepção e dois grupos de similaridade de ação. A análise *Dm* consiste em comparar o desempenho dos tipos de agentes que constituem cada um dos grupos.

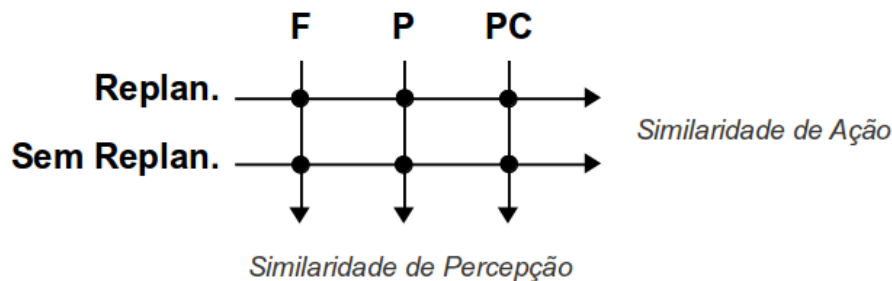


Figura 6.2: Eixos do agrupamento das ações e percepções dos agentes utilizado para a análise dos resultados.

- **Similaridade de percepção:** agrupa os agentes conforme sua similaridade de percepção do estado da RTV em três grupos: $SP^1 = \{F, FR\}$, $SP^2 = \{P, PR\}$ e $SP^3 = \{PC, PCR\}$. No primeiro grupo os agentes possuem percepção completa, no segundo possuem percepção parcial e no terceiro a percepção parcial estendida pela comunicação. O que distingue cada tipo de agente em cada um dos três grupos é a habilidade ou inabilidade de replanejamento.
- **Similaridade de ação:** agrupa os agentes conforme sua similaridade de ação em dois grupos: $SA^1 = \{F, P, PC\}$ e $SA^2 = \{FR, PR, PCR\}$. No primeiro grupo os agentes não possuem a habilidade de replanejar rotas durante a viagem, enquanto os do segundo grupo possuem esta habilidade. O que distingue cada tipo de agente no seu grupo é a sua capacidade de percepção.

No nível intermediário, *Ag*, compara o desempenho dos agentes em uma determinada condição de oferta, construindo uma análise transversal das demandas. Para cada tipo de agente, é investigado o resultado das suas ações e percepções cruzando os resultados dos diferentes tipos e tamanhos de demanda. É uma visão mais ampla, que procura as relações existentes entre tipo de agente e demanda. No primeiro nível (último a ser analisado), *Of*, comparam-se o desempenho dos agentes entre ofertas distintas, construindo uma análise transversal das topologias.

Resumidamente:

Nível *Dm* - Detalhamento de oferta, demanda e agentes: comparam o desempenho das capacidades similares de ação ou percepção dos agentes em cada tipo e tamanho de demanda, em uma determinada condição de oferta.

Nível *Ag* - Agrupamento de demandas: compara o desempenho dos agentes em uma determinada condição de oferta, construindo uma análise transversal das demandas.

Nível *Of* - Agrupamento de demandas e agentes: compara o desempenho dos agentes entre ofertas distintas, construindo uma análise transversal das ofertas.

6.5 Topologia 1: Arteriais

Esta seção apresenta a topologia Arteriais de Porto Alegre, ou apenas Arteriais, a geração da sua demanda e a análise dos resultados. A rede Arteriais possui 61 nodos ligando 38 seções (ver características topológicas na Figura 5.2) que totalizam uma distância total de 76 Km. Uma seção pode ter várias pistas (tipicamente três em cada direção), onde cada célula possui 5 metros, o que garante uma capacidade nominal de aproximadamente 100 mil veículos.

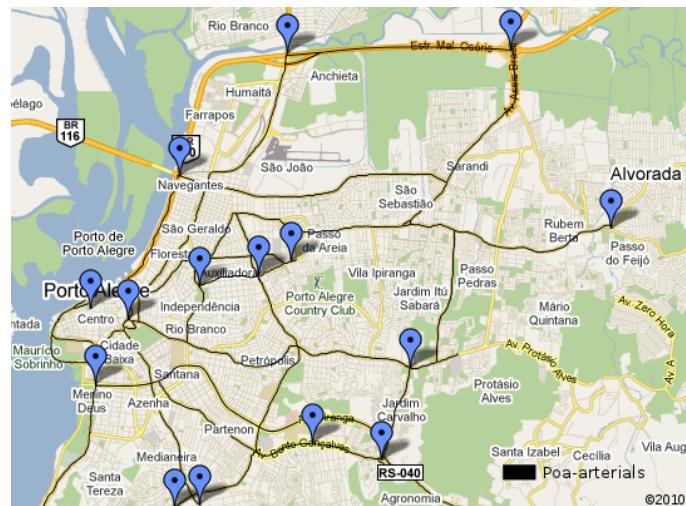


Figura 6.3: Rede Arteriais

A demanda OD, ou seja, não uniforme, da rede Arteriais partiu da escolha das 15 áreas demarcadas na Figura 6.3, que são conhecidas na cidade de Porto Alegre por concentrarem grande parte das origens e destinos dos motoristas que trafegam diariamente de casa para o trabalho. Estas 15 áreas foram mapeadas em 15 nodos, como mostra a Tabela 6.2. Os nodos restantes foram ignorados do processo de escolha dos pontos de origem e destino.

Para facilitar a leitura da matriz OD, ao invés da Tabela 6.2 mostrar células contendo valores percentuais, é exibida uma forma proporcional. As células, cujo conteúdo é igual a 1, corresponde aos pares que tem apenas uma chance de serem selecionados; as células, cujo conteúdo é igual a 4, corresponde aos pares que tem 4 chances de serem selecionados. Somando o conteúdo de todas as células, obtemos 210 chances de escolha, que é o tamanho total da roleta utilizada no sorteio das origens e destinos, conforme apresentado na Seção 5.2.2. Por exemplo, onde aparece 4, devemos ler 4/210 (ou 4 chances em 210).

Tabela 6.2: Matriz OD da rede Arteriais

Nodo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
58		1	1	1	1	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1
63	1	-	1	1	1	4	4	4	1	1	1	1	-	1	1
59	1	1	-	1	1	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1
61	-	-	-	-	-	1	1	1	1	1	1	1	-	1	-
52	-	-	-	1	-	1	1	1	1	1	1	1	-	1	1
51	1	1	1	1	1	-	4	4	1	1	1	1	-	1	1
53	1	-	1	1	1	1	-	1	1	1	1	1	-	1	1
38	1	1	-	-	-	1	1	-	1	1	1	1	1	1	1
26	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	1
7	-	-	1	1	1	2	2	2	1	-	1	1	1	1	1
12	-	-	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-	1	1	1
11	-	-	1	1	1	2	2	2	1	1	1	-	1	1	1
25	1	1	1	1	1	2	2	2	1	1	1	1	-	1	1
15	1	1	1	1	1	2	2	2	1	1	1	1	-	-	1
19	1	1	1	1	1	2	2	2	1	1	1	1	1	1	-

Apesar do algoritmo trabalhar com números percentuais, a forma proporcional é mais fácil de visualizar. Para fins de clareza, as células com valor nulo (zero) foram identificadas por um traço (“-”).

Na Seção 6.5.1 serão apresentadas as análises dos experimentos executados na RTV Arteriais, demandas uniforme e OD, respectivamente com 20.000, 30.000 e 40.000 viagens. Apesar dos experimentos terem sido executados nesta ordem, serão apresentados na ordem inversa, começando com 40.000 viagens. Esta ordem de apresentação se baseia na relevância dos resultados da demanda com maior número de viagens, deixando o leitor livre para acompanhar as análises de 20.000 e 30.000 viagens sem prejuízo à verificação da validade do AVNET. Estes tamanhos de demandas foram estabelecidos através de experimentos preliminares, que demonstraram a capacidade de verificar a rede em três estágios distintos: baixa, média e alta ocupação. Esta escolha é corroborada através dos experimentos discutidos na publicação (BAZZAN et al., 2011).

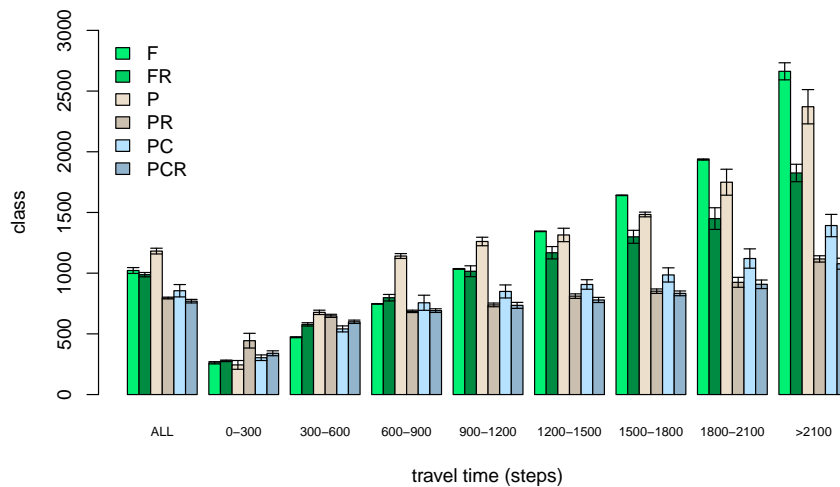
Cada simulação foi executada durante 15.000 steps, tempo suficiente para que todos os agentes concluíssem pelo menos uma viagem. Seguindo a abordagem apresentada na Seção 6.4, os resultados serão mostrados em classes, que agrupam os tempos médio de viagem. Devido a amplitude dos resultados, foram criadas oito classes: 0-300, 300-600, 600-900, 900-1200, 1200-1500, 1500-1800, 1800-2100 e >2100. Por exemplo, a classe 300-600 agrupa os resultados com tempo médio de viagem entre 300 e 600 steps; já a classe >2100 agrupa os resultados com tempo médio de viagem acima de 2100 steps.

6.5.1 Análise detalhada de oferta, demanda e agentes para 40.000 viagens

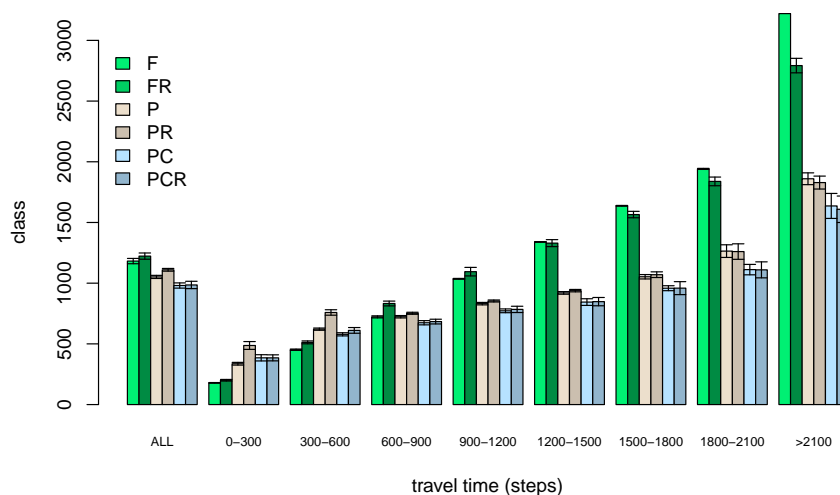
Nesta seção, serão conduzidas as análises no nível de abrangência D_m para topologia Arteriais, para as distribuições de demanda uniforme e OD com 40.000 viagens. Serão comparados o desempenho dos tipos de agentes agrupados segundo os eixos de ação e percepção apresentados na Figura 6.2.

6.5.1.1 Similaridade de percepção - grupo $\{F, FR\}$

Demanda OD - como pode ser visto na Figura 6.4a, a classe *ALL* demonstra que os agentes *FR* tem desempenho praticamente igual aos agentes *F*. No entanto, partindo da classe 0 – 300 até a classe 900 – 1200, a tendência é de que os agentes *F* apresentem melhor desempenho que os agentes *FR*, apesar desta observação aparecer claramente apenas na classe 300 – 600. A partir da classe 900 – 1200, esta tendência se inverte,



(a) Tempo médio de viagem, demanda OD com 40 mil viagens



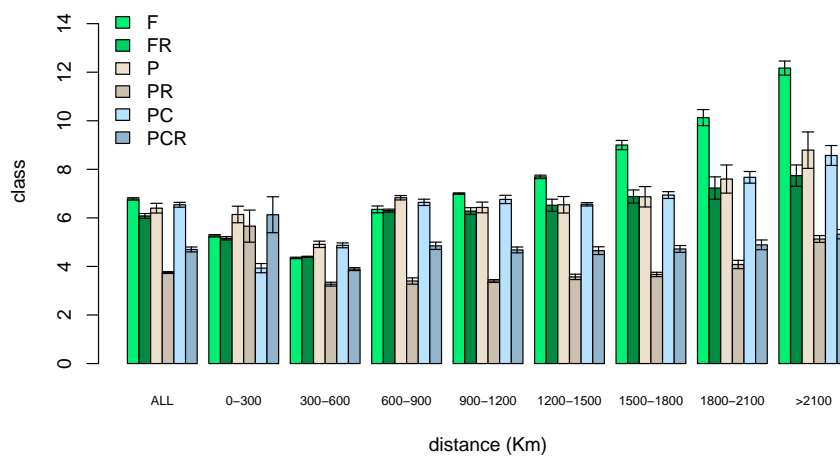
(b) Tempo médio de viagem, demanda Uniforme com 40 mil viagens

Figura 6.4: TMV para 40.000 viagens OD (acima) e uniforme (abaixo).

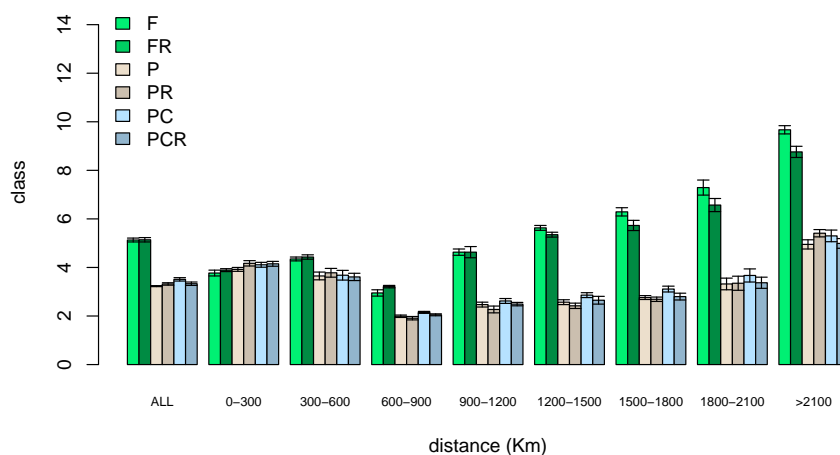
e os agentes FR passaram a apresentar um TMV menor que os agentes F . Também a partir desta classe, como mostra a Figura 6.5a, os agentes FR diminuem a distância média percorrida (DMP) em relação aos agentes F . Considerando que a partir da classe 1200 – 1500 temos uma concentração de 40% do total de agentes (Figura 6.8a), estas inversões de tendência são significativas pela quantidade de agentes envolvidos.

Demanda Uniforme - como pode ser visto na Figura 6.4b, a classe *ALL* demonstra que os agentes F tem desempenho praticamente igual aos agentes FR . Da classe 0 – 300 até 1200 – 1500, a tendência é de que os agentes F apresentem melhor desempenho que os agentes FR . A partir da classe 1200 – 1500, percebe-se uma inversão de tendência no TMV e na DMP dos agentes FR em relação aos agentes F , como mostra a Figura 6.8a.

Conclusões - além das inversões de tendência identificadas no TMV e DMP, a análise do custo médio percorrido (CMP) pelos agentes F e FR nas demandas uniforme,



(a) Distância média percorrida, demanda OD com 40 mil viagens



(b) Distância média percorrida, demanda Uniforme com 40 mil viagens

Figura 6.5: DMP para 40.000 viagens OD (acima) e uniforme (abaixo).

conforme a Figura 6.6a, e OD, conforme a Figura 6.6b, permitem concluir que o replanejamento possibilitou aos agentes *FR* encontrarem rotas mais curtas com CMP semelhante ao das rotas originalmente calculadas. Em uma situação em que temos percepção completa do estado da rede de tráfego veicular (RTV), podemos concluir que o **replanejamento durante a viagem é vantajoso em viagens longas** (a partir da classe 1200–1500), independentemente da distribuição da demanda ser OD ou uniforme. Nas viagens curtas (até a classe 1200 – 1500) o replanejamento não é uma alternativa vantajosa para agentes com percepção completa.

6.5.1.2 Similaridade de percepção - grupo $\{P, PR\}$

Demanda OD - a partir da classe 300 – 600 o tempo médio de viagem (TMV) dos agentes *PR* torna-se gradativamente menor do que o TMV dos agentes *P*. Esta tendência

começa muito cedo e se mantém até a última classe (> 2100), o que corrobora o menor TMV dos agentes PR na classe ALL . A julgar pelo número de viagens realizados pelos agentes P da classe $0 - 300$, conforme a Figura 6.7, conclui-se que é preferível não replanejar a rota durante a viagem, quando um agente que possui percepção parcial percorre distâncias curtas para concluir suas viagens. Neste caso, o replanejamento durante uma viagem curta implica em demorar mais tempo para desviar de arestas aparentemente mais congestionadas, mas que em pouco tempo o seu estado será completamente diferente. Este comportamento dinâmico, onde o estado das arestas da RTV mudam seu estado constantemente, é inerente a dinamicidade do tráfego veicular.

Demanda uniforme - assim como ocorre na demanda OD, os agentes PR apresentam TMV's menores do que os agentes P . No entanto, na demanda OD, a diferença entre o TMV dos agentes P e PR em suas classes é significativamente inferior a diferença encontrada na demanda OD. Percebe-se ainda, que os agentes PR apresentam um custo médio percorrido (CMP) menor do que os agentes P , como mostra a Figura 6.6b, ainda que estes agentes tenham uma distância média percorrida (DMP) semelhante, como mostra a Figura 6.5b.

Conclusões - os TMV's significativamente menores apresentados pelos agentes PR evidenciam a importância do replanejamento em condições de demanda OD. No entanto, o replanejamento em condições de demanda uniforme não se mostrou vantajoso. Considerando que em condições de demanda OD as áreas de concentração do tráfego perduram por mais tempo, a percepção que os agentes possuem destas áreas também permanece válida por mais tempo. Por outro lado, a dispersão uniforme do tráfego pela RTV não possibilita a mesma representação das áreas congestionadas, o que justifica a **ineficácia do replanejamento em condições de demanda uniforme**.

6.5.1.3 Similaridade de percepção - grupo $\{PC, PCR\}$

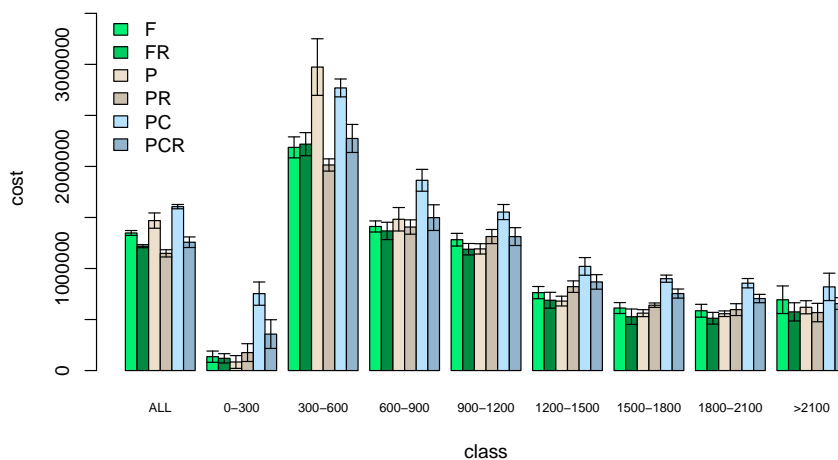
Demanda OD - os agentes PCR apresentam equilibradamente (em todas as classes) um tempo médio de viagem (TMV) inferior aos agentes PC . Este comportamento é semelhante ao ocorrido entre os agentes P e PR , mas diferente destes, o replanejamento é vantajoso mesmo para os agentes da classe $0 - 300$.

Demanda Uniforme - assim como ocorre entre os agentes P e PR , a semelhança entre o TMV dos agentes PC e PCR demonstra um equilíbrio entre suas capacidades de percepção, que não se desfaz apesar do replanejamento durante a viagem. Ainda que pequena, é possível perceber que há desvantagem em replanejar a rota durante a viagem.

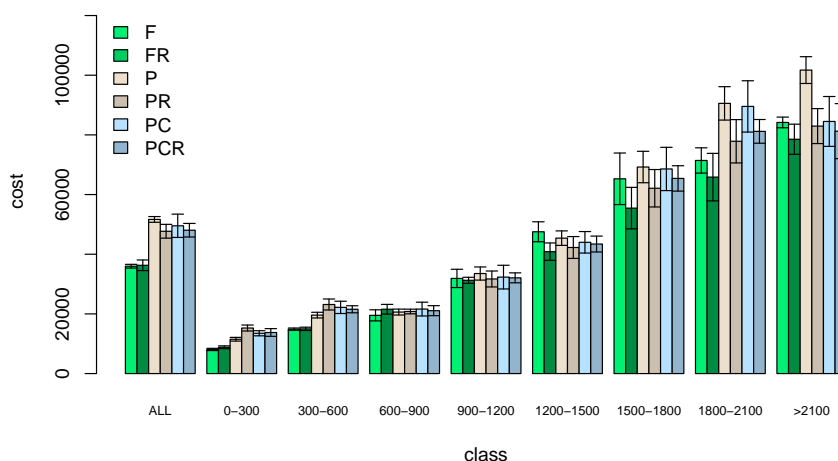
Conclusões - a conclusão apresentada para os agentes P e PR também se aplica a comparação entre os agentes PC e PCR quanto à vantagem de replanejar a rota durante a viagem com demanda OD e a ineficácia de replanejar com demanda uniforme. Entretanto, cabe salientar que a diferença do TMV entre os agentes PC e PCR é sensivelmente menor que a diferença entre os agentes P e PR . Isso demonstra que a **percepção parcial estendida pela comunicação permite aos motoristas melhor representar o estado da rede**, o que auxilia no cálculo de suas rotas ao iniciarem uma nova viagem (ainda que não utilizem o replanejamento).

6.5.1.4 Similaridade de ação - grupo $\{F, P, PC\}$

Demanda OD - é perceptível a tendência dos agente PC apresentarem um tempo médio de viagem (TMV) inferior ao apresentado pelos agentes F e P para conclusão de suas viagens. Nota-se também, que nas classes onde as viagens são mais curtas a percepção completa é vantajosa (classes $0 - 300$ e $300 - 600$). Ademais, até a classe



(a) Custo médio percorrido, demanda OD com 40 mil viagens



(b) Custo médio percorrido, demanda Uniforme com 40 mil viagens

Figura 6.6: CMP para 40.000 viagens OD (acima) e uniforme (abaixo).

1800 – 2100, os agentes P possuem o pior desempenho dentre os tipos comparados, quando passam a apresentar um TMV inferior aos agentes F . Isto permite concluir que, sem replanejamento, e a medida que as viagens ficam mais longas, a percepção parcial tende a ser mais vantajosa que a percepção completa.

Demanda Uniforme - assim como ocorre com a demanda OD, nota-se uma tendência dos agentes PC apresentarem um TMV inferior ao apresentado pelos agentes F e P para a conclusão de suas viagens. Entretanto, os agentes P mostram um desempenho superior aos agentes F mais cedo, a partir da classe 900 – 1200. Quanto maior a dispersão dos agentes pela rede, mais rapidamente a percepção parcial se torna vantajosa.

Conclusão - o desempenho inferior da percepção completa, especialmente na condição de demanda uniforme, permite concluir que **o conhecimento completo do estado da rede pode levar os motoristas para as mesmas regiões** (naquele momento a melhor

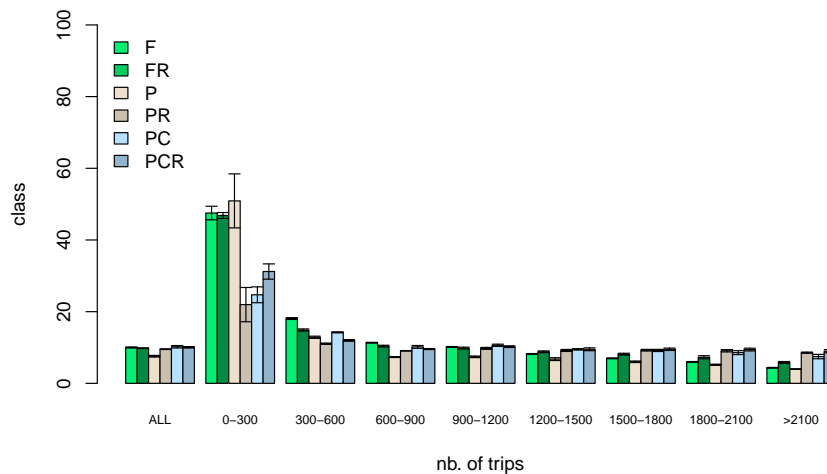


Figura 6.7: Média de viagens concluídas (MVC), demanda OD com 40 mil viagens

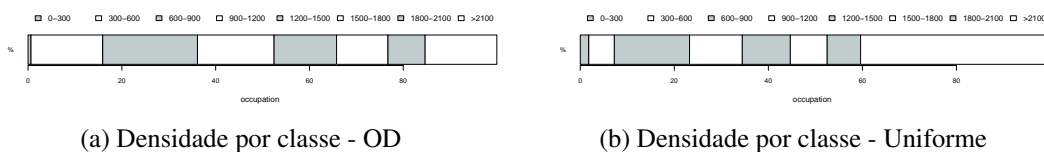
opção) mas que logo se tornam saturadas, uma vez que muitos motoristas acabam trafegando pelo mesmo lugar (áreas de interesse comum). Este comportamento é ainda melhor perceptível na demanda uniforme, pois os motoristas já estão dispersos *a priori* pela rede, o que torna ainda mais fácil seu deslocamento para áreas de interesse comum. A percepção parcial com comunicação dos agentes *PC*, demonstra um equilíbrio interessante: inibe o surgimento de áreas de interesse comum, como ocorre com a percepção completa, mas ainda assim permite encontrar rotas melhores por não ter uma percepção tão restrita quanto a dos agente *P*.

6.5.1.5 Similaridade de ação - grupo {FR, PR, PCR}

Demanda OD - o replanejamento tem um impacto maior entre os agentes com percepção parcial. Também é possível perceber que a medida que as classes aumentam seus intervalos de apresentação, a percepção completa tende a piorar ainda mais os resultados destes agentes em relação aos que possuem percepção parcial. Como concluído na comparação entre os agentes *F*, *P* e *PC*, a percepção completa tende a criar áreas de interesse comum, o que acaba levando um grande número de agentes para o mesmo lugar.

Demanda Uniforme - apesar dos agentes com percepção parcial obterem resultados melhores do que os agentes com percepção completa, não percebe-se o mesmo desempenho do replanejamento entre estes agentes como ocorre na demanda OD.

Conclusão - os agentes com percepção parcial apresentam resultados melhores, especialmente nas viagens com TMV mais longo; entretanto, o replanejamento só é vantajoso em condições de demanda OD. O primeiro comportamento explica-se pela existência de áreas de interesse comum criadas pela percepção completa, onde muitos agentes acabam indo para o mesmo lugar (pois tem a mesma percepção). O segundo explica-se pela natureza da demanda: na demanda OD, a dispersão dos agentes na rede permite representar melhor as áreas de maior concentração, o que não ocorre na demanda uniforme, pois os agentes já estão mais dispersos pela RTV *a priori*.



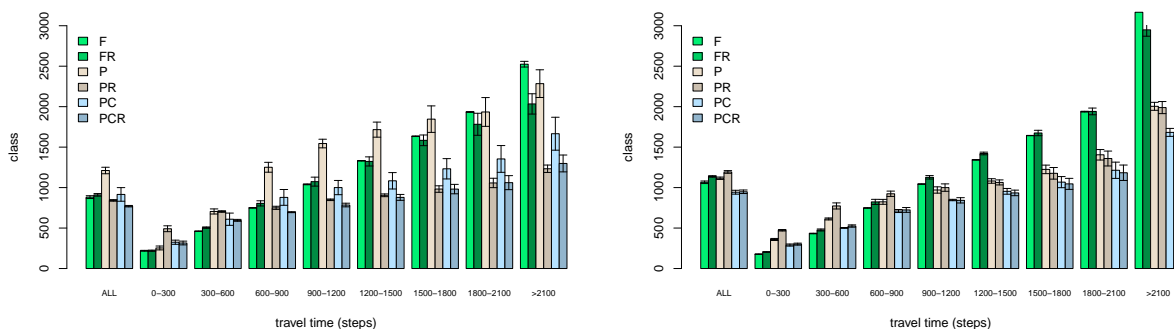
(a) Densidade por classe - OD

(b) Densidade por classe - Uniforme

Figura 6.8: Densidade por classe - 40.000 viagens OD e uniforme.

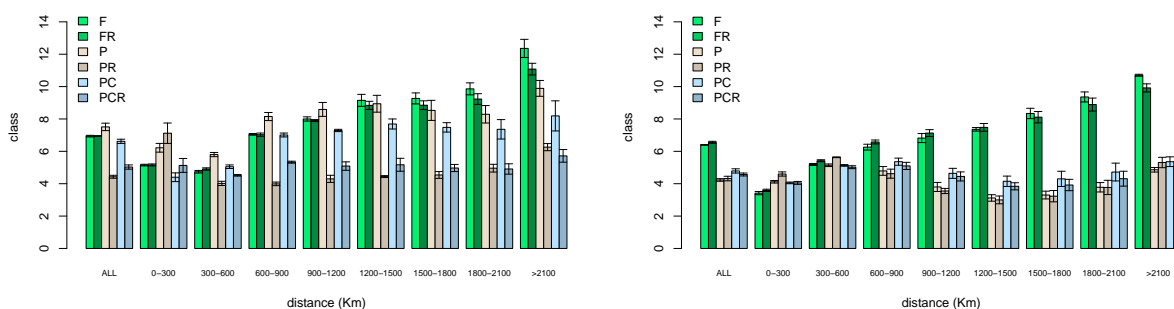
6.5.2 Análise detalhada de oferta, demanda e agentes para 30.000 viagens

Nesta seção serão discutidas as análises das demandas OD e uniforme com 30.000 pares origem-destino. Uma vez que a metodologia de análise é similar à da Seção 6.5.1, o leitor poderá continuar sua leitura a partir da Seção 6.5.4 e/ou verificar apenas as principais conclusões em **negrito**.



(a) OD - Tempo médio de viagem

(b) U - Tempo médio de viagem



(c) OD - Distância média percorrida

(d) U - Distância média percorrida

Figura 6.9: TMV e DMP para 30.000 viagens OD (esquerda) e uniforme (direita).

6.5.2.1 Similaridade de percepção - grupo {F, FR}

Demanda OD - como pode ser visto na Figura 6.9a, a classe *ALL* (que agrupa todos os tempo médio de viagem (TMV)) demonstra que os agentes *F* tem desempenho superior aos agentes *FR*. Nota-se que da classe 0 – 300 até a classe 1200 – 1500, ocorre a tendência dos agentes *F* apresentem melhor desempenho que os agentes *FR*, assim como apresentado pela classe *ALL*. A partir da classe 1200 – 1500, esta tendência se inverte, e os agentes *FR* passam a apresentar tempos menores para concluir suas viagens, e também

a partir desta classe (Figura 6.9c) passam a percorrer uma distância média menor que os agentes F . Considerando que a partir da classe 1200 – 1500 temos uma concentração de 40% do total de agentes (Figura 6.11a), é um resultado significativo pelo número de agentes envolvidos.

Demanda Uniforme - como pode ser visto na Figura 6.9b, a classe ALL demonstra que os agentes F e FR tem desempenho semelhante, o que se mantém até a classe 1200 – 1500. Assim como ocorreu na demanda OD, a partir da classe 1200-1500 (Figura 6.9b) o TMV apresentado pelos agentes FR é menor do que o TMV apresentado pelos agentes F , assim como ocorre com distância média percorrida (DMP) (Figura 6.11a).

Conclusões - através dos custos, para demandas OD e uniforme, respectivamente apresentados nas Figuras 6.10a e 6.10b, é possível concluir que o replanejamento permitiu aos agentes encontrar rotas mais curtas com o mesmo custo das rotas originalmente calculadas. Em uma situação em que temos conhecimento **completo sobre o tráfego, podemos concluir que é melhor replanear as rotas**, independente da distribuição do tráfego, ou seja, independente de ser uniforme ou não.

6.5.2.2 Similaridade de percepção - grupo $\{P, PR\}$

Demanda OD - como pode ser visto na Figura 6.9a, a partir da classe 300 – 600 os tempos médio de viagem dos agentes PR passam a ser gradativamente menores do que os agentes P . A julgar pelo número de viagens realizadas pelos agentes P da classe 0 – 300, conforme a Figura 6.10c, conclui-se que somente é vantajoso deixar de replanear com percepção parcial, quando as viagens são curtas. Neste caso, o replanejamento de uma viagem curta implica em demorar mais tempo para desviar de um custo aparentemente mais alto, mas que se tornará mais baixo em pouco tempo.

Demanda uniforme - assim como ocorre na demanda OD, verifica-se na Figura 6.9b que os agentes PR obtiveram tempos de viagem menores que os agentes P , porém com uma diferença significativamente menor. A Figura 6.10b mostra ainda que os agente PR trafegaram por regiões de menor custo, mas com distâncias similares as dos agentes P (Figura 6.9d).

Conclusões - os tempos de viagem significativamente menores obtidos pelos agentes PR evidenciam a **importância do replanejamento em casos com demanda OD**, enquanto praticamente não tem efeito na demanda uniforme. Na demanda OD, como as áreas de concentração duram por mais tempo, uma percepção parcial permite representar por um longo prazo as áreas com tráfego intenso. Por outro lado, ao dispersar o tráfego igualmente pela rede, não possibilita a mesma representação das áreas congestionadas, o que justifica a ineficácia do replanejamento neste caso.

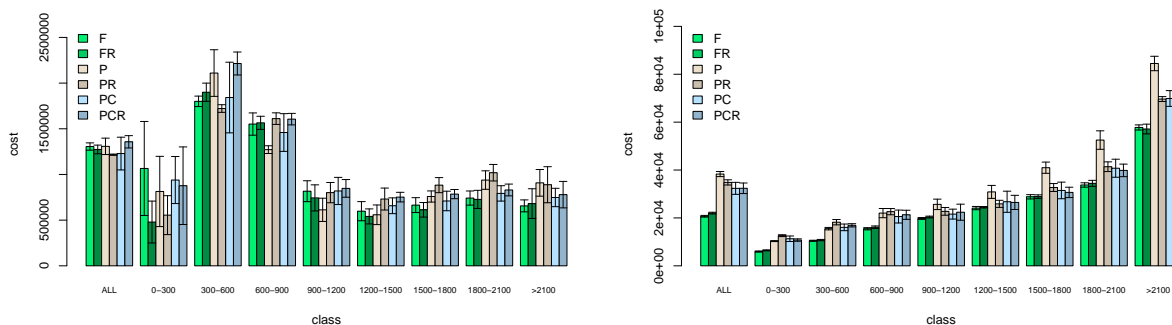
6.5.2.3 Similaridade de percepção - grupo $\{PC, PCR\}$

Demanda OD - como pode ser visto na Figura 6.9a os agentes PCR mantém equitadamente (em todas as classes) uma tendência de consumir menos tempo médio de viagem do que os agentes PC . Este comportamento é semelhante ao ocorrido entre os agentes P e PR , mas diferente do que ocorre com estes, mesmo na classe 0 – 300 é vantajoso replanear.

Demanda Uniforme - como pode ser visto na Figura 6.9b, assim como ocorrido entre os agentes P e PR , a semelhança entre os tempos médios de viagem dos agente PC e PCR não demonstra nenhuma vantagem em replanear. Apesar de pequena, é possível perceber uma desvantagem em replanear.

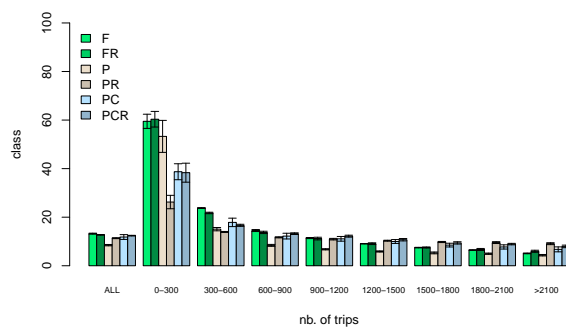
Conclusões - a conclusão descrita para as classes P e PR também se aplica a compa-

ração entre as classes *PC* e *PCR* quanto a **vantagem de replanejar com demanda OD** e a ineficácia do replanejamento com demanda uniforme. Entretanto, cabe salientar que a diferença dos tempos médio de viagem entre *PC* e *PCR* é sensivelmente menor que a diferença entre *P* e *PR*. Isso demonstra que a **comunicação permite aos motoristas representar melhor os custos da rede**, o que lhes auxilia no planejamento de suas rotas ao começarem uma nova viagem (ainda que não utilizem o replanejamento).



(a) OD - Custo médio percorrido

(b) U - Custo médio percorrido



(c) OD - Média de viagens concluídas

Figura 6.10: CMP e MVC para 30.000 viagens OD (esquerda) e uniforme (direita).

6.5.2.4 Similaridade de ação - grupo $\{F, P, PC\}$

Demanda OD - é perceptível, através da Figura 6.9a, a tendência dos agente *PC* apresentarem um tempo médio menor do que os agentes *F* e *P* para concluírem suas viagens. Nota-se também, que nas classes onde as viagens são mais rápidas (curtas) a percepção completa é vantajosa (0 – 300 e 300 – 600). Além disso, os agentes *P* possuem o pior desempenho dentre os tipos comparados, até a classe 1800-2100, quando passam a apresentar menos tempo do que os agentes *F*. Isto permite concluir que, sem o replanejamento e a medida que as viagens ficam mais longas, a percepção parcial tende a ser mais vantajosa que a percepção completa.

Demanda Uniforme - assim como ocorre com a demanda OD, como pode ser visto na Figura 6.9b, nota-se uma tendência dos agentes *PC* apresentarem um tempo médio menor do que os agentes *F* e *P* para concluírem suas viagens. Entretanto, os agentes *P* passam a ter um desempenho melhor que os agente *F* mais cedo, a partir da classe 900 – 1200. Quanto maior a distribuição dos agentes pela rede, mais rapidamente a percepção parcial

se torna vantajosa.

Conclusão - o mau resultado obtido pela percepção completa, especialmente com a demanda uniforme, permite concluir que, **conhecer os custos em toda a rede pode levar os motoristas para a mesma região**, distribuindo desigualmente o tráfego. Este comportamento é ainda mais visível na demanda uniforme pois os motoristas já estão espalhados pela rede, o que torna ainda mais fácil seu deslocamento para regiões semelhantes. A percepção parcial com comunicação (*PC*) consegue um equilíbrio interessante: inibe o surgimento de áreas de interesse comum como ocorre com a percepção completa (para onde todos acabam indo), mas ainda assim encontra rotas melhores por não ter uma percepção tão restrita quanto os agente *P*.

6.5.2.5 Similaridade de ação - grupo {*FR*, *PR*, *PCR*}

Demanda OD - o replanejamento tem um impacto maior entre os agentes com percepção parcial, como pode-ser verificar na Figura 6.9a. Também é possível perceber que a medida que as classes aumentam em tempo médio de viagem, a percepção completa tende a piorar ainda mais os resultados dos agentes em relação aos de percepção parcial. Como concluído na comparação entre os agentes *F*, *P* e *PC*, a percepção completa tende a criar áreas de interesse comum que acaba levando um grande número de agentes para o mesmo lugar.

Demanda Uniforme - apesar dos agentes com percepção parcial obterem resultados melhores do que os de percepção completa, como mostra a Figura 6.9b, não percebe-se o mesmo desempenho do replanejamento entre estes agentes como ocorre na demanda OD.

Conclusão - **a percepção parcial tem resultados melhores, especialmente nas viagens com tempo de viagem mais longo**; entretanto, **o replanejamento só é vantajoso com a demanda OD**. O primeiro comportamento explica-se pela existência de áreas de interesse comum criadas pela percepção completa, onde muitos agentes acabam indo para o mesmo lugar por terem a mesma percepção. O segundo explica-se pela natureza da demanda: na demanda OD, a distribuição dos agentes na rede permite representar melhor as áreas de maior concentração, o que não ocorre na demanda uniforme, pois os agentes já estão melhor espalhados pela rede *a priori*.

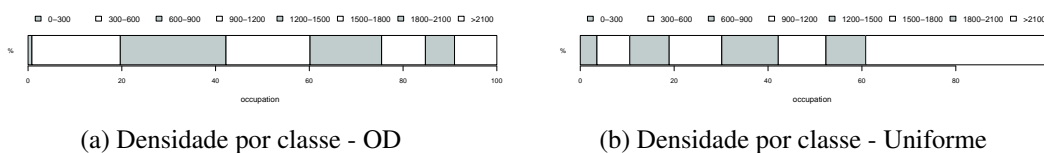


Figura 6.11: Densidade por classe - 30.000 viagens OD e uniforme.

6.5.3 Análise detalhada de oferta, demanda e agentes para 20.000 viagens

Nesta seção serão discutidas as análises das demandas OD e uniforme com 20.000 pares origem-destino. Uma vez que a metodologia de análise é similar à da Seção 6.5.1, o leitor poderá continuar sua leitura a partir da Seção 6.5.4 e/ou verificar apenas as principais conclusões em negrito.

É importante ressaltar que nas figuras 6.12b e 6.13c, não há nenhum agente a partir da classe 1200 – 1500. Devido a baixa ocupação da rede com esta demanda, todas as viagens foram concluídas até 1200 *steps*.

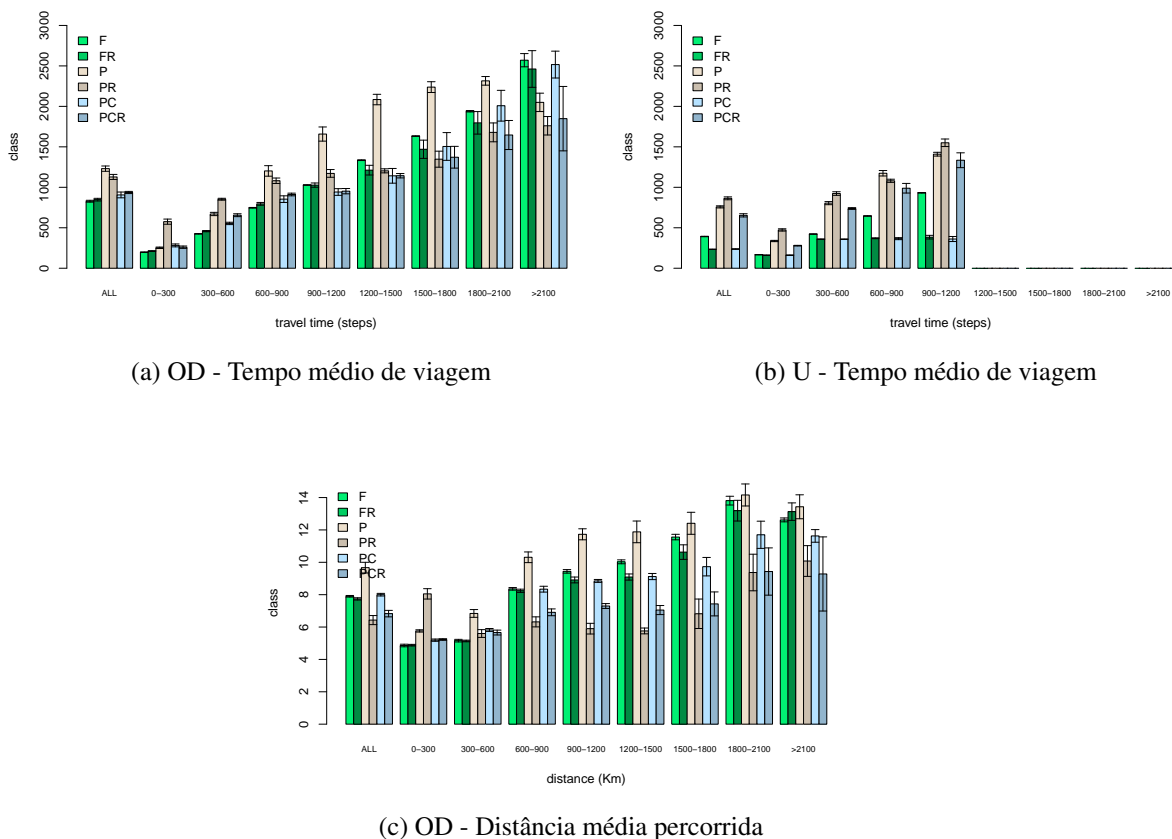


Figura 6.12: TMV e DMP para 20.000 viagens OD (esquerda) e uniforme (direita).

6.5.3.1 Similaridade de percepção - grupo $\{F, FR\}$

Demanda OD - evidencia-se pelos tempos de viagem e distância média percorrida apresentados na Figura 6.13, que o replanejamento durante a viagem não traz nenhuma vantagem para os agentes FR . O custo médio trafegados pelos agentes F e FR , apresentados na Figura 6.13a, são muito semelhantes, o que demonstra que a mudança de rota durante a viagem não reduziu o custo da viagem. A quantidade relativamente baixa de agentes na rede não foi suficiente para criar áreas de congestionamento que justificassem o replanejamento durante a viagem, fazendo com que os replanejamentos não gerassem rotas melhores do que as que já haviam sido obtidas.

Demanda Uniforme - conforme a Figura 6.12b, nota-se que ocorre uma crescente redução no tempo de viagem de FR em relação F . As classes 600 – 900 e 900 – 1200 evidenciam que quanto menor a distância percorrida menor é o custo, conforme as Figuras 6.13a e 6.13b, respectivamente. Como a demanda uniforme dispersa os agentes *a priori* e dado o número relativamente baixo de motoristas, ocorre uma baixa ocupação da rede e consequentemente poucas áreas de congestionamento. Nestas circunstâncias, o replanejamento se mostra vantajoso, impulsionado pela distribuição dos agentes proporcionada pela demanda uniforme.

Conclusões - A baixa ocupação da rede não foi suficiente para demonstrar diferenças significativas entre os agentes F e FR na demanda OD. Já na **demanda uniforme, o replanejamento se mostra vantajoso**. Estas observações indicam que a **estratégia de replanejamento é sensível a quantidade e forma de distribuição dos agentes na rede**.

6.5.3.2 Similaridade de percepção - grupo $\{P, PR\}$

Demanda OD - conforme os tempos médio de viagem apresentados na Figura 6.12a, até a classe 300 – 600, é perceptível uma tendência dos agentes P trafegarem mais rápido que os agentes PR . A partir daí, a tendência inverte, e os agentes P deixam de trafegar mais rapidamente que os agentes PR . A Figura 6.12c mostra que P percorreu distâncias maiores, enquanto a Figura 6.13a mostra que P percorreu por arestas de menor custo. Em suma, P trafegou distâncias maiores, por arestas de custos mais baixo, obtendo tempos de viagem mais elevados que PR . A partir daí, é possível concluir que o replanejamento reduziu a distância percorrida (rotas mais curtas), e apesar de não evitar o custo elevado, foi o suficiente para reduzir o tempo, considerando que não haviam muitos veículos na rede. Em linhas gerais, pode-se dizer que se não há um volume muito grande de veículos na rede, a menor distância deve ser também a mais rápida.

Demanda uniforme - apesar do replanejamento fazer com que os agentes PR trafeguem por regiões menos ocupadas que os agentes P , como se pode verificar na Figura 6.13a, a Figura 6.12b mostra que o tempo de viagem de PR em relação P é praticamente o mesmo, dado que o nível de ocupação da rede é baixo.

Conclusões - é possível perceber que, em **demanda OD e viagens curtas, é preferível permanecer na rota de menor distância**, mesmo que existam rotas de menor custo. Na demanda uniforme, o pequeno número de veículos não permite verificar diferenças significativas entre os agentes P e PR .

6.5.3.3 Similaridade de percepção - grupo $\{PC, PCR\}$

Demanda OD - conforme os tempos médio de viagem apresentados na Figura 6.12a, é perceptível uma tendência até a classe 1200 – 1500, dos agentes PC trafegarem mais rápidos que os agentes PCR . A partir desta classe, ocorre uma mudança de tendência, quando os agentes PCR passam a trafegar mais rapidamente que os agentes PC . Agentes PCR percorreram distâncias menores que PC com custos maiores. Mais uma vez, pode-se dizer que se não há um volume muito grande de veículos na rede, a menor distância deve ser também a mais rápida.

Demanda Uniforme - o replanejamento acarretou tempos de viagem muito altos para os agentes PCR , como nota-se na Figura 6.12b . Entretanto, o número de viagens realizadas pelos agentes PCR é muito maior do que o realizado pelos agentes PC , como mostra a Figura 6.13c. O tempo médio de viagem mais elevado é indicativo que os agentes que precisam de mais tempo para concluir suas viagens não se beneficiam tanto do replanejamento, diferente daqueles que precisam de menos tempo (distâncias menores), que realizaram um número elevado de viagens, mas sem que isso fosse o suficiente para reduzir o tempo de viagem dos agentes PCR de um modo geral.

Conclusões - mais uma vez, a baixa ocupação da rede não permite verificar elementos favoráveis ao replanejamento durante a viagem, o que corrobora a observação de que, **em viagens curtas, é preferível evitar o replanejamento**.

6.5.3.4 Similaridade de ação - grupo $\{F, P, PC\}$

Demanda OD - como pode ser visto na Figura 6.12a, os agentes P apresentam um tempo de viagem muito acima dos F e PC , até a mudança de tendência que ocorre a partir da classe 1800 – 2100. Apesar de ser uma classe que não possui um grande número de agentes, como se pode perceber a partir da Figura 6.14a, é a classe com os agentes que trafegam por mais tempo e por distâncias maiores. Isto evidencia uma tendência de

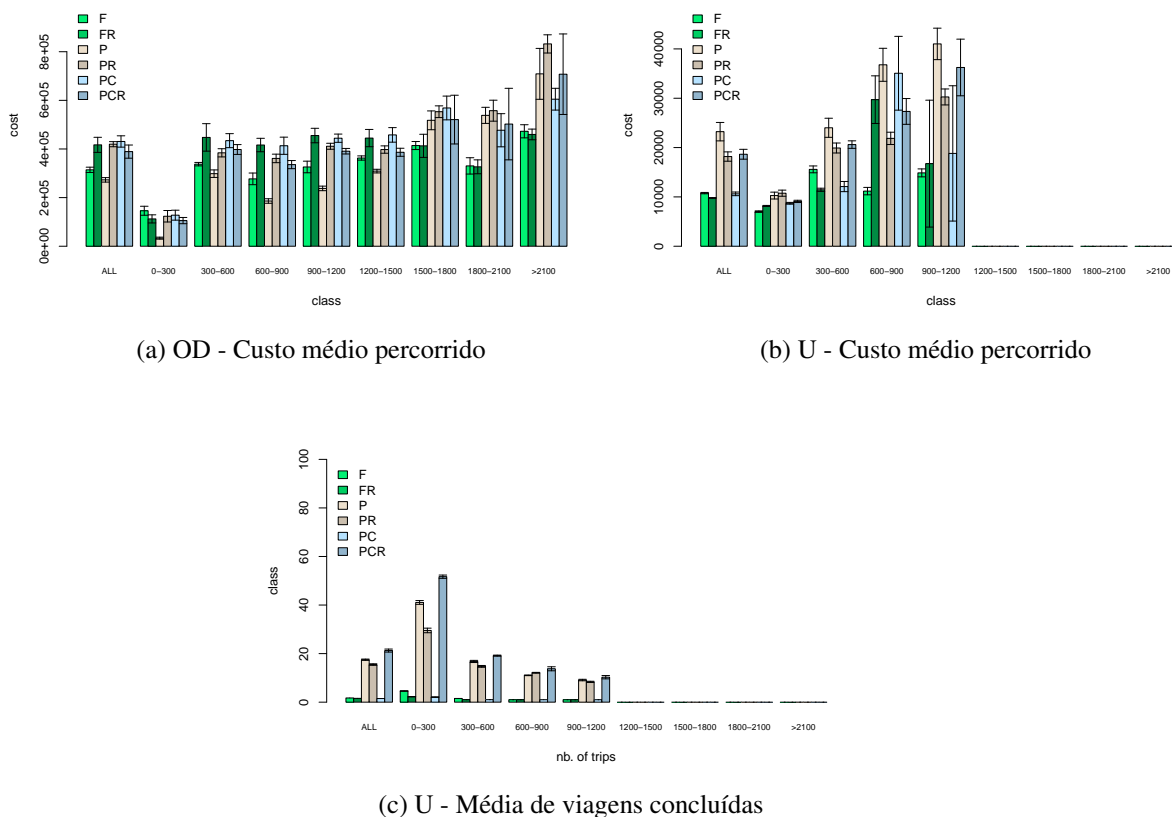


Figura 6.13: CMP e MVC para 20.000 viagens OD (esquerda) e uniforme (direita).

que quanto mais tempo os motoristas trafegam pela rede, maior o número de informações recebidas, o que tem impacto significativo nos agentes com percepção parcial. O replanejamento para os agentes com percepção parcial se mostrou mais eficiente do que os agentes com percepção completa.

Demanda Uniforme - como pode ser visto na Figura 6.12b, os tempos de viagem dos agentes P foram mais altos que F e FC , mas com um número de viagens muito maior de P em relação aos demais (Figura 6.13c). Como já havia sido evidenciado anteriormente, isto se deve ao grande número de agentes com viagens curtas. Pode-se concluir que para viagens rápidas (ou curtas) a percepção parcial é mais vantajosa do que uma percepção completa.

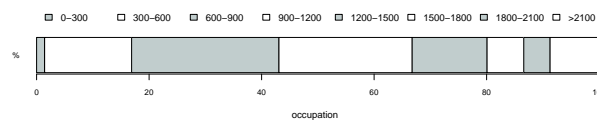
Conclusões - a demanda OD permite que os agentes façam distinções mais precisas das áreas de congestionamento, o que **colabora com aqueles agentes que realizam viagens mais longas**. Na demanda uniforme, a baixa ocupação da rede demonstra que o replanejamento é vantajoso em viagens curtas. Isso porque nas viagens longas, muito agentes com viagens curtas deixam a rede rapidamente, o que favorece o não surgimento de áreas de congestionamento. O replanejamento serve justamente para evitar áreas de congestionamento. Quando estas áreas não se formam, ou aparecem muito pouco, o replanejamento não se mostra vantajoso.

6.5.3.5 Similaridade de ação - grupo {FR, PR, PCR}

Demanda OD - como pode ser visto na Figura 6.12a, há uma tendência, que se pode verificar a partir da classe 900 – 1200, de que os agentes com percepção parcial tenham um tempo de viagem semelhante e mais baixo do que os agentes com percepção completa. Neste caso, a percepção completa tende a distribuir menos o tráfego do que a percepção parcial, o que justifica os tempos menores para os agentes com percepção parcial.

Demanda Uniforme - como pode ser visto na Figura 6.12b, o replanejamento permitiu aos agentes *PCR* equivaler os seus tempos de viagem a *FR*. Neste caso, a percepção proporcionada pela comunicação foi o suficiente para permitir aos agentes *PCR* trafegarem por áreas de baixa ocupação.

Conclusões - agentes com que se formam pela rede, como ocorre na demanda OD. Além disso, na demanda uniforme, nota-se uma **importante colaboração da comunicação** no desempenho dos agentes com esta habilidade.



(a) Densidade por classe - OD

Figura 6.14: Densidade por classe - 20.000 viagens OD e uniforme.

6.5.4 Análise com agrupamento de demandas

Nesta seção as análises serão conduzidas com foco na ação e percepção dos agentes (nível de abrangência O_f da Figura 6.1) comparando o desempenho dos tipos de agentes agrupados segundo os eixos de ação e percepção apresentados na Figura 6.2. Como mencionado anteriormente, os acrônimos para os tipos de agentes são definidos na Tabela 4.1. As conclusões discutidas nesta seção foram detalhadas nas seções 6.5.1, 6.5.2 e 6.5.3. Sugere-se que, para detalhamento, o leitor retome a leitura das referidas seções. O objetivo aqui é cruzar as análises destas seções, buscando elementos em comum ou elementos que diferenciem os resultados agrupados por demanda.

Agentes F quanto menor o número de veículos na RTV, melhor o desempenho em relação a *FR* na demanda OD. Conforme que o número de veículos aumenta, ocorre uma tendência dos agentes *F* piorarem seu desempenho a medida que as viagens ficam mais longas. Com a demanda uniforme, o desempenho dos agentes *F* é inferior aos agentes *FR* quando as viagens ficam mais longas, independentemente do número de veículos na rede. Em comparação com os agentes que não possuem capacidade de replanejamento, os agentes *F* tem um desempenho superior em viagens curtas.

Agentes FR há uma tendência do replanejamento melhorar o desempenho da percepção completa a medida que as viagens ficam mais longas, diminuindo a distância trafegada e tempo de percurso. Nesta mesma direção, a medida que os tempos de viagem aumentam, pior o desempenho dos agentes *FR* se comparados com agentes de percepção parcial. O replanejamento tem um desempenho melhor na demanda OD do que na uniforme. O replanejamento tem um impacto maior entre os agentes de percepção parcial.

Agentes P se comparados com *PR*, tem um desempenho melhor em viagens curtas. Possuem um desempenho melhor na demanda uniforme do que na OD. Se comparado com outros tipos de agentes que não replanejam, seu desempenho tende a melhorar a medida que as viagens ficam mais longas.

Agentes PR tem um bom desempenho tanto em viagens curtas quanto longas, mas nitidamente são superiores à percepção global (F e FR) a medida que as viagens ficam mais longas. Seu desempenho é notadamente melhor em condições de demanda OD do que uniforme.

Agentes PC tende a melhorar a medida que as viagens ficam mais longas, ainda que inferior a *PCR*. Seu desempenho na demanda OD é melhor do que na demanda uniforme. Tem um desempenho excepcionalmente bom quando a rede está pouco ocupada (ver resultados com 20.000 viagens na Seção 6.5.3). Seu desempenho é superior se comparado com outros agentes sem capacidade de replanejamento.

Agentes PCR tem o melhor desempenho que qualquer tipo de agente a medida que as viagens ficam mais longas. Seu desempenho é melhor em demanda OD do que uniforme. Além da notada superioridade em viagens longas, os agentes *PCR* conseguem manter um desempenho equilibrado em todas as classes.

Alguns aspectos são semelhantes ao que ocorre com a RTV Arteriais de Porto Alegre, como o desempenho superior da visão completa nas viagens curtas, e o desempenho superior da percepção parcial (com/sem comunicação) e do replanejamento nas viagens longas. Esta semelhança, independente de tipo de demanda e da RTV, dão indícios de que estes comportamentos poderão ser encontrados em outras condições de oferta e demanda. Estes indícios reforçam um comportamento geral destes aspectos, que é uma importante constatação dos experimentos observados.

Por outro lado, o replanejamento apresenta um comportamento distinto do que ocorre com a RTV Arteriais. Naquela rede o replanejamento tem desempenho superior na demanda OD com percepção completa e parcial, e demanda uniforme com percepção parcial estendida pela comunicação;

- percepção completa tem desempenho melhor nas viagens curtas;
- percepção parcial (com/sem comunicação) tem desempenho melhor nas viagens longas;
- replanejamento tem desempenho melhor em viagens longas;
- replanejamento tem desempenho melhor na demanda OD com percepção completa e parcial, e demanda uniforme com percepção parcial estendida pela comunicação;

6.6 Topologia 2: Grade

Bazzan e Kluegl (2007; 2008) propõem o uso de uma rede Grade, que apesar de não representar nenhum cenário urbano conhecido, suas características do ponto de vista do roteamento (o número de rotas possíveis é grande), guardam semelhança com vários cenários reais. Também por este motivo, esta topologia foi escolhida para ser investigada nesta dissertação. A RTV possui 36 nodos ligando 60 arestas para tráfego em sentido único, conforme identificado pelas setas da Figura 6.15. Cada célula mede 5 metros e

cada aresta possui 300 metros; a maioria das arestas possui apenas uma pista, comportando até 60 veículos. Entretanto, cinco destas arestas, assinaladas em negrito na Figura 6.15, possuem três pistas, comportando um total de 180 veículos cada aresta. Ao todo, a capacidade nominal da RTV é de 4200 veículos.

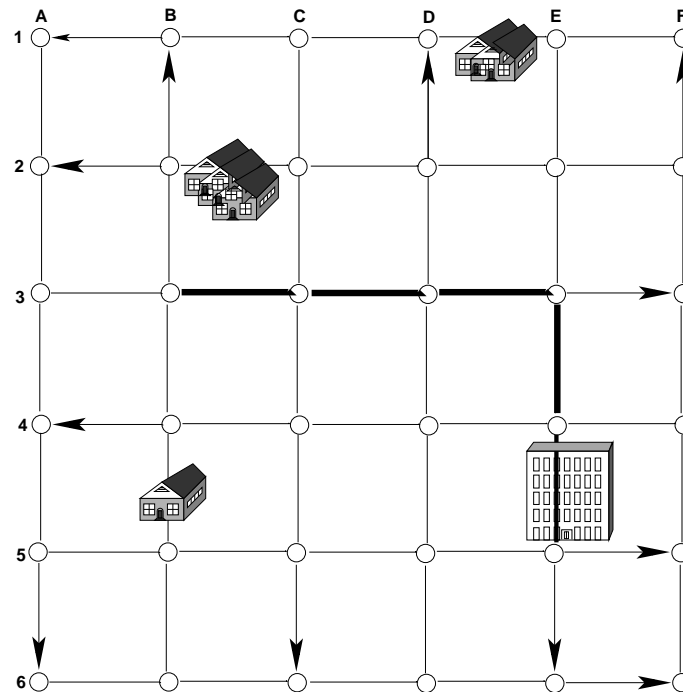


Figura 6.15: Rede Grade

Para a rede Grade, que possui 36 nodos, foram geradas demandas uniformes com a probabilidade de $1/36$ de cada nodo ser selecionado como origem ou destino. Com base na abordagem proposta por Bazzan e Kluegl (2008), a demanda OD, ou seja, não uniforme, para a rede Grade parte do pressuposto que 60% dos motoristas possuem o mesmo destino, representado pelo nodo E4E5 que pode ser visto na Figura 6.15, e que representa uma grande área comercial. Cada um dos outros nodos possuem uma probabilidade de $1/35$ de serem escolhidos como destino. As origens são igualmente distribuídas na grade, com três exceções apenas (três áreas residenciais principais): B5B4, E1D1 e C2B2, respectivamente com probabilidade de 3, 4 e 5% de se tornarem origem. Aos nodos restantes a distribuição de probabilidade se dá uniformemente, cada um com probabilidade de $1/33$. A partir da distribuição mencionada acima, foi gerada a matriz OD demonstrada na Tabela 6.3, permitindo que fossem geradas demandas OD para a rede Grade.

Tabela 6.3: Matriz OD da rede Grade.

<i>Nodos</i>	E4E5	<i>Prob. origem</i>
B5B4	1.67	0.04	0.04	0.04	...	3%
E1D1	1.67	0.07	0.07	0.07	...	4%
C2B2	1.67	0.1	0.1	0.1	...	5%
...	1.67	0.03	0.03	0.03	...	2.72%
<i>Prob. destino</i>	60%	1.2%	1.2%	1.2%	...	100%

O somatório da coluna E4E5 é igual a 60, indicando que o respectivo nodo possui uma probabilidade 60% de ser escolhida como destino. Considerando que a rede Grade possui

36 nodos, a matriz OD é quadrada de ordem 36. Entretanto, para facilitar a leitura, os demais nodos com exceção dos principais E4E5, B5B4, E1D1 e C2B2 foram suprimidos por "...". Nestes casos os nodos possuem uma probabilidade de 0.03% (1/33) de serem escolhidos quando não estiverem relacionados aos nodos principais.

Nesta seção serão apresentadas as análises dos experimentos executados na RTV Grade, demandas uniforme e OD, respectivamente com 4.200, 6.000 e 8.000 viagens. Apesar da capacidade da rede ser para 4.200 veículos, foram utilizados valores acima desta marca por duas razões. Primeiro, porque através de experimentos preliminares, não foi possível encontrar resultados relevantes com demandas inferiores a 4.200 (a ocupação se manteve alta por pouco tempo). Segundo, porque o mecanismo de manipulação de bloqueios do ITSUMO (apresentado na Seção 5.1.4), permite a utilização de demandas superiores ao tamanho da rede, mantendo assim a rede com alta ocupação por mais tempo.

Cada simulação foi executada durante 10.000 steps, tempo mais do que suficiente para que todos os agentes concluíssem pelo menos uma viagem. Seguindo a abordagem apresentada na Seção 6.4, os resultados serão mostrados em classes, que agrupam os tempos médio de viagem. Devido a amplitude dos resultados, foram criadas sete classes: 0-500, 500-520, 520-540, 540-560, 560-580, 580-600, >600. Por exemplo, a classe 500-520 agrupa os resultados com tempo médio de viagem entre 500 e 520 steps; já a classe >600 agrupa os resultados com tempo médio de viagem acima de 600 steps.

6.6.1 Análise detalhada de oferta, demanda e agentes

Novamente, no intuito de facilitar a leitura e interpretação dos resultados, as análises no nível de abrangência Dm para topologia Grade, das distribuição de demanda uniforme e OD com 4.200, 6.000 e 8.000 viagens serão apresentadas no Apêndice A.

6.6.2 Análise com agrupamento de demandas

Nesta seção as análises serão conduzidas com foco na ação e percepção dos agentes (nível de abrangência Ag da Figura 6.1) comparando o desempenho dos tipos de agentes agrupados segundo os eixos de ação e percepção apresentados na Figura 6.2. Como mencionado anteriormente, os acrônimos para os tipos de agentes são definidos na Tabela 4.1. As conclusões discutidas nesta seção foram detalhadas nas seções A.1.1, A.1.2 e A.1.3. Sugere-se que, para detalhamento, o leitor retome a leitura das referidas seções. O objetivo aqui é cruzar as análises destas seções, buscando elementos em comum ou elementos que diferenciem os resultados agrupados por demanda.

Agentes F a capacidade de percepção completa se mostrou vantajosa em percursos curtos, notadamente na classe 0 – 500, com um TMV mais baixo na demanda OD do que na uniforme. Em comparação com outros tipos de agentes, o desempenho na demanda OD também foi mais promissor do que na demanda uniforme. A medida que as viagens ficam mais longas (classes maiores) a percepção completa tende a piorar seu resultado em comparação as percepções parciais. Os comportamentos descritos anteriormente são visíveis em todas os tamanhos de demanda, mas na demanda de 8.000 viagens a semelhança dos resultados com outros tipos é muito grande, o que demonstra que esta rede não responde muito bem a um número tão elevado de viagens.

Agentes FR a capacidade de percepção completa aliada ao replanejamento (FR) se mostrou superior a percepção completa sem replanejamento (F) quando as viagens ficam mais longas. Entretanto, se comparados com os outros tipos, os agentes FR

não obtém um desempenho vantajoso. Os agentes *FR* possuem um desempenho melhor na demanda uniforme do que na OD, ao contrário do que ocorre com os agente *F*.

Agentes P possuem um desempenho superior aos agentes *PR*, especialmente na demanda OD, enquanto na demanda uniforme há uma semelhança muito grande com os agentes *PR*. É possível perceber uma tendência de que estes agentes melhorem seu desempenho a medida que as viagens ficam mais longas. Apesar destes agentes percorrem distâncias maiores, isto não impacta no seu tempo de viagem.

Agentes PR a percepção completa aliada ao replanejamento não mostrou se mostrou vantajosa se comparada aos agentes *P*, mesmo trafegando por distâncias menores, não foi o suficiente para reduzir seu tempo de viagem. Esta desvantagem é mais evidente na demanda OD, havendo um equilíbrio entre agentes *P* e *PR* na demanda uniforme. Em comparação com agentes de percepção completa, seu desempenho tende a melhorar a medida que as viagens ficam mais longas. Seu desempenho fica abaixo dos agentes com capacidade de comunicação.

Agentes PC a capacidade de comunicação auxilia os agentes com percepção parcial a melhorarem seu desempenho, que apesar de muito semelhante aos agentes *P*, são superiores a estes. A medida que as viagens ficam mais longas, é possível perceber um desempenho melhor para os agentes *PC* tanto em demanda uniforme quanto OD, em comparação com os outros tipos de agentes. Este tipo de agente não obtém um bom desempenho em viagens curtas.

Agentes PCR os agentes *PCR* possuem um desempenho inferior aos agentes *PC*, mas com uma diferença menor do que a verificada entre os agentes *P* e *PR*. Isto demonstra que a comunicação trouxe um acréscimo de desempenho aos agentes *PCR*, ainda que insuficiente para demonstrar um desempenho superior a *PC*. A diferença entre *PC* e *PCR* é pouco perceptível na demanda uniforme, apesar de haver uma tendência de piorar a medida que os tempos de viagem ficam mais longos, se comparado a *PC*.

Em suma:

- percepção completa tem desempenho melhor nas viagens curtas;
- percepção parcial (com/sem comunicação) tem desempenho melhor nas viagens longas;
- replanejamento tem desempenho melhor em viagens longas;
- replanejamento tem desempenho melhor na demanda uniforme com percepção completa e parcial, e demanda OD com percepção parcial estendida pela comunicação V2V.

6.7 Análise com agrupamento dos tipos de agentes

Nesta seção as análises serão conduzidas com foco na oferta - RTV's - (nível de abrangência *Of* da Figura 6.1). Este foco, busca elementos gerais observados nas duas RTVs, com relação ao seu desempenho dos motoristas sob diferentes condições de demanda.

Há muitas semelhanças entre os resultados observados nas duas RTVs, como veremos na Seção 6.8. No entanto, a principal diferença observada entre as redes, está relacionado ao desempenho da capacidade de replanejamento nas condições de demanda OD e uniforme, como mostrado na Tabela 6.4. Esta tabela demonstra qual o tipo de demanda que o replanejamento durante a viagem exibiu os melhores resultados em cada RTV.

Tabela 6.4: Demanda em que o replanejamento durante a viagem demonstrou os melhores resultados, em cada RTV.

Rede	Percepção completa ou parcial	Percepção parcial com comunicação
Grade	demanda uniforme	demanda OD
Arteriais	demanda OD	demanda uniforme

Enquanto na rede Grade, os agentes com percepção completa ou parcial, tem um desempenho melhor ao replanear na demanda uniforme, estes agentes na rede Arteriais, tem um desempenho melhor ao replanear na demanda OD. Da mesma forma, enquanto na rede Grade, os agentes com percepção parcial estendida pela comunicação tem um desempenho melhor ao replanear na demanda OD, na rede Arteriais estes agentes tem um desempenho melhor na demanda uniforme. Esta observação permite concluir que:

- a comunicação V2V aliada ao replanejamento será vantajosa:
 - para replanear rotas em redes com topologia regular, em estilo de grade, quando houver concentração do tráfego em determinadas áreas do mapa;
 - para replanear rotas em redes de topologia irregular, quando o tráfego estiver disperso pela rede, com poucas áreas de concentração.

6.8 Discussão das principais conclusões

Nesta seção serão enumeradas algumas observações gerais dos resultados, fazendo uma análise mais livre. Esta avaliação pretende relacionar e procurar elementos generalizáveis para os resultados, prevendo uma possível análise para outras situações de oferta e demanda. Além disso, serão exploradas algumas analogias para tornar a explicação mais didática.

Uma suposição que talvez muitos de nós façamos, é de que quanto mais conhecimento sobre as condições de trafegabilidade tivermos, melhor nossa capacidade para evitar áreas congestionadas. Os experimentos realizados com o AVNET demonstram que se esse conhecimento é o mesmo para todos os motoristas na RTV a tendência é justamente inversa: como todos os motoristas acabam se dirigindo para as mesmas regiões, tidas como desocupadas, em pouco tempo estas áreas ficam congestionadas. É semelhante formação de filas no supermercado, quando um caixa que estava desativado começa a operar. Como todas as pessoas percebem ao mesmo tempo que o caixa está livre, muitas se dirigem simultaneamente para o mesmo lugar, formando, em poucos segundos, uma nova fila.

Outra observação interessante diz respeito ao replanejamento. Quando realizamos viagens curtas, o replanejamento não é vantajoso. É mais rápido concluir uma viagem curta seguindo a rota originalmente calculada, do que trafegar por áreas menos ocupadas mas trafegando por distâncias maiores. Analogamente, é como duas pessoas que desejam pagar uma fatura e se dirigem até a agência bancária “A”. Uma delas vai para a fila e espera para ser atendida, enquanto a outra, uma pessoa pouco paciente, não fica satisfeita

com o tamanho da fila e se dirige para a agência “B”. Apesar da fila não ser tão grande, o cliente ansioso prefere andar alguns quarteirões até a outra agência. Na agência “B”, a fila é muito menor, mas somando-se o tempo de deslocamento, a pessoa que permaneceu na agência “A” será atendida primeiro. Por outro lado, quando os percursos são mais longos o replanejamento torna-se vantajoso. Seguindo a analogia das agências bancárias, se a fila na agência “A” é realmente grande, a pessoa que foi até a agência “B” compensou o tempo de deslocamento ao permanecer pouco tempo na fila para ser atendida.

A percepção parcial, especialmente quando expandida pela comunicação, demonstrou resultados realmente promissores. Foi capaz de evitar que muitos motoristas fossem para o mesmo lugar, já que possuem percepções distintas do tráfego. Uma situação análoga ao que acontece quando um grupo de amigos planeja ir para a mesma festa. Como o grupo é grande, alguns amigos mais próximos decidem se encontrar em outro lugar, evitando a festa com muitas pessoas. Alguns acabam indo para uma festa e outros para outra, e assim nenhuma delas fica lotada. É semelhante ao que acontece com a ocupação dos veículos na rede, distribuindo o tráfego de forma mais equilibrada.

A ocupação da rede também é preponderante para o desempenho do replanejamento. Quando a rede está com sua ocupação muito baixa, não é vantajoso replanear. Quando a rede está muito ocupada, é difícil perceber alguma vantagem em replanear. A explicação é simples: com poucos motoristas trafegando pela rede, a tendência é de que a viagem mais curtas também seja a mais rápida, pois dificilmente surgirão congestionamentos. Por outro lado, quando há muitos motoristas na rede, não restam áreas pouco ocupadas para dispersar o tráfego.

7 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

Para finalizar esta dissertação, este capítulo trará as considerações finais e as sugestões para novas pesquisas. Através das considerações finais, o leitor terá uma visão panorâmica da dissertação, onde poderá lembrar as conclusões de cada capítulo, na ordem em que elas foram apresentadas. Por fim, as sugestões de trabalhos futuros, indicam algumas possibilidades de pesquisa aqueles que estiverem interessados no AVNET, contribuindo com novos desdobramentos para este trabalho.

7.1 Considerações Finais

O aumento na demanda de transporte veicular vem acompanhando o crescimento econômico e populacional ao redor do mundo. O efeito colateral são os congestionamentos, que também crescem à medida que cresce a demanda por mobilidade. A expansão da infraestrutura, construindo novas vias, é uma forma de solução para o problema. No entanto, está longe de ser a mais viável, tanto econômica quanto ecologicamente. A otimização da infraestrutura existente, por outro lado, parece ser mais exequível. Esta otimização depende parcialmente dos motoristas, da sua capacidade de decidir por onde trafegar. Estas decisões, naturalmente, não obedecem a nenhum tipo de coordenação, o que provavelmente irá beneficiar o sistema de transporte como um todo. Para minorar o impacto da falta de coordenação, ou até mesmo induzir implicitamente alguma forma de coordenação, a tecnologia da informação torna-se um grande aliado dos motoristas. Um dos mecanismos investigados nesta dissertação é a utilização da tecnologia com o objetivo de prover informações ao motorista, colaborando na sua tomada de decisão.

No entanto, ainda que estejamos esperando resultados promissores da aplicação da tecnologia da informação no tráfego veicular, poderíamos nos perguntar se o impacto causado será exatamente o esperado. Uma forma mais segura e razoável de se fazer isso, é simular e investigar os efeitos antes de aplicar na prática. Atualmente já existem muitas pesquisas neste sentido, procurando aplicar alguma técnica computacional capaz de colaborar na redução dos congestionamentos. A primeira preocupação dos pesquisadores é a forma como a simulação será conduzida. Podemos estabelecer aspectos relevantes para a modelagem do ambiente e ignorar aqueles menos relevantes. Podemos até mesmo definir quais métricas serão utilizadas, quais sistemas serão impactados (motoristas, semáforos, etc.). No entanto, se o nosso modelo não for capaz de abstrair o mecanismo decisório dos motoristas e mostrar o resultado com base neste mecanismo, estaremos visualizando resultados que não dizem respeito a ação ou percepção do motorista, mas apenas do resultado coletivo deste comportamento. Considerando esta necessidade, esta dissertação propõe uma abordagem baseada em agentes autônomos, que se comportam como motoristas, e sofrem o impacto direto da tecnologia aplicado ao tráfego veicular.

Seguindo o raciocínio estabelecido até aqui, uma série de pesquisadores estão igualmente interessados em investigar os efeitos da tecnologia na vida dos motoristas. São grandes os esforços para incorporar em nosso dia-a-dia as contribuições científicas dos mais diversos ramos. No Capítulo 1 vimos algumas destas contribuições voltadas a aplicação de teoria de jogos, através *congestion games* e *minority games*. Outras contribuições estão voltadas ao uso do aprendizado de máquina, especialmente o aprendizado por reforço, para induzir algum tipo de coordenação no comportamento dos motoristas. Há também a aplicação da comunicação e disseminação de informações no intuito de contribuir com a decisão dos motoristas. Mas, infelizmente, para as pretensões desta dissertação, ou estas abordagens não tratam o motorista como uma entidade autônoma ou não abstraem um modelo de motorista com tantos detalhes quanto se possa desejar. Isso é fundamental para que possamos analisar a interação entre a oferta, a demanda e os próprios motoristas. Cada elemento tem um impacto nos congestionamentos, mas qual o impacto da interação entre os três elementos?

A abordagem proposta nesta dissertação, o AVNET, deseja responder qual o efeito no balanceamento de carga de uma RTV de acordo com determinadas condições de oferta, demanda e características dos motoristas. Deseja-se investigar o impacto que o replanejamento durante a viagem causa no balanceamento de carga; deseja-se responder, qual a contribuição da percepção do agente na dispersão pela RTV, enfim, perguntas que precisam de uma abordagem capaz de respondê-las. O AVNET tem este objetivo, e para isso, foi estruturado de modo a comportar oferta, demanda e motoristas, prevendo as características desejáveis em cada um deles. Em relação a oferta, é fundamental oferecer variabilidade na escolha das RTV's, para verificar o quanto uma topologia impacta nas tentativas de balanceamento de carga. Talvez a própria topologia precise de mudanças (no sentido do tráfego, por exemplo). A modelagem das RTV's através de grafos, é o suficiente para investigar este tipo de efeito. Com relação a demanda, é preciso compreender que a distribuição dos agentes *a priori* pode ter algum tipo de impacto não previsto, que irá responder de diferentes formas às tentativas de distribuição do tráfego pela RTV. Um cenário onde a demanda por mobilidade concentra as origens e destinos em determinados locais da rede, terá o mesmo tipo de resposta as soluções aplicadas em redes onde as origens e destinos estão dispersas pela rede? É por esta razão que o AVNET preconiza a necessidade de variar as condições de demanda.

Além da oferta e da demanda, o AVNET prevê a necessidade de investigarmos os efeitos do próprio motorista no balanceamento de carga da RTV. Motoristas com distintas capacidades de percepção do tráfego ao seu redor, e com a possibilidade de recalcularem suas rotas durante o deslocamento, terão o mesmo impacto sobre a dispersão do tráfego na RTV? Um motorista que apenas percebe o tráfego nas vias por onde trafega, terá o mesmo tempo de viagem de um motorista capaz de receber informações sobre o estado da RTV? Ao tratarmos os motoristas como indivíduos autônomos, podemos verificar uma infinidade de efeitos das ações sobre o ambiente, tanto quanto seja possível modelar o comportamento deste motorista. Por esta razão, que o AVNET utiliza uma modelagem baseada em agentes, pois está em conformidade com as necessidades a serem investigadas nesta dissertação (interação entre oferta, demanda e agentes).

A abordagem do AVNET foi implementada através de uma arquitetura que tem como base o ITSUMO, um simulador de tráfego veicular microscópico, que incorpora o modelo de motorista proposto nesta dissertação. Este simulador tem as características desejáveis para modelagem de um motorista autônomo, capaz de tomar suas próprias decisões. Com relação a oferta, o ITSUMO permite desde a utilização de cenários simples e abstratos,

até cenários complexos semelhantes a grandes topologias de tráfego urbano. Com relação a demanda, o ITSUMO permite utilizarmos distribuições uniformemente distribuídas, ou baseadas em uma matriz de probabilidades de origem e destino. Além disso, diversos tamanhos de demandas podem ser utilizados de acordo com a necessidade e capacidade do cenário investigado. Os agentes neste simulador, possuem um comportamento tático implementado através de um modelo de autômato celular, onde o veículo ocupa posições discretas na rede com o passar do tempo, e estratégico, que corresponde as diversas capacidades de ação e percepção introduzidas pelo AVNET.

Para avaliação da abordagem e sua arquitetura, foram realizados uma série de experimentos onde houve variações nas condições de oferta, demanda e tipos de agentes. Os parâmetros envolvidos na simulação dos experimentos, assim como a própria ordem de execução da simulação, foram demonstrados e discutidos. As estatísticas coletadas foram detalhadas, bem como a relação entre elas. A execução dos experimentos gerou uma série de resultados que foram apresentados e analisados a partir de uma metodologia *bottom-up* de análise, partindo de uma visão das partes e suas interações, para construir uma visão geral dos resultados. Esta metodologia introduziu os conceitos de classe e nível, fundamentais para organizar os resultados e sistematizar sua análise. Uma classe agrupa um conjunto de motoristas cujo tempo para conclusão de uma viagem está dentro do intervalo da classe. Assim, é possível verificar comportamentos distintos em viagens curtas, médias e longas, além é claro, de tornar a apresentação mais simples e intuitiva para o leitor.

Durante a discussão dos resultados, foram apresentadas conclusões que procuraram sumarizar para o leitor a interpretação dos resultados. Estas interpretações serviram de base para avaliar a relevância da abordagem e sua arquitetura, ao investigar o balanceamento de carga em RTVs. Os tipos de agentes tiveram suas capacidades de ação e percepção discutidas pontualmente, à medida que houveram variações na oferta e na demanda. Além disso, as análises pontuais contribuíram para a construção de análises de mais alto nível, mostrando as correlações entre os tipos de agentes, a oferta e a demanda.

Tais análises levaram a conclusões importantes. Verificou-se que o conhecimento completo do estado da rede por todos os motoristas, apenas realoca o congestionamento em outras regiões da rede. Todos acabam se deslocando para áreas supostamente livres, que logo acabam congestionadas. O replanejamento se mostrou vantajoso em viagens longas, e inútil em viagens curtas. A percepção parcial, especialmente quando expandida pela comunicação, demonstrou resultados realmente promissores. Foi capaz de proporcionar o melhor equilíbrio na distribuição do tráfego em comparação com os agentes que possuíam percepção completa. O nível de ocupação da rede também é preponderante para o desempenho do replanejamento. Redes pouco ocupadas, conseqüentemente sem congestionamento, assim como redes muito ocupadas e sem novas áreas para dispersar o tráfego, não são opções atraentes para o replanejamento.

Finalmente, as discussão dos resultados permitem dizer que o AVNET dá um importante passo para o entendimento dos fenômenos que emergem em sistemas de tráfego, partindo do ponto de vista do motorista (aqui representado por um agente) em uma visão *bottom-up* deste tipo de sistema complexo, em oposição à maioria da literatura que usa abordagens macroscópicas. Ainda que existam novas abordagens que poderão se somar ao AVNET, o objetivo proposto na abordagem e a construção de sua arquitetura, fornecem elementos para concluir que a investigação da interação entre oferta, demanda e agentes foi realizada dentro das expectativas que motivaram esta dissertação.

7.2 Sugestões para Pesquisas Futuras

Ao envolver três elementos complexos como são a oferta, a demanda e os agentes, são facilmente encontradas várias situações que poderiam ser testadas através do AVNET. No entanto, existem variações na abordagem e até mesmo na arquitetura que seriam pouco relevantes para o objetivo desta dissertação, e que por esta foram deixadas de fora. Por exemplo, entendeu-se que não seria necessário, neste momento, considerar que os motoristas poderiam fornecer informações falsas sobre o estado da rede. Esta seção registra algumas situações que foram discutidas durante a elaboração desta dissertação, mas que por serem consideradas de pouca relevância para o objetivo do trabalho, foram relegadas para outro momento.

Uma situação diz respeito ao agrupamento dos diferentes tipos de agentes atuando no ambiente ao mesmo tempo. Seria possível definir tamanhos de população para cada tipo de agente (e.g. 30% de agentes *FNR*, 10% de agente *LC*, ...), e verificar o resultado da interação entre diferentes tipos de agentes ao mesmo tempo. É uma extensão bastante simples, pois se faz necessário apenas definir a proporção de agentes de cada tipo. Porém, o número de experimentos executados é, potencialmente, muito grande. Espera-se que a metodologia de análise proposta nesta dissertação seja robusta o bastante para suportar também esta nova forma de experimentação.

Outra situação para ser averiguada, é a análise de redes com controle semafórico. Durante a elaboração da dissertação foram realizadas algumas análises deste tipo, que culminaram na publicação de um artigo (BAZZAN et al., 2011). No entanto, esta investigação não abordava todo o escopo proposto na dissertação, e incluí-la neste escopo traria uma carga excessiva de resultados que prejudicariam a sua avaliação. A utilização de controle semafórico, por si mesma, traz uma série de abordagens de controle, parâmetros e discussões que ficam de fora do tema principal abordado neste trabalho.

Novos mecanismos que disparem o replanejamento, além da estratégia baseada em atraso, também poderiam ser exploradas. Outros limites para a comunicação entre os veículos poderiam ser estabelecidos, até mesmo para verificar o impacto da abrangência do sinal na comunicação, aumentando e diminuindo o raio de percepção dos agentes. Além disso, poderia ser explorado o impacto causado agentes por agentes maliciosos, verificando que tipo de efeitos isto teria no balanceamento de carga. Finalmente, como sugestão, os agentes poderiam comunicar não só o estado das arestas da RTV, mas informar as arestas que compõem a sua rota. Os agentes poderiam inferir o estado de determinadas arestas da RTV, a partir do conhecimento da posição dos outros agentes no futuro. A avaliação quanto ao uso do conhecimento para o cálculo da rota nas viagens seguintes, ainda que não ocorra o replanejamento, é outro aspecto que poderá ser explorado. Atualmente não é conhecido o impacto desta ação nos resultados.

Um questionamento importante é sobre a validade ou generalização dos resultados obtidos através do AVNET. Possivelmente investigações com outras condições de oferta e demanda respondam este questionamento. Apesar de muitas conclusões serem semelhantes entre uma rede e outra, o que indica algum nível de generalização dos resultados, mais dados ajudariam a corroborar as afirmações estendendo-as a outros cenários.

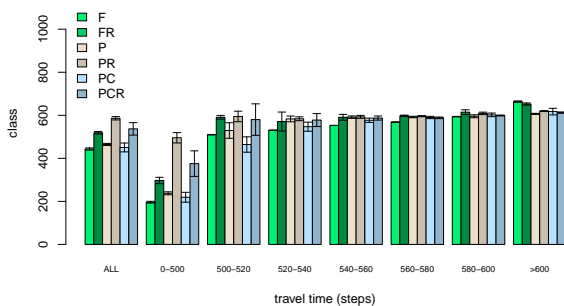
Evidentemente que estas sugestões, dependerão exclusivamente do foco a ser dado. O AVNET dá um primeiro passo ao construir uma base que possibilite explorar aspectos mais pontuais sobre a oferta, a demanda ou motoristas. A depender do interesse do pesquisador, um elemento terá maior relevância do que outro. Deste modo, há um grande potencial para construção de uma abordagem ainda mais sólida para investigação dos congestionamentos, este vilão nosso de cada dia!

APÊNDICE A ANÁLISE DA TOPOLOGIA GRADE

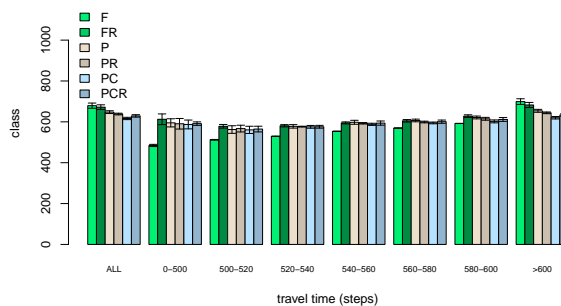
A.1 Topologia 2: Grade

A.1.1 Análise detalhada de oferta, demanda e agentes para 4.200 viagens

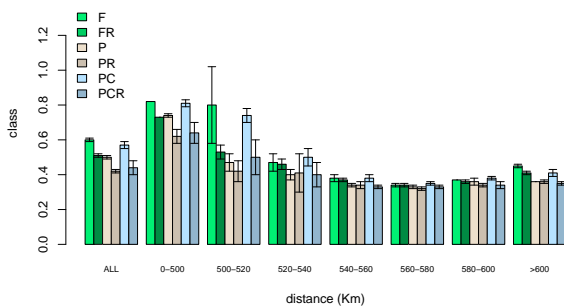
Nesta seção, serão conduzidas as análises no nível de abrangência D_m para topologia Grade, para as distribuições de demanda uniforme e OD com 4.200 viagens. Serão comparados o desempenho dos tipos de agentes agrupados segundo os eixos de ação e percepção apresentados na Figura 6.2.



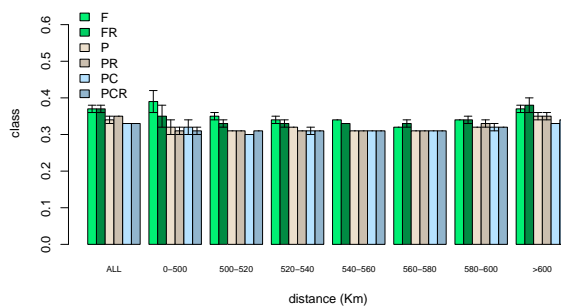
(a) OD - Tempo médio de viagem



(b) U - Tempo médio de viagem



(c) OD - distância média percorrida



(d) U - distância média percorrida

Figura A.1: TMV e DMP para 4200 viagens OD (esquerda) e uniforme (direita).

A.1.1.1 Similaridade de percepção - grupo $\{F, FR\}$

Demanda OD - os agentes do tipo FR somente apresentam um tempo de viagem menor que F na classe > 600 (Figura A.1a). A partir daí, e considerando a distribuição da classe ALL , pode-se dizer que o replanejamento neste caso não se mostrou vantajoso. Entretanto, há uma tendência de redução no tempo de viagem a medida que os tempos de viagem ficam mais longos.

Demanda Uniforme - assim como ocorre na demanda OD , os agentes FR somente apresentam um tempo de viagem menor que F na classe > 600 (Figura A.1b). Entretanto, a distribuição na classe ALL demonstra uma pequena vantagem para os agentes que replanejam. Aqui também há um indicativo ainda mais promissor de que o tempo de viagem irá reduzir a medida que os tempos de viagem fiquem mais longos.

Conclusões - apesar dos agentes FR apresentarem um tempo maior, a Figura A.1c demonstra que trafegam por distâncias menores. Considerando ainda o equilíbrio dos custos mostrados na Figura A.2a, é possível concluir que os agentes FR encontraram caminhos mais curtos, com um custo médio relativamente igual aos agentes F , mas a quantidade de agentes e a sua dispersão na rede inerente a demanda uniforme, **não foi o suficiente para mostrar uma vantagem significativa em replanejar.**

A.1.1.2 Similaridade de percepção - grupo $\{P, PR\}$

Demanda OD - o tempo médio de viagem dos agentes P se mantém menor que o tempo dos agentes PR , em todas as classes. Este comportamento fica evidente na classe ALL da Figura A.1a. Por outro lado, a distância média percorrida pelos agentes PR é menor que os agentes P . O comportamento mais visível é a diferença existente entre P e PR na classe $0 - 500$.

Demanda uniforme - os tempos de viagem são muito semelhantes entre as classes P e PR .

Conclusões - considerando a semelhança dos custos entre os agentes P e PR (Figura A.2a), e a grande diferença existente entre eles na classe $0 - 500$, é possível concluir que o **replanejamento para evitar custos maiores, é ineficaz devido a pequena distância dos trajetos.** Também é ineficaz a tentativa de replanejamento de um modo geral, mas replanejar em percursos pequenos, não é vantajoso. A distribuição proporcionada pela demanda uniforme demonstra que o esforço em replanejar não é efetivo, pois o tempo médio de viagem é praticamente o mesmo entre os agentes P e PR .

A.1.1.3 Similaridade de percepção - grupo $\{PC, PCR\}$

Demanda OD - as observações obtidas da comparação entre P e PR continuam válidas, mesmo após a inclusão da comunicação para expandir a capacidade de percepção dos agentes. Entretanto, a diferença entre PC e PCR , especialmente na classe $0 - 500$, é menor do que a percebida entre P e PR . Isto demonstra que a comunicação aproximou o replanejamento de resultados menores, apesar de ainda insatisfatórios.

Demanda Uniforme - assim como ocorrida nos tipos P e PR , os tempos de viagem são muito semelhantes entre os tipos PC e PCR .

Conclusões - as mesmas conclusões obtidas da comparação entre P e PR continuam válidas. O diferencial, é que mesmo para viagens de curta distância da demanda OD , **a comunicação V2V colabora para que o replanejamento seja mais efetivo.** Já para a demanda uniforme, os resultados reforçam que para este tamanho de demanda, não há vantagem em replanejar, pois os veículos estão bem distribuídos pela rede, não havendo

áreas de concentração para serem evitadas.

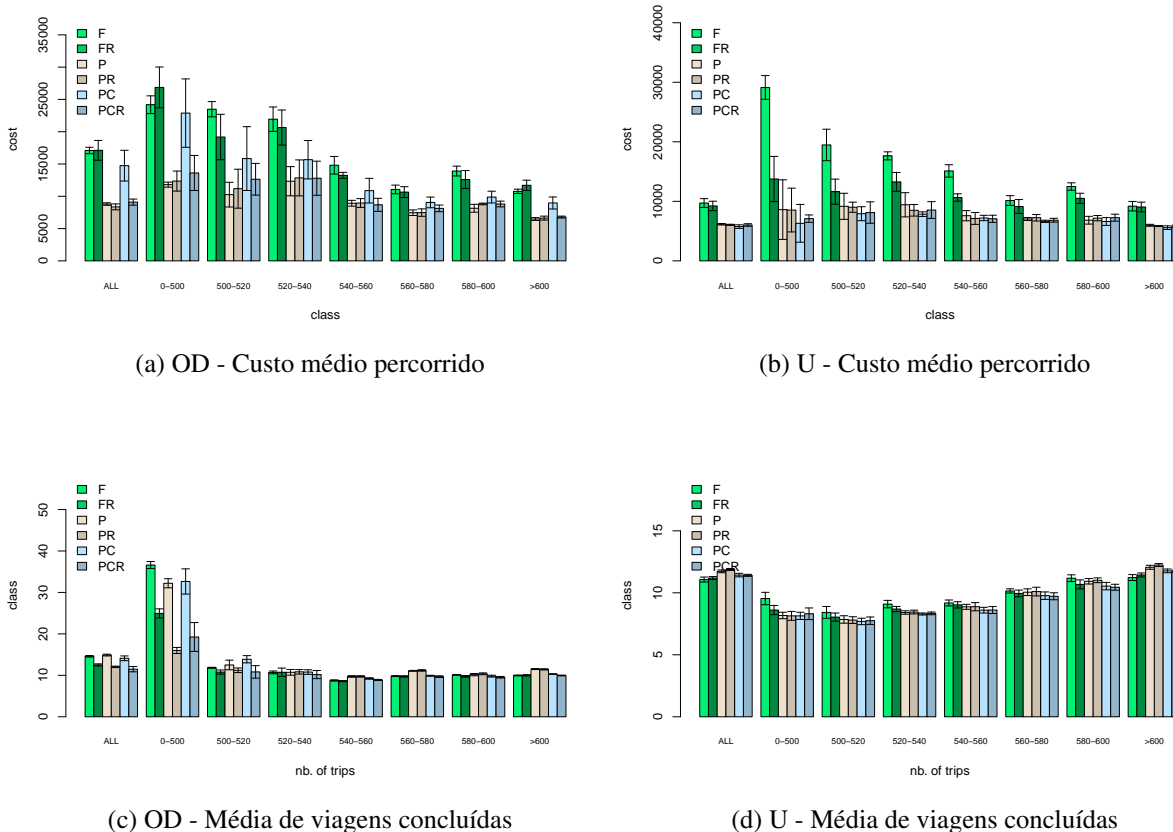


Figura A.2: CMP e MVC para 4200 viagens OD (esquerda) e uniforme (direita).

A.1.1.4 Similaridade de ação - grupo $\{F, P, PC\}$

Demanda OD - conforme demonstra a classe *ALL* (Figura A.1a), os agentes *PC* possuem um *TMV* inferior aos demais. Em viagens curtas, como se pode verificar na classe 0 – 500, a percepção global obtém um *TMV* inferior aos demais. Também é possível verificar uma tendência de que a percepção global piore o seu resultado a medida que as viagens demorem mais para acabar, especialmente pelo que podemos perceber pelo *TMV* da classe 600.

Demanda Uniforme - Os *TMV* das classes –500 até 580 – 600 evidenciam um resultado melhor para os agentes *F*. Entretanto, na classe > 600 que possui a maior concentração de veículos como mostra a Figura A.3a, o desempenho de *F* é o pior dentre todas as classes. Em geral, o tipo *PC* obtém o melhor *TMV*, como se pode perceber na classe *ALL*. Este resultado foi impulsionado pelo desempenho superior obtido na classe > 600 .

Conclusão - a percepção parcial estendida pela comunicação V2V proporciona resultados melhores a medida que as viagens ficam mais longas. Isto é um indicativo de que quanto mais tempo os motoristas trafegam, maior a precisão sobre o estado da rede. Entretanto os agentes *PC* possuem conhecimento inferior sobre o estado da RTV ao dos agentes *F*, o que é o suficiente para evitar que estes agentes trafeguem pelos mesmos lugares. **A percepção completa é vantajosa apenas em viagens curtas**, pois devido a regularidade (quadrada) da rede grade, em viagens curtas a menor rota tende a ser a mais

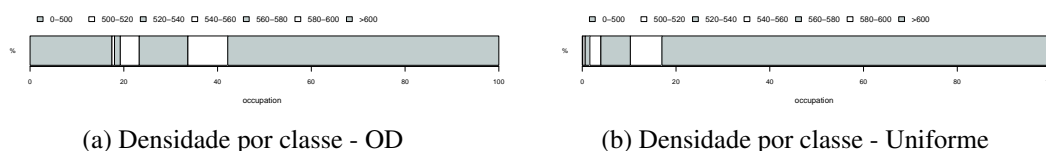
rápida, porque o motorista não precisa se deslocar uma grande distância para chegar ao seu destino. O custo trafegado pelos agentes F , especialmente na classe 0–500 corrobora a afirmação anterior.

A.1.1.5 Similaridade de ação - grupo $\{FR, PR, PCR\}$

Demanda OD - Assim como ocorria com as classes sem replanejamento (F , P e PC), os resultados da percepção completa são melhores nas classes com menor tempo de viagem e tendem a piorar a medida que as viagens ficam mais longas. Esta situação fica ainda mais clara ao observarmos que os agentes PR possuem um desempenho muito ruim na classe 0 – 500 em comparação com os agentes FR e PCR .

Demanda Uniforme - Em geral, há um grande equilíbrio entre os TMV 's dos agentes PR e PCR , ficando evidente a desvantagem da percepção completa e replanejamento dos agentes FR .

Conclusão - demanda não uniforme, viagens curtas, **quanto mais informação o agente possuir sobre o estado da rede melhor** será o seu desempenho. Em demanda uniforme, devido a distribuição na rede ser maior, a percepção completa e o replanejamento tendem a levar os agentes para o mesmo lugar, aumentando seus tempos de viagem.



(a) Densidade por classe - OD

(b) Densidade por classe - Uniforme

Figura A.3: Densidade por classe - 4200 viagens OD e uniforme.

A.1.2 Análise detalhada de oferta, demanda e agentes para 6.000 viagens

Nesta seção, serão conduzidas as análises no nível de abrangência D_m para topologia Grade, para as distribuições de demanda uniforme e OD com 6.000 viagens. Serão comparados o desempenho dos tipos de agentes agrupados segundo os eixos de ação e percepção apresentados na Figura 6.2.

A.1.2.1 Similaridade de percepção - grupo $\{F, FR\}$

Demanda OD - As conclusões obtidas através da análise de 4.200 agentes continuam válidas. Os agentes do tipo FR somente apresentam um tempo de viagem menor que F na classe > 600 (Figura A.4a). A partir daí, e considerando a distribuição da classe ALL , pode-se dizer que o replanejamento neste caso não se mostrou vantajoso. Entretanto, há uma tendência de redução no tempo de viagem a medida que os tempos de viagem fiquem mais longos.

Demanda Uniforme - assim como ocorre na demanda OD, os agentes FR somente apresentam um tempo de viagem menor que F na classe > 600 (Figura A.4b). Entretanto, a distribuição na classe ALL demonstra que há equilíbrio entre os agentes F e FR . Aqui também há um indicativo de que o tempo de viagem irá reduzir a medida que os tempos de viagem fiquem mais longos.

Conclusões - apesar dos agentes FR apresentarem um tempo de viagem maior, as Figuras A.4c A.4d mostram que trafegam distâncias menores que F . Considerando os custos mostrados nas Figuras A.5a e A.5b é possível concluir que os agentes FR encon-

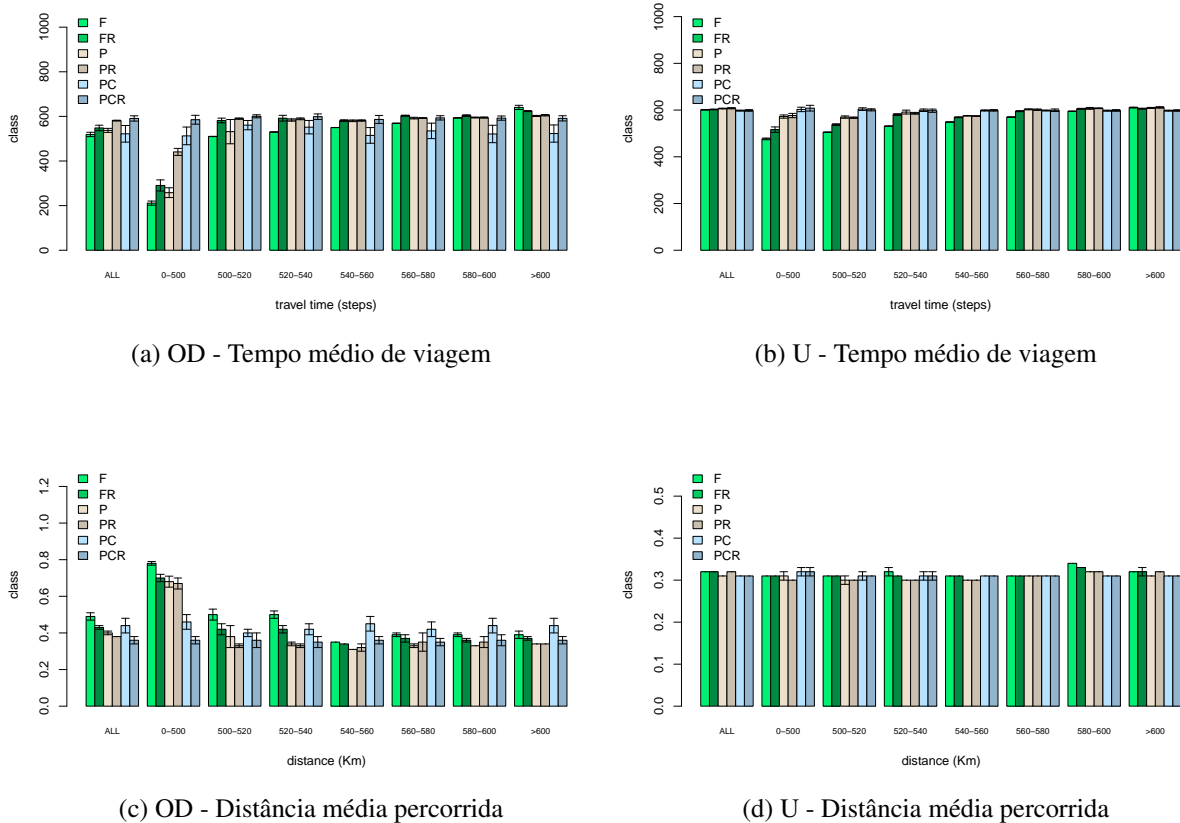


Figura A.4: TMV e DMP para 6000 viagens OD (esquerda) e uniforme (direita).

traram caminhos mais curtos, com um custo médio relativamente igual aos agentes F , mas a quantidade de agentes não foi o suficiente para implicar em uma vantagem significativa em replanejar. **Há uma tendência de que o replanejamento melhore o TMV à medida que as viagens fiquem mais longas.**

A.1.2.2 Similaridade de percepção - grupo $\{P, PR\}$

Demanda OD - o TMV dos agentes P se mantém menor que o TMV dos agentes PR , em todas as classes. Este comportamento fica evidente na classe ALL da Figura A.4a. Por outro lado, a distância média percorrida pelos agentes PR é menor que os agentes P . O comportamento mais visível é a diferença existente entre P e PR na classe $0 - 500$.

Demanda uniforme - os tempos de viagem são muito semelhantes entre os tipos P e PR .

Conclusões - considerando a semelhança dos custos entre os agentes P e PR mostrados nas Figuras A.5a e A.5b, e a grande diferença existente entre eles na classe $0 - 500$, é possível concluir que o replanejamento para evitar custos maiores é ineficaz devido a pequena distância dos trajetos. Também é ineficaz a tentativa de replanejamento de um modo geral. Replanejar em percursos pequenos, não é vantajoso.

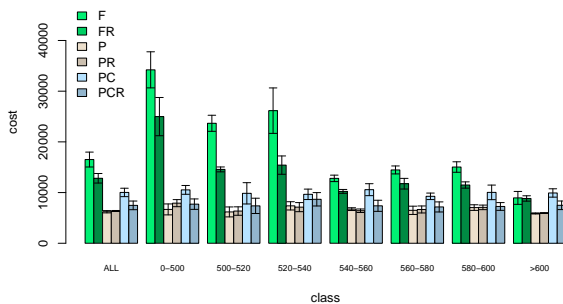
A.1.2.3 Similaridade de percepção - grupo $\{PC, PCR\}$

Demanda OD - após a inclusão da comunicação para expandir a capacidade de percepção dos agentes, os TMV's dos agentes PC na classe $0 - 500$ permanece menor que

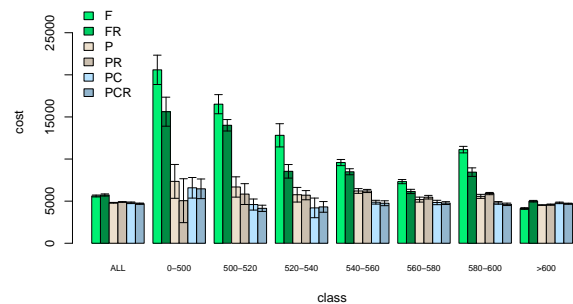
o TMV dos agentes *PCR*, assim como ocorria na comparação entre *P* e *PC*. Entretanto, aqui é possível perceber que os agentes *PC* mantém TMV menor que os agentes *PCR* em todas as classes.

Demanda Uniforme - assim como ocorrida nos tipos *P* e *PR*, os tempos de viagem são muito semelhantes entre os tipos *PC* e *PCR*.

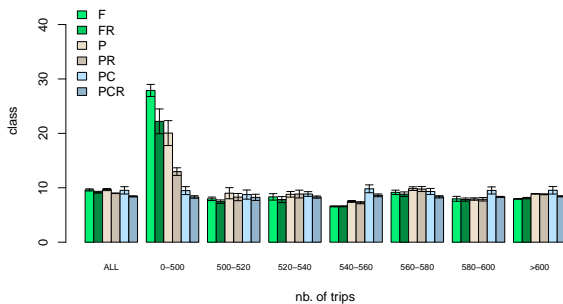
Conclusões - na comparação entre *P* e *PR* para 4200 agentes, havia uma vantagem maior em replanear do que a percebida com 6000 agentes. Aqui percebemos que os agentes *F* possuem um resultado geral melhor que *FR* na demanda OD e praticamente igual na demanda uniforme. **Com o aumento no número de motoristas na rede, percebe-se uma tendência de que *F* e *FR* se equilibrem.**



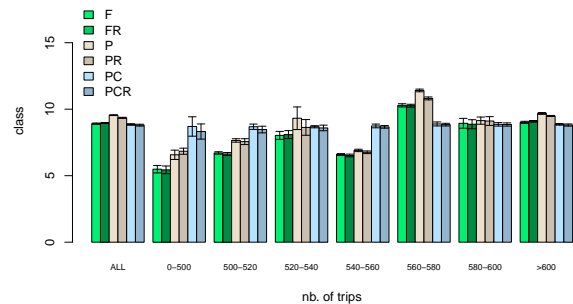
(a) OD - Custo médio percorrido



(b) U - Custo médio percorrido



(c) OD - Média de viagens concluídas



(d) U - Média de viagens concluídas

Figura A.5: CMP e MVC para 6000 viagens OD (esquerda) e uniforme (direita).

A.1.2.4 Similaridade de ação - grupo $\{F, P, PC\}$

Demanda OD - conforme demonstra a classe *ALL* (Figura A.4a), os agentes *PC* possuem um *TMV* um pouco inferior aos demais. Em viagens curtas, como se pode verificar na classe 0 – 500, a percepção global obtém um *TMV* inferior aos demais. Também é possível verificar uma tendência de que a percepção global piore o seu resultado a medida que as viagens demorem mais para acabar, especialmente pelo que podemos perceber pelo *TMV* da classe 600.

Demanda Uniforme - Os *TMV* das classes 0 – 500 até 580 – 600 evidenciam um resultado melhor para os agentes *F*. Entretanto, na classe > 600 que possui a maior concentração de veículos como mostra a Figura A.6a, o desempenho de *F* é o pior dentre

todos os tipos. Em geral, os agentes *PC* obtém o melhor *TMV*, como se pode perceber na classe *ALL*. Este resultado foi impulsionado pelo desempenho superior obtido na classe 600.

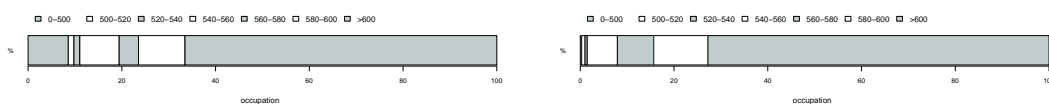
Conclusão - a percepção parcial estendida pela comunicação V2V proporciona resultados melhores a medida que as viagens ficam mais longas. Assim como ocorria com a demanda 4200, também encontramos um indicativo de que quanto mais tempo os motoristas trafegam, maior a precisão sobre o estado da rede. Entretanto os agentes *PC* possuem conhecimento sobre o estado da rede inferior aos agentes *F*, o que é o suficiente para evitar lugares semelhantes. **A percepção completa é vantajosa apenas em viagens curtas**, pois devido a regularidade da rede grade, em viagens curtas a menor rota tende a ser a mais rápida, porque o motorista não precisa se deslocar uma grande distância para chegar ao seu destino. O custo trafegado pelos agentes *F*, especialmente na classe 0 – 500 corrobora a afirmação anterior.

A.1.2.5 Similaridade de ação - grupo {*FR*, *PR*, *PCR*}

Demanda OD - Assim como ocorria com os tipos sem replanejamento (*F*, *P* e *PR*), os resultados da percepção completa são melhores nas classes com menor tempo de viagem e tendem a piorar a medida que as viagens ficam mais longas. Esta situação fica ainda mais clara ao observarmos que os agentes *PR* possuem um desempenho muito ruim na classe 0 – 500 em comparação com os agentes *FR* e *PCR*.

Demanda Uniforme - os agentes *FR* possuem um *TMV* menor que os agentes *PR* e *PCR* da classe 0 – 500 até 580 – 600. A partir daí, quando a concentração de agentes aumenta assim como o tempo de viagem, *FR* se torna menos vantajoso que *PR* e *PCR*. Considerando a classe *ALL*, há um grande equilíbrio entre os *TMV*'s dos agentes *FR*, *PR* e *PCR*.

Conclusão - demanda não uniforme, viagens curtas, **quanto mais informação o agente possuir sobre o estado da rede melhor será o seu desempenho.** Em demanda uniforme, devido a distribuição na rede ser maior, a percepção completa e o replanejamento tendem a levar os agentes para o mesmo lugar, aumentando seus tempos de viagem. A percepção completa tende a piorar o *TMV* a medida que as viagens ficam mais longas, e a percepção local com comunicação tende a melhorar nesta situação.



(a) Densidade por classe - OD

(b) Densidade por classe - Uniforme

Figura A.6: Densidade por classe - 6000 viagens OD e uniforme.

A.1.3 Análise detalhada de oferta, demanda e agentes para 8.000 viagens

Nesta seção, serão conduzidas as análises no nível de abrangência D_m para topologia Grade, para as distribuições de demanda uniforme e OD com 8.000 viagens. Serão comparados o desempenho dos tipos de agentes agrupados segundo os eixos de ação e percepção apresentados na Figura 6.2.

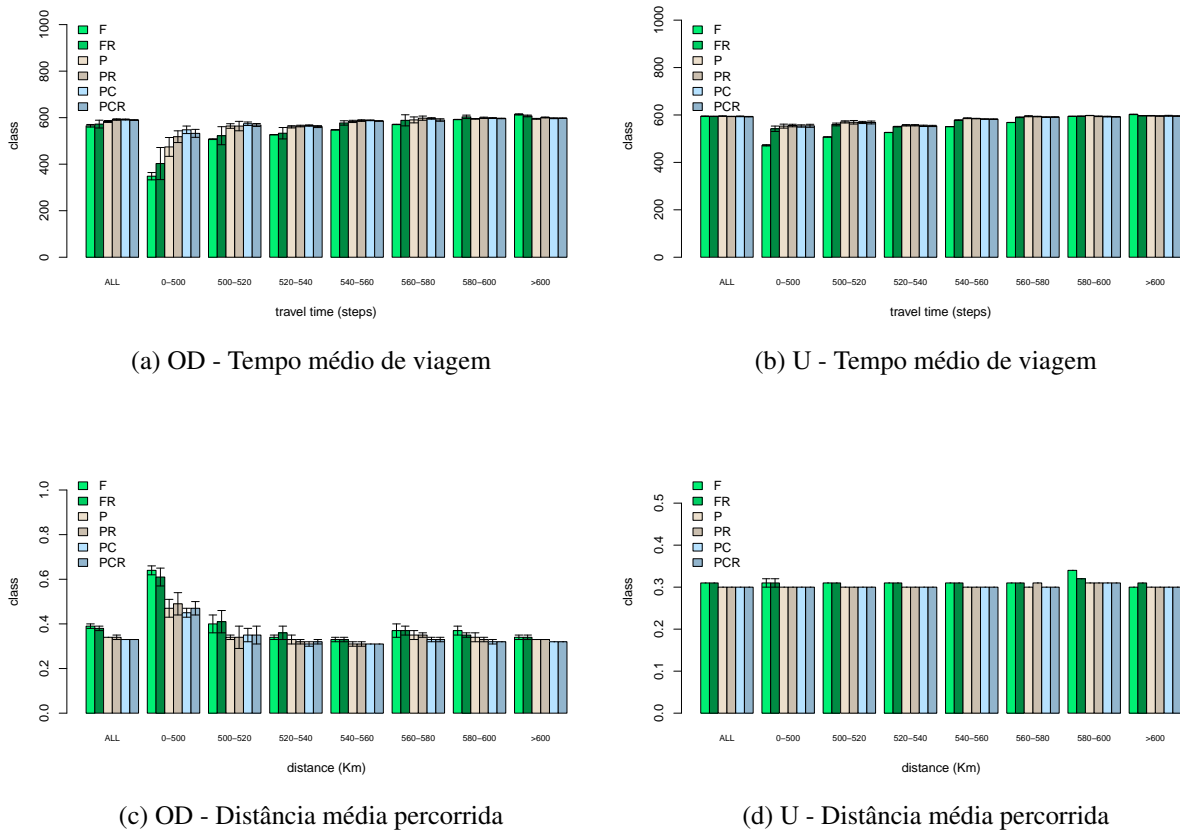


Figura A.7: TMV e DMP para 8000 viagens OD (esquerda) e uniforme (direita).

A.1.3.1 Similaridade de percepção - grupo $\{F, FR\}$

Demanda OD - Assim como ocorrido nas demandas 4200 e 6000, os agentes do tipo FR somente apresentam um tempo de viagem menor que F na classe > 600 (Figura A.7a). Entretanto, considerando todas as classes, em especial a classe ALL , nota-se um equilíbrio muito grande entre as classes. Através dos resultados apresentados na Figura A.8a é visível que o custo percorrido pelos agentes FR **na maioria das classes é inferior ao dos agentes F , o que evidencia a tentativa destes agentes se adaptarem ao estado da rede**. Entretanto, na classe > 600 os agentes F passam a ter um custo menor que FR .

Demanda Uniforme - assim como ocorre na demanda OD, os agentes FR somente apresentam um tempo de viagem menor que F na classe > 600 (Figura A.7b). Entretanto, o equilíbrio entre os agentes F e FR nas classes é ainda maior. Assim como ocorre com a demanda OD, a Figura A.8b demonstra que os agentes FR procuram se adaptar ao estado da rede.

Conclusões - Considerando o grande número de agentes, é possível concluir que o replanejamento, apesar de acarretar em alguma mudança conforme os custos trafegados demonstram, não é capaz de melhorar o tempo de viagem pois a RTV está excessivamente congestionada.

A.1.3.2 Similaridade de percepção - grupo $\{P, PR\}$

Demanda OD - há uma semelhança muito grande entre os TMV's dos agentes P e PR , semelhança esta evidente tanto na distância percorrida (Figura A.7c) quanto no número

de viagens realizadas (Figura A.8c).

Demanda uniforme - os tempos de viagem são muito semelhantes entre os tipos *P* e *PR*, assim como a distância percorrida (Figura A.7d) e o número de viagens realizadas (Figura A.8c).

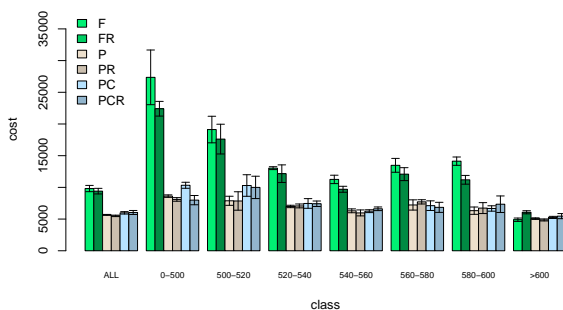
Conclusões - O grande número de agentes para o tamanho da rede, não permite perceber uma diferença significativa entre os agentes, em ambas demandas. **O replanejamento não se mostrou eficaz em uma rede excessivamente congestionada.**

A.1.3.3 Similaridade de percepção - grupo {PC, PCR}}

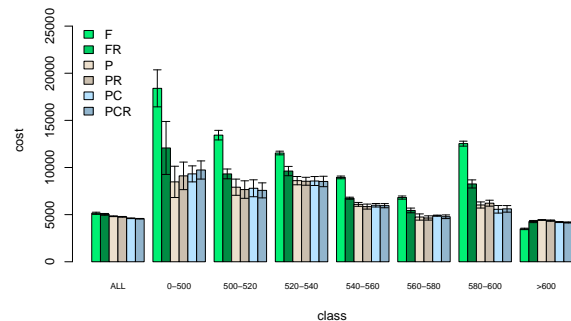
Demanda OD - há uma semelhança muito grande entre os TMV's dos agentes *PC* e *PCR*, semelhança esta evidente tanto na distância percorrida (Figura A.7c), no número de viagens realizadas (Figura A.8c) quanto no custo percorrido (Figura A.8a).

Demanda Uniforme - há uma semelhança muito grande entre os TMV's dos agentes *PC* e *PCR*, semelhança esta evidente tanto na distância percorrida (Figura A.7d), no número de viagens realizadas (Figura A.8d) quanto no custo percorrido (Figura A.8b).

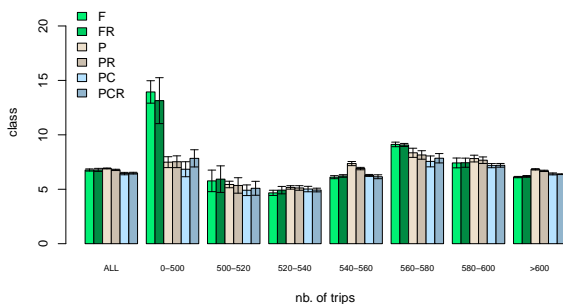
Conclusões - O grande número de agentes para o tamanho da rede, não permite perceber uma diferença significativa entre os agentes, em ambas demandas. **O replanejamento não se mostrou eficaz em uma rede excessivamente congestionada.**



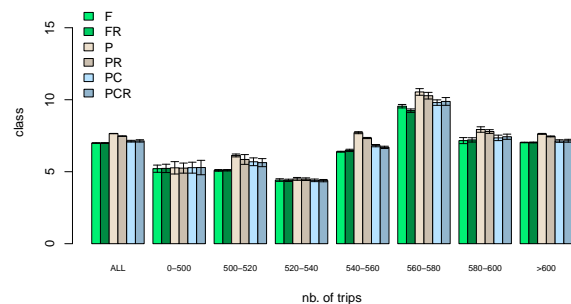
(a) OD - Custo médio percorrido



(b) U - Custo médio percorrido



(c) OD - Média de viagens concluídas



(d) U - Média de viagens concluídas

Figura A.8: CMP e MVC para 8000 viagens OD (esquerda) e uniforme (direita).

A.1.3.4 Similaridade de ação - grupo {F, P, PC}

Demanda OD - conforme demonstra a classe *ALL* (Figura A.7a), os *TMV* são praticamente idênticos. Em viagens curtas, como se pode verificar na classe 0 – 500, a percepção global obtém um *TMV* inferior aos demais. Mas nas demais classes, nota-se uma tendência dos *TMV*'s se equivalerem.

Demanda Uniforme - assim como a demanda OD, a classe *ALL* (Figura A.7a), mostra que os *TMV* são praticamente idênticos. Mais uma vez, em viagens curtas, como se pode verificar na classe 0 – 500, a percepção global obtém um *TMV* inferior aos demais. Mas nas demais classes, nota-se uma tendência dos *TMV*'s se equivalerem.

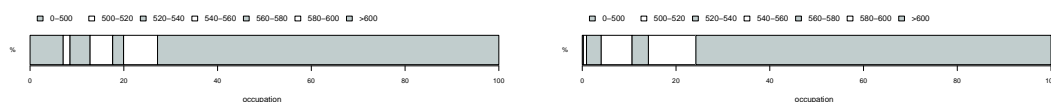
Conclusão - O grande número de agentes para o tamanho da rede, não permite perceber uma diferença significativa entre os agentes, em ambas demandas. **O replanejamento não se mostrou eficaz em uma rede excessivamente congestionada, entretanto há uma vantagem para a percepção global em viagens curtas.**

A.1.3.5 Similaridade de ação - grupo {FR, PR, PCR}

Demanda OD - conforme demonstra a classe *ALL* (Figura A.7a), os *TMV* são praticamente idênticos. Em viagens curtas, como se pode verificar na classe 0 – 500, a percepção global obtém um *TMV* inferior aos demais. Mas nas demais classes, nota-se uma tendência dos *TMV*'s se equivalerem.

Demanda Uniforme - assim como a demanda OD, a classe *ALL* (Figura A.7a), mostra que os *TMV* são praticamente idênticos. Mais uma vez, em viagens curtas, como se pode verificar na classe 0 – 500, a percepção global obtém um *TMV* inferior aos demais. Mas nas demais classes, nota-se uma tendência dos *TMV*'s se equivalerem.

Conclusão - O grande número de agentes para o tamanho da rede, não permite perceber uma diferença significativa entre os agentes, em ambas demandas. **O replanejamento não se mostrou eficaz em uma rede excessivamente congestionada, entretanto há uma vantagem para a percepção global em viagens curtas.**



(a) Densidade por classe - OD

(b) Densidade por classe - Uniforme

Figura A.9: Densidade por classe - 8000 viagens OD e uniforme.

REFERÊNCIAS

ARTHUR, B. **Inductive Reasoning, Bounded Rationality and the Bar Problem**. [S.l.]: Santa Fe Institute, 1994. (94-03-014).

BAZZAN, A. L. C.; AMARANTE, M. de B. do; AZZI, G. G.; BENAVIDES, A. J.; BURIOL, L. S.; MOURA, L.; RITT, M. P.; SOMMER, T. Extending traffic simulation based on cellular automata: from particles to autonomous agents. In: AGENT-BASED SIMULATION (ABS / ECMS 2011), Krakow. **Proceedings...** ECMS, 2011. p.91-97.

BAZZAN, A. L. C.; AMARANTE, M. de B. do; SOMMER, T.; BENAVIDES, A. J. ITSUMO: an agent-based simulator for ITS applications. In: WORKSHOP ON ARTIFICIAL TRANSPORTATION SYSTEMS AND SIMULATION, 4. **Proceedings...** IEEE, 2010.

BAZZAN, A. L. C.; KLÜGL, F. Sistemas Inteligentes de Transporte e Tráfego: uma abordagem de tecnologia da informação. In: KOWALTOWSKI, T.; BREITMAN, K. K. (Ed.). **Anais das Jornadas de Atualização em Informática**. [S.l.]: SBC, 2007.

BAZZAN, A. L. C.; KLÜGL, F. Re-Routing Agents in an Abstract Traffic Scenario. In: ADVANCES IN ARTIFICIAL INTELLIGENCE, Berlin. **Anais...** Springer-Verlag, 2008. n.5249, p.63-72. (Lecture Notes in Artificial Intelligence).

BAZZAN, A. L. C.; OLIVEIRA, D. de; KLÜGL, F.; NAGEL, K. Adapt or Not Adapt – Consequences of Adapting Driver and Traffic Light Agents. In: ADAPTIVE LEARNING AGENTS AND MULTI-AGENT SYSTEMS SYMPOSIUM (ALAMAS), 7. **Proceedings...** [S.l.: s.n.], 2007. p.1-8.

CHALLET, D.; ZHANG, Y. C. Emergence of Cooperation and Organization in an Evolutionary Game. **Physica A**, [S.l.], v.246, p.407-418, 1997.

CHEN, B.; CHENG, H. H. A Review of the Applications of Agent Technology in Traffic and Transportation Systems. **IEEE Transactions in Intelligent Transportation Systems**, [S.l.], v.11, n.2, p.485-497, 2010.

EPSTEIN, J. M. **Generative Social Science: studies in agent-based computational modeling (princeton studies in complexity)**. [S.l.]: Princeton University Press, 2007.

GALIB, S. M.; MOSER, I. Road traffic optimisation using an evolutionary game. In: GENETIC AND EVOLUTIONARY COMPUTATION, 13., New York, NY, USA. **Proceedings...** ACM, 2011. p.519-526. (GECCO '11).

KLÜGL, F.; BAZZAN, A. L. C. Simulated Route Decision Behaviour: simple heuristics and adaptation. In: SELTEN, R.; SCHRECKENBERG, M. (Ed.). **Human Behaviour and Traffic Networks**. [S.l.]: Springer, 2004. p.285–304.

KLÜGL, F.; FEHLER, M.; HERRLER, R. About the Role of the Environment in Multi-agent Simulations. In: WEYNS, D.; VAN DYKE PARUNAK, H.; MICHEL, F. (Ed.). **Environments for Multi-Agent Systems**. [S.l.]: Springer Berlin / Heidelberg, 2005. p.127–149. (Lecture Notes in Computer Science, v.3374).

KOUTSOUPIAS, E.; PAPADIMITRIOU, C. Worst-case equilibria. In: THEORETICAL ASPECTS OF COMPUTER SCIENCE, 16., Berlin, Heidelberg. **Proceedings...** Springer-Verlag, 1999. p.404–413. (STACS'99).

LIKHACHEV, M.; FERGUSON, D.; GORDON, G.; STENTZ, A.; THRUN, S. Anytime search in dynamic graphs. **Artif. Intell.**, Essex, UK, v.172, n.14, p.1613–1643, 2008.

LIN, R.; KRAUS, S.; SHAVITT, Y. On the benefits of cheating by self-interested agents in vehicular networks. In: INTERNATIONAL JOINT CONFERENCE ON AUTONOMOUS AGENTS AND MULTIAGENT SYSTEMS (AAMAS 2007), 6., New York, NY, USA. **Proceedings...** ACM, 2007. p.327–334.

MACAL, C. M.; NORTH, M. J. Tutorial on agent-based modeling and simulation. In: WINTER SIMULATION, 37. **Proceedings...** Winter Simulation Conference, 2005. p.2–15. (WSC '05).

NAGEL, K.; SCHRECKENBERG, M. A Cellular Automaton Model for Freeway Traffic. **Journal de Physique I**, [S.l.], v.2, p.2221, 1992.

OLIVEIRA, D. d.; BAZZAN, A. L. C. Swarm Intelligence Applied to Traffic Lights Group Formation. In: VI ENCONTRO NACIONAL DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL (ENIA). **Anais...** SBC, 2007. p.1003–1112.

OLIVEIRA, D. d.; BAZZAN, A. L. C.; SILVA, B. C. d.; BASSO, E. W.; NUNES, L.; ROSSETTI, R. J. F.; OLIVEIRA, E. C.; SILVA, R.; LAMB, L. C. Reinforcement learning based control of traffic lights in non-stationary environments: a case study in a microscopic simulator. In: EUROPEAN WORKSHOP ON MULTI-AGENT SYSTEMS, (EUMAS06), 4. **Proceedings...** [S.l.: s.n.], 2006. p.31–42.

PAPADIMITRIOU, C. H. Algorithms, Games, and the Internet. In: IN STOC. **Anais...** ACM Press, 2001. p.749–753.

ROESS, R. P.; PRASSAS, E. S.; MCSHANE, W. R. **Traffic Engineering**. 3.ed. [S.l.]: Prentice Hall, 2004. 816p.

ROSENTHAL, R. W. A class of games possessing pure-strategy Nash equilibria. **International Journal of Game Theory**, [S.l.], v.2, p.65–67, 1973.

ROUGHGARDEN, T.; TARDOS, É. How bad is selfish routing? **J. ACM**, [S.l.], v.49, n.2, p.236–259, 2002.

SHOHAM, Y.; LEYTON-BROWN, K. **Multiagent Systems: algorithmic, game-theoretic, and logical foundations**. [S.l.]: Cambridge University Press, 2009. 483p.

SILVA, B. C. d.; JUNGES, R.; OLIVEIRA, D.; BAZZAN, A. L. C. ITSUMO: an intelligent transportation system for urban mobility. In: INTERNATIONAL JOINT CONFERENCE ON AUTONOMOUS AGENTS AND MULTIAGENT SYSTEMS, AAMAS, 5. **Proceedings...** ACM Press, 2006. p.1471–1472.

TUMER, K.; WELCH, Z. T.; AGOGINO, A. Aligning social welfare and agent preferences to alleviate traffic congestion. In: INT. CONFERENCE ON AUTONOMOUS AGENTS AND MULTIAGENT SYSTEMS, 7., Estoril. **Proceedings...** IFAAMAS, 2008. p.655–662.

TUMER, K.; WOLPERT, D. A Survey of Collectives. In: TUMER, K.; WOLPERT, D. (Ed.). **Collectives and the Design of Complex Systems**. [S.l.]: Springer, 2004. p.1–42.

UHRMACHER, A.; WEYNS, D. **Multi-Agent Systems: simulation and applications**. [S.l.]: CRC Press/Taylor & Francis, 2009. (Computational analysis, synthesis, and design of dynamic models series).

WASKOW, S. J.; BAZZAN, A. L. C. Improving Space Representation in Multiagent Learning via Tile Coding. In: ADVANCES IN ARTIFICIAL INTELLIGENCE – SBIA 2010. **Anais...** Springer, 2010. n.6404, p.153–162. (Lecture Notes in Artificial Intelligence).

WOOLDRIDGE, M. J. **An Introduction to Multiagent Systems**. Chichester: John Wiley & Sons, 2002.

YAMASHITA, T.; IZUMI, K.; KURUMATANI, K. Analysis of the Effect of Route Information Sharing on Reduction of Traffic Congestion. In: KLÜGL, F.; BAZZAN, A. L. C.; OSSOWSKI, S. (Ed.). **Application of Agent Technology in Traffic and Transportation**. [S.l.]: Birkhäuser, 2004. p.99–112.

ZHENG, C.; CHEN, Y. Price of Anarchy in Transportation Networks with Heterogeneous Agents. In: FOURTH INTERNATIONAL JOINT CONFERENCE ON COMPUTATIONAL SCIENCES AND OPTIMIZATION, 2011., Washington, DC, USA. **Proceedings...** IEEE Computer Society, 2011. p.56–60. (CSO '11).