

THALES TEIXEIRA DE ALMEIDA

**PROJETO E ANÁLISE DE UM SISTEMA  
DESCENTRALIZADO E LOCAL PARA  
MONITORAMENTO DE TRÂNSITO  
BASEADO NO COMPARTILHAMENTO DE  
DADOS COLABORATIVOS**

Dissertação apresentada a Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

VIÇOSA  
MINAS GERAIS - BRASIL  
2016

**Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade  
Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa**

T

A447p  
2016

Almeida, Thales Teixeira de, 1988-

Projeto e análise de um sistema descentralizado e local para monitoramento de trânsito baseado no compartilhamento de dados colaborativos / Thales Teixeira de Almeida. – Viçosa, MG, 2016.

xvii, 85f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Inclui anexo.

Inclui apêndice.

Orientador: José Augusto Miranda Nacif.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f.76-83.

1. Engenharia de trânsito - Modelos matemáticos.
  2. Trânsito - Fluxo - Modelos matemáticos.
  3. Tráfego urbano.
  4. Sistema de Posicionamento Global.
  5. Algoritmos.
- I. Universidade Federal de Viçosa. Campus UFV - Florestal.  
Programa de Pós-graduação em Ciência da Computação.  
II. Título.

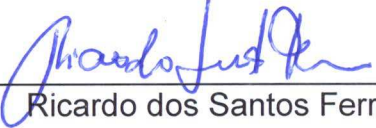
CDD 22. ed. 388.4131

THALES TEIXEIRA DE ALMEIDA

**PROJETO E ANÁLISE DE UM SISTEMA DESCENTRALIZADO E LOCAL PARA MONITORAMENTO DE TRÂNSITO BASEADO NO COMPARTILHAMENTO DE DADOS COLABORATIVOS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

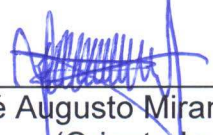
APROVADA: 27 de abril de 2016.

  
Ricardo dos Santos Ferreira

  
Luís Henrique M. Kosmalski Costa

  
José Geraldo Ribeiro Júnior  
(Coorientador)

  
Fabrício Aguiar Silva  
(Coorientador)

  
José Augusto Miranda Nacif  
(Orientador)

*Dedico esta conquista a Deus. Aos meus pais, Antônio Washington e Wanda Elisabeth. À minha irmã, Thaís. Aos meus sobrinhos, João Victor e João Pedro. E, em especial, à minha futura esposa, Kerollayne.*

*“Não existe ressurreição sem cruz.”*  
(Autor Desconhecido)

# AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, por ter me dado forças para superar os momentos mais difíceis dessa caminhada e me manter de pé apesar das adversidades.

À minha noiva Kerollayne, por seu amor, apoio e motivação, e principalmente, por compreender minha ausência e afastamento.

Aos meus pais, Antônio Washington e Wanda Elisabeth, que direta ou indiretamente, incentivaram e contribuíram para que eu tivesse a oportunidade de estudar.

À minha irmã Thaís, por sua imensa generosidade, sacrifício, suporte e carinho.

Aos meus sobrinhos João Victor e João Pedro, que embora não tenham conhecimento disto, me iluminaram de maneira especial.

Ao meu orientador, Prof. José Augusto Miranda Nacif, por sua competência e benevolência ao aceitar me orientar apesar da distância.

Ao meu co-orientador, Prof. José Geraldo Ribeiro Júnior, por seus ensinamentos, amizade, e disponibilidade de estar sempre presente ao longo de minhas atividades.

Ao meu co-orientador, Prof. Fabrício Aguiar da Silva pela valiosa contribuição.

Aos professores do DPI, em especial aos professores Ricardo de Sousa Ferreira e Jugurta Lisboa Filho, este último por tornar possível a realização deste sonho.

Ao companheiro Racyus, por sua amizade, paciência, inigualável contribuição, e por ser um exemplo de inspiração ao longo desta jornada.

Aos colegas do DPI, em especial ao Thiago, Fábio, Matheus, Denis, Alyson e Chris, pelas experiências compartilhadas e por estarem sempre dispostos a ajudar.

Aos colegas do CEFET-MG, em especial ao Fabiano, Anderson e Alexandre. A este último um agradecimento especial, pelo apoio e grandioso auxílio.

A todos os funcionários do DPI, em especial ao Altino, sempre solícito e disposto a ajudar no que for necessário.

À FAPEMIG e ao CEFET-MG, pelo apoio financeiro e material, necessário para o desenvolvimento da pesquisa.

A todos que, de alguna forma, contribuían para esta conquista.

# Biografia

THALES TEIXEIRA DE ALMEIDA, filho de Wanda Elisabeth Teixeira de Almeida e Antônio Washington de Almeida, é brasileiro, nascido em 07 de julho de 1988 na cidade de Leopoldina, no estado de Minas Gerais.

No ano de 2009, obteve o título de Técnico em Informática Industrial e Automação pelo Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. Em 2010, obteve o título de Técnico em Informática pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sul de Minas Gerais. Neste mesmo ano ingressou no curso superior em Sistemas de Informação nas Faculdades Unificadas Doctum de Cataguases, tornando-se bacharel no ano de 2013.

Em 2014 ingressou no programa de pós-graduação *Stricto Sensu* em Ciência da Computação do Departamento de Informática, na Universidade Federal de Viçosa.

Atualmente é Técnico em Informática no Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais e Professor do Ensino Superior nas Faculdades Unificadas Doctum de Cataguases. Tem experiência na área de Redes de Computadores e Redes Veiculares, onde desenvolve pesquisas com ênfase em algoritmos para monitoramento descentralizado de trânsito baseado em redes veiculares.

# Sumário

|  |           |
|--|-----------|
| Lista de Figuras   | xii       |
| Lista de Tabelas   | xiii      |
| Resumo   | xiv       |
| Abstract   | xvi       |
| <b>1 Introdução</b>  | <b>1</b>  |
| 1.1 Objetivos . . . . .  | 4         |
| 1.2 Contribuições . . . . .  | 5         |
| 1.3 Metodologia . . . . .  | 6         |
| 1.4 Estrutura do Trabalho . . . . .                                    | 7         |
| <b>2 Referencial Teórico</b>   | <b>9</b>  |
| 2.1 Redes Veiculares . . . . .   | 9         |
| 2.1.1 Aplicações de Redes Veiculares . . . . .                         | 11        |
| 2.1.2 Padrões de Redes Veiculares . . . . .                            | 11        |
| 2.1.3 O Padrão IEEE 802.11p . . . . .                                  | 13        |
| 2.2 Simulações em Redes Veiculares . . . . .                           | 15        |
| 2.2.1 O Simulador de Eventos Discretos NS-3 . . . . .                  | 15        |
| 2.2.2 Simulação da Mobilidade dos Veículos: IDM e MOBIL . . . . .      | 16        |
| 2.3 Monitoramento de Trânsito . . . . .                                | 19        |
| 2.3.1 Categorias de Sistemas de Monitoramento . . . . .                | 19        |
| 2.3.2 Sistemas Descentralizados de Monitoramento de Trânsito . . . . . | 20        |
| <b>3 Arquitetura e Modo de Operação do Sistema</b>                     | <b>24</b> |
| 3.1 Tabela de Condição de Trecho (TCT) . . . . .                       | 26        |
| 3.2 Transmissão da TCT pela Unidade de Bordo . . . . .                 | 26        |

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| 3.3      | Recepção da TCT pela Unidade de Acostamento . . . . .              | 30        |
| 3.4      | Mecanismo para Definição do Valor do TTL . . . . .                 | 35        |
| 3.4.1    | Definição do Valor do TTL Máximo . . . . .                         | 37        |
| 3.4.2    | Cronômetro da Validade da Informação . . . . .                     | 38        |
| 3.4.3    | Cálculo da Variação da Velocidade no Trecho . . . . .              | 39        |
| 3.5      | Propagação de Quadros de Alerta de Obstáculos . . . . .            | 39        |
| 3.5.1    | Registro do Obstáculo e Geração do Quadro de Alerta . . . . .      | 40        |
| 3.5.2    | Recepção e Propagação do Quadro de Alerta . . . . .                | 40        |
| 3.5.3    | Propagação Periódica do Quadro de Alerta . . . . .                 | 42        |
| 3.5.4    | Propagação da Informação sobre a Remoção de um Obstáculo . . . . . | 43        |
| 3.5.5    | Detalhes do Modo de Operação do COO . . . . .                      | 43        |
| <b>4</b> | <b>Detalhes de Implementação do Sistema</b>                        | <b>45</b> |
| 4.1      | Simulação de um GPS de Alta Precisão . . . . .                     | 45        |
| 4.2      | Inserção de Obstáculos na Via . . . . .                            | 46        |
| 4.3      | Simulação das Unidades de Acostamento . . . . .                    | 47        |
| 4.4      | Cálculo Dinâmico da Distância Mínima de Segurança . . . . .        | 47        |
| 4.5      | Densidade das Unidades de Bordo . . . . .                          | 48        |
| 4.6      | Tempo de Consolidação do Sistema . . . . .                         | 48        |
| 4.7      | Mecanismo de Alerta de Obstáculos . . . . .                        | 49        |
| 4.8      | Parâmetros de Configuração do IEEE 802.11p . . . . .               | 50        |
| 4.8.1    | Modelo da Camadas Física e Subcamada MAC . . . . .                 | 51        |
| 4.8.2    | Comunicação Fora do Contexto de um BSS . . . . .                   | 51        |
| 4.8.3    | Definição da Potência de Transmissão . . . . .                     | 51        |
| 4.8.4    | Configuração da Camada de Enlace . . . . .                         | 52        |
| 4.8.5    | Sensibilidade do Receptor . . . . .                                | 52        |
| 4.8.6    | Frequência de Operação . . . . .                                   | 52        |
| 4.8.7    | Modelo de Perda de Propagação . . . . .                            | 52        |
| 4.8.8    | Aplicação para Transmissão Periódica de <i>Beacons</i> . . . . .   | 52        |
| <b>5</b> | <b>Considerações para os Cenários de Simulação</b>                 | <b>54</b> |
| 5.1      | Quantidade de Faixas . . . . .                                     | 54        |
| 5.2      | Composição da Frota . . . . .                                      | 54        |
| 5.3      | Velocidade Máxima dos Veículos . . . . .                           | 55        |
| 5.4      | Comprimento da Via . . . . .                                       | 55        |
| 5.5      | Quantidade de Unidades de Acostamento . . . . .                    | 56        |
| 5.6      | Quantidade de Obstáculos . . . . .                                 | 56        |

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| 5.7      | Definição da Densidade de Unidades de Bordo . . . . .              | 57        |
| 5.8      | Tempo de Simulação . . . . .                                       | 58        |
| 5.9      | Cenários de Simulação . . . . .                                    | 58        |
| <b>6</b> | <b>Resultados</b>  | <b>60</b> |
| 6.1      | Tempo de Consolidação do Sistema . . . . .                         | 60        |
| 6.2      | Total de Veículos na Via . . . . .                                 | 61        |
| 6.3      | Localização dos Veículos Baseada no RSSI . . . . .                 | 62        |
| 6.4      | Tempo Disponível para Comunicação . . . . .                        | 62        |
| 6.5      | Atraso de Rede e Tamanho de Cada Tipo de Quadro . . . . .          | 63        |
| 6.6      | Tempo para Disseminação de Alertas de Obstáculos . . . . .         | 65        |
| 6.7      | Carga na Rede . . . . .  | 66        |
| 6.8      | Estatísticas da Entrega de Quadros . . . . .                       | 67        |
| 6.9      | Impacto Causado por Obstáculos e Variações de Velocidade . . . . . | 69        |
| 6.10     | Taxa de Acerto das Condições de Trânsito no DOCS4V . . . . .       | 70        |
| <b>7</b> | <b>Conclusões e Trabalhos Futuros</b>                              | <b>74</b> |
| 7.1      | Conclusões . . . . .   | 74        |
| 7.2      | Trabalhos Futuros . . . . .  | 75        |
|          | <b>Referências Bibliográficas</b>                                  | <b>76</b> |
|          | <b>Apêndice A Publicações</b>                                      | <b>84</b> |

# Lista de Abreviaturas

|          |  |
|----------|--|
| ACK      | <i>Acknowledgement</i>   |
| BSS      | <i>Basic Service Set</i>   |
| BSSID    | <i>Basic Service Set Identification</i>                              |
| CCH      | <i>Control Channel</i>   |
| COO      | Controle de Ocorrência de Obstáculos                                 |
| DOCS4V   | <i>Decentralized and Offline Community-based System for Vehicles</i> |
| DSRC     | <i>Dedicated Short Range Communications</i>                          |
| DENATRAN | Departamento Nacional de Trânsito                                    |
| DGT      | <i>Distributed Geographic Table</i>                                  |
| EIRP     | <i>Effective Isotropic Radiated Power</i>                            |
| FCC      | <i>Federal Communications Comissions</i>                             |
| GloMoSim | <i>Global Mobile system Simulator</i>                                |
| GPS      | <i>Global Positioning System</i>                                     |
| IBSS     | <i>Independent Basic Service Set</i>                                 |
| IEEE     | <i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>             |
| IDM      | <i>Intelligent Driver Model</i>                                      |
| ITS      | <i>Intelligent Transportation Systems</i>                            |
| LM       | <i>Location Manager</i>  |
| MAC      | <i>Media Access Control</i>  |
| MOBIL    | <i>Minimizing Overall Braking Induced by Lane change</i>             |
| NS-2     | <i>Network Simulator version 2</i>                                   |
| NS-3     | <i>Network Simulator version 3</i>                                   |
| OBU      | <i>Onboard Unit</i>  |
| OMS      | Organização Mundial da Saúde   |

|        |   |
|--------|---|
| OFDM   | <i>Orthogonal Frequency-Division Multiplexing</i>   |
| P2P    | <i>Peer-To-Peer</i>                                 |
| QoS    | <i>Quality-Of-Service</i>                           |
| RAM    | <i>Random Access Memory</i>                         |
| RSSI   | <i>Received Signal Strength Indication</i>          |
| RSU    | <i>Roadside Unit</i>                                |
| SCH    | <i>Service Channels</i>                             |
| SINR   | <i>Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio</i>      |
| SUMO   | <i>Simulation of Urban MObility</i>                 |
| TCT    | <i>Tabela de Condição de Trecho</i>                 |
| TTL    | <i>Time-to-Live</i>                                 |
| V2I    | <i>Vehicle-to-Infrastructure</i>                    |
| V2V    | <i>Vehicle-to-Vehicle</i>                           |
| VANETs | <i>Vehicular Ad Hoc Networks</i>                    |
| WSMP   | <i>WAVE Short Messages</i>                          |
| WAVE   | <i>Wireless Access in the Vehicular Environment</i> |
| YANS   | <i>Yet Another Network Simulator</i>                |

# Lista de Figuras

|     |  |    |
|-----|--|----|
| 2.1 | Cenários com diferentes arquiteturas de redes veiculares (ALVES ET AL., 2009). . . . .   | 10 |
| 2.2 | Alocação de canais para aplicações DSRC. O espectro é estruturado em sete canais de 10 MHz (JIANG & DELGROSSI, 2008). . . . .                | 12 |
| 2.3 | Arquitetura WAVE (GRÄFLING ET AL., 2010). . . . .  | 12 |
| 2.4 | Componentes dos modelos IDM e MOBIL - Adaptado de (ARBABI & WEIGLE, 2010). . . . .   | 17 |
| 3.1 | Detalhes do modo de operação do DOCS4V em uma via monitorada. . .  | 25 |
| 3.2 | Demonstração da primeira interseção entre duas OBUs com uma RSU em comum e consequente geração da base de dados para cálculo do TTL. . . . . | 32 |
| 3.3 | Atualização da TCT local de uma RSU. . . . .   | 34 |
| 3.4 | Manutenção de informações defasadas nas RSUs devido à impossibilidade de substituição com base no TTL. . . . .                               | 38 |
| 3.5 | Representação das atividades de registro e geração do alerta. . . . .  | 41 |
| 3.6 | Representação das atividades de recepção e propagação do alerta. . . . .   | 42 |
| 4.1 | Estrutura de um quadro personalizado do padrão IEEE 802.11p utilizado pelo DOCS4V. . . . .   | 51 |
| 6.1 | Movimentação de uma OBU pelo trecho 1 baseada no RSSI de <i>beacons</i> recebidos. . . . .   | 63 |
| 6.2 | Atraso total de rede por quadro. . . . .   | 64 |
| 6.3 | Tamanho por quadro. . . . .  | 64 |
| 6.4 | Carga dos nós a cada segundo de simulação. . . . .   | 67 |
| 6.5 | Estatísticas de entrega para cada tipo de quadro. . . . .  | 68 |
| 6.6 | Taxa de acerto "global"do DOCS4V discriminado por trecho. . . . .  | 72 |
| 6.7 | Taxa de acerto "trecho atual"do DOCS4V discriminado por trecho. . . . .  | 72 |
| 6.8 | Taxa de acerto "veículos-fantasma"do DOCS4V discriminado por trecho. . . . .   | 73 |

# Lista de Tabelas

|     |  |    |
|-----|--|----|
| 1.1 | Características e contribuições do DOCS4V. . . . .   | 5  |
| 3.1 | Descrição das informações armazenadas em uma TCT. . . . .  | 27 |
| 3.2 | Política do mecanismo de definição do TTL. . . . .   | 36 |
| 4.1 | Diferentes tipos de quadros. . . . .   | 50 |
| 5.1 | Parâmetros dos experimentos. . . . .   | 59 |
| 5.2 | Cenários simulados. . . . .  | 59 |
| 6.1 | Tempo de consolidação do DOCS4V para cada cenário. . . . .   | 61 |
| 6.2 | Fluxo e volume de veículos na via. . . . .   | 61 |
| 6.3 | Tempo médio para disseminar alertas de inserção (I) e remoção (R) de obstáculos nas direções leste (L) e oeste (O), bem como o número médio de saltos (S) necessários. . . . . | 66 |
| 6.4 | Acurácia média das condições de trânsito pelo DOCS4V. . . . .  | 71 |

# Resumo

ALMEIDA, Thales Teixeira, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, Abril de 2016. **Projeto e Análise de um Sistema Descentralizado e Local para Monitoramento de Trânsito Baseado no Compartilhamento de Dados Colaborativos.** Orientador: José Augusto Miranda Nacif. Coorientadores: José Geraldo Ribeiro Júnior e Fabrício Aguiar Silva.

O constante aumento no número de acidentes e congestionamentos causa impactos negativos em diversas áreas, como economia, meio ambiente e saúde. Para minimizar os problemas de trânsito, é essencial que se conheça as condições da via. Como sistemas atuais para monitoramento automatizado de trânsito requerem alto custo de instalação e manutenção, especialmente por serem dependentes de uma estrutura que conecte os veículos a um elemento central (responsável por calcular e divulgar as condições da via), sistemas baseados em infraestruturas descentralizadas vêm ganhando força na comunidade científica. Todavia, sem o auxílio de dispositivos GPS, estes sistemas não são capazes de garantir que as informações mais recentes serão preservadas, devido à falta de sincronismo dos relógios internos de unidades de bordo e de acostamento. Este trabalho apresenta o DOCS4V (*Decentralized and Offline Community-based System for Vehicles*), um sistema descentralizado para monitoramento e divulgação das condições de trânsito baseado no compartilhamento de dados colaborativos, onde unidades de bordo e unidades de acostamento, que não precisam estar interligadas entre si, nem a um ponto central, trocam informações a fim de atualizar suas tabelas de condições sobre cada trecho da via. Alertas de obstáculos são propagados via *broadcast* como forma de disseminar as informações em tempo hábil aos veículos interessados. A falta de sincronismo entre os relógios é minimizada por meio de um mecanismo que atribui tempos de vida relativos para as informações geradas, a serem interpretados de acordo com o relógio local dos dispositivos. Cada dispositivo é responsável por decrementar a cada segundo o

valor do tempo de vida útil da informação baseado no horário local. Para validar o funcionamento do DOCS4V em ambientes reais, simulações usando o padrão IEEE 802.11p foram executadas por meio do simulador de eventos discretos NS-3 integrado ao modelo de mobilidade IDM e ao modelo de troca de pista MOBIL. Como cenário, usou-se como referência as características físicas e de trânsito da Marginal Tietê, localizada na cidade de São Paulo, cuja análise histórica sobre volumes aponta um de seus trechos como o mais carregado da América do Sul. A comparação dos resultados obtidos com os dados de um GPS simulado mostram que DOCS4V é acurado em estimar as condições de trânsito e eficiente em disseminar alertas de obstáculos, com baixo atraso de rede, pequeno volume de tráfego e altos índices de quadros entregues com sucesso.

# Abstract

ALMEIDA, Thales Teixeira, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa. April, 2016. **Design and Analysis of a Decentralized System and Local for Traffic Monitoring Based on Collaborative Data Sharing.** Adviser: José Augusto Miranda Nacif. Co-Advisers: José Geraldo Ribeiro Júnior and Fabrício Aguiar Silva.

The steady increase in the number of accidents and congestions negatively impacts various areas, such as economy, environment and health. To minimize traffic problems, it is essential to know the road conditions. As current systems for automated traffic monitoring require expressive installation and maintenance, being dependent on a structure that connects vehicles to a central element (responsible for calculating and broadcasting the road conditions), systems based on decentralized infrastructures are gaining traction in the scientific community. However, without the aid of GPS devices, these systems are unable to ensure the preservation of the latest information, due to the lack of synchronization of the internal clocks of onboard and roadside units. This paper presents DOCS4V (Decentralized and Offline Community-based System for Vehicles), a decentralized system for monitoring and reporting on traffic conditions based on the sharing of collaborative data. Onboard and roadside units, which do not to be interconnected nor connected to a central point, exchange information in order to update their condition tables for each road segment. Information about obstacle alerts are broadcast to interested vehicles in a timely manner. The lack of synchronization between clocks is minimized through a mechanism that assigns a lifetime relative to generated information, to be interpreted according to the local clock of devices. Each device is responsible for decrementing the value of the information lifetime every second, based on the local time. To validate the performance of DOCS4V in real environments, simulations using the IEEE 802.11p standard were performed in the NS-3 discrete events simulator integrated with the IDM mobility model and lane change model, MOBIL. The study was based on the

physical and traffic characteristics of Marginal Tietê, located in São Paulo, whose historical analysis about traffic volume indicates one of the stretches as being the most congested road in South America. The comparison between the obtained results and data from a simulated GPS shows that DOCS4V accurately estimates traffic conditions and efficiently disseminates obstacle alerts with low network delay, low traffic volume and a high rate of successfully delivered frames.

# Capítulo 1

## Introdução

Por consequência da rápida evolução tecnológica, veículos automotores cada vez mais têm incorporado dispositivos com o objetivo de melhorar a experiência no trânsito. Estes dispositivos possibilitam a detecção de sinais no ambiente e dão maior conforto e segurança ao condutor, porém são limitados à interação entre este último e o veículo. Sistemas que possibilitem que estas informações sejam disseminadas e tratadas de forma coletiva possibilitam aos condutores conhecer as condições do ambiente como um todo. A esta troca de informações realizadas entre veículos ou entre veículos e equipamentos fixos (geralmente localizados às margens de ruas ou de estradas), se dá o nome de redes veiculares, ou VANETs (*Vehicular Ad Hoc Networks*) (ALVES ET AL., 2009).

O aumento da segurança no trânsito é umas das principais motivações para a pesquisa em redes veiculares. De acordo com o estudo realizado pela OMS (Organização Mundial da Saúde) em 178 países, a cada ano cerca de 1,24 milhões de pessoas morrem e outras 50 milhões ficam feridas como resultado de acidentes de trânsito (WHO, 2015). Esta é a nona maior causa de mortes no mundo, com aproximadamente 3 mil vidas perdidas diariamente. Segundo o mesmo estudo, acidentes de trânsito são a principal causa de mortes entre jovens com idades entre 15 a 29 anos. No Brasil, conforme dados do Ministério da Saúde, somente em 2013 mais de 43 mil pessoas perderam a vida em decorrência de acidentes nas estradas (DATASUS, 2015), elevando o país ao quinto lugar entre os recordistas em mortes no trânsito, ficando atrás apenas de Índia, China, Estados Unidos e Rússia. Estimativas da OMS apontam ainda que 91% das mortes resultantes de acidentes em todo o mundo aconteçam em países em desenvolvimento, embora estes possuam menos de metade dos veículos em circulação no planeta. As previsões indicam que a situação se agravará ainda mais nesses países, por conta de fatores como o aumento da frota,

da falta de planejamento e do baixo investimento na segurança das vias públicas.

Desta maneira, questões relacionadas ao trânsito devem ser tratadas não apenas como temas da área dos transportes. Além de causar a morte de milhões de pessoas em todo o mundo, o crescimento acentuado no número de veículos também gera congestionamentos diários que dificultam a mobilidade urbana, reduzindo a produtividade. No Brasil, conforme dados do DENATRAN (Departamento Nacional de Trânsito), somente em 2015 a frota brasileira aumentou em quase 4 milhões de veículos (comparado ao volume registrado no ano anterior), totalizando mais de 90 milhões de veículos em circulação (DENATRAN, 2015), a grande maioria concentrada em regiões metropolitanas. Com tantos veículos, é natural que se aumente também o número de congestionamentos. São Paulo, metrópole mais rica e densamente povoada do país, possui atualmente mais de 7 milhões de veículos em circulação. Não por acaso, em maio de 2014 a cidade registrou recorde histórico de lentidão, alcançando 344 km de vias congestionadas (G1, 2014). Este, entretanto, não é um problema restrito somente ao Brasil. Um relatório de mobilidade urbana publicado em 2015 nos Estados Unidos relata um prejuízo de US\$160 bilhões por consequência de congestionamentos, resultando em 3,1 bilhões de galões de combustível desperdiçado e 6,9 bilhões de horas de perda de produtividade (SCHRANK ET AL., 2015).

Uma vez que aumentar a infraestrutura das vias no mesmo ritmo que aumenta o número de congestionamentos não é viável, o avanço de tecnologias de Sistemas Inteligentes de Transporte (*Intelligent Transportation Systems - ITS*) permite que cada vez mais estes dispositivos sejam empregados no monitoramento de trânsito. A informação gerada por tais dispositivos permite que ações preventivas (como identificar áreas congestionadas e disseminar alertas de obstáculos) sejam executadas. Muitas propostas para Sistemas Inteligentes de Transportes combinam o GPS (*Global Positioning System*) com 3G/4G (FENG ET AL., 2014) ou redes IEEE 802.11 (SANGUESA ET AL., 2013) para determinar a densidade e localização de veículos. Na maioria destes sistemas, esta informação é enviada para uma unidade central para tratamento e disseminação. O problema da tecnologia 3G/4G, além do custo para o usuário final, está na limitação de taxas máximas de uso impostas aos usuários para evitar congestionamentos na rede (BALASUBRAMANIAN ET AL., 2010). Além disso, o uso do GPS como referência espacial e temporal aumenta o consumo de bateria em dispositivos móveis.

Em (RIBEIRO JÚNIOR ET AL., 2014), é proposto o sistema CoTraMS, uma proposta de monitoramento de trânsito oportunístico e colaborativo que fornece informações sobre a localização de veículos na via e infere as condições de trânsito

colaborativamente. CoTraMS dispensa o uso do GPS para localização do veículo, o que reduz o consumo de bateria, especialmente em dispositivos como *smartphones*. O sistema é composto por unidades de bordo, ou OBU's (*Onboard Unit*), unidades de acostamento, ou RSUs (*Roadside Unit*) e uma central de controle, que pode ser um elemento externo, conectado via Internet, ou fazer parte da rede local. As OBU's são responsáveis por identificar o instante em que passaram por uma RSU e enviar estas informações para a central de controle, que, após comparar com as informações locais sobre as características de cada trecho, gera e disponibiliza as informações sobre as condições de trânsito periodicamente. CoTraMS mostrou-se preciso ao estimar a localização, direção e velocidade dos veículos. Contudo, propostas de monitoramento dependentes de um elemento central responsável por calcular e divulgar as condições da via exigem um alto custo de instalação e manutenção.

Por não exigir grandes investimentos em infraestrutura, sistemas descentralizados aparecem como uma boa opção para o monitoramento de trânsito. No entanto, grande parte dos sistemas propostos utilizam GPS para descartar informações consideradas obsoletas (TSAO & CHENG, 2011; GRAMAGLIA ET AL., 2014), implicando no aumento do consumo de bateria em dispositivos móveis. Outros dependem de conexão com a Internet para obter a localização dos veículos e divulgar as condições de trânsito (PICONE ET AL., 2012). Além disso, apesar da rapidez na disseminação de informações, sistemas baseados exclusivamente em redes *ad-hoc* (WEDEL ET AL., 2009; LEONTIADIS ET AL., 2011) dependem que a densidade de veículos seja suficiente para que as informações sejam distribuídas com êxito. Em (RIBEIRO JÚNIOR ET AL., 2013), os autores propõem um sistema descentralizado para monitoramento de trânsito que dispensa o uso do GPS como referência espacial e temporal. O envio das informações é feito exclusivamente via comunicação V2I (*Vehicle-to-Infrastructure*), utilizando os próprios veículos como enlaces de comunicação. Entretanto, a proposta não garante o privilégio de informações mais recentes, uma vez que nenhuma política para cálculo do tempo de vida da informação foi definida.

Com base em suas diretrizes e definições, neste trabalho nós propomos o aperfeiçoamento do sistema proposto em (RIBEIRO JÚNIOR ET AL., 2013), cujas melhorias realizadas e agregação de funcionalidades adicionais levou ao desenvolvimento do DOCS4V (*Decentralized and Offline Community-based System for Vehicles*), um sistema descentralizado que divulga as condições de trânsito por meio de comunicação V2I, bem como alertas sobre obstáculos via comunicação híbrida (V2I e V2V (*Vehicle-to-Vehicle*)). DOCS4V também não requer o uso de dispositivos GPS, o que possibilita uma maior economia no consumo de bateria, problema frequente em

aplicações para dispositivos móveis. Como não há a necessidade do uso de dispositivos GPS, cada OBU é responsável por calcular sua velocidade média no trecho. Como em (RIBEIRO JÚNIOR ET AL., 2013), no DOCS4V a conexão entre RSUs não é necessária. Assim, OBUs e RSUs trocam informação a fim de atualizar suas TCTs (Tabela de Condição de Trecho), que contêm informações sobre cada trecho da via. Para tratar a falta de sincronismo e garantir a recenticidade das informações, DOCS4V estabelece tempos de vida relativos para cada informação gerada, interpretados de acordo com o relógio local dos dispositivos. O tempo de vida, ou TTL (*Time-to-Live*), é dado em segundos e cada dispositivo é responsável por decrementá-lo, baseado no relógio local, até chegar a zero, quando a informação perde valor.

## 1.1 Objetivos

Como a falta de um elemento central gera um desafio com respeito à sincronização entre as informações, não é possível garantir o sincronismo entre os relógios das OBUs e RSUs. Desta maneira, este trabalho teve como objetivo inicial contornar esta deficiência no sistema proposto por (RIBEIRO JÚNIOR ET AL., 2013), aperfeiçoando-o a partir do desenvolvimento de um mecanismo que defina e controle o tempo de vida útil das informações baseado no próprio relógio local dos dispositivos, o que possibilita que as informações geradas mais recentemente pelos veículos sejam privilegiadas.

Contudo, com a evolução da pesquisa, novos mecanismos e funcionalidades (como a possibilidade de monitoramento não só das condições de trânsito, mas também de possíveis obstáculos presentes no perímetro monitorado) foram elaborados. Além disso, foram adicionados ao sistema de monitoramento recursos para comunicação V2V (*Vehicle-to-Vehicle*), possibilitando que informações críticas (como alertas de obstáculos) sejam disseminadas com maior rapidez aos demais veículos interessados. Desta maneira, o objetivo geral da pesquisa passa a ser considerado não só o aperfeiçoamento, mas o projeto e avaliação (por meio da simulação de cenários próximos aos encontrados no mundo real) de um novo sistema colaborativo para monitoramento e divulgação das condições de trânsito de forma descentralizada.

Pretende-se que, com a aplicação da pesquisa, aumentem-se as possibilidades de ações em tempo real, como identificação de problemas pontuais no trânsito, auxílio na segurança e apoio à tomada de decisões. Além disso, os resultados apresentados no Capítulo 6 encorajam o uso do sistema proposto, possibilitando que a

realização do monitoramento de trânsito seja feita de forma automatizada e eficiente.

## 1.2 Contribuições

A Tabela 1.1 apresenta uma comparação entre as principais características do sistema proposto em (RIBEIRO JÚNIOR ET AL., 2013) e o DOCS4V, destacando as contribuições desta pesquisa.

**Tabela 1.1.** Características e contribuições do DOCS4V.

| Recurso  | Sistema Proposto em<br>(Ribeiro Júnior et al.,<br>2013) | DOCS4V |
|--|---|--------|
| Comunicação V2I  | X   | X      |
| Comunicação V2V  | -   | X      |
| Divulgação das Condições de Trânsito                     | X   | X      |
| Alerta de Incidentes na Estrada                          | -   | X      |
| Mecanismo para Cálculo do TTL<br>( <i>Time-to-Live</i> ) | -   | X      |
| Avaliação em Cenários de Larga Escala                    | -   | X      |
| Avaliação Utilizando o Padrão IEEE<br>802.11p            | -   | X      |
| Avaliação e Análise dos Aspectos de<br>Rede              | -   | X      |

No DOCS4V, consideramos que a comunicação V2V (recurso utilizado para propagação dos incidentes ocorridos na estrada) melhora o monitoramento de trânsito (principalmente se comparado ao sistema proposto em (RIBEIRO JÚNIOR ET AL., 2013)), uma vez as informações acerca das condições da via (condições de trânsito, e principalmente, presença de possíveis obstáculos) podem ser disseminadas aos demais veículos mais rapidamente, atendendo ao requisito básico para aplicações de segurança em redes veiculares. Receber um alerta de incidente em tempo permite que um condutor execute ações preventivas, como o replanejamento da rota ou simplesmente a alteração da faixa de trânsito.

Já o mecanismo para cálculo do TTL permite que toda informação gerada possua um tempo de vida útil associado. Desta maneira, apesar de não existir um elemento centralizador que garanta o sincronismo entre os relógios dos dispositivos, com base no valor do TTL (decrementado a cada segundo com base no relógio local

dos dispositivos) é possível analisar as informações recebidas pelos nós e definir, com base na comparação entre o TTL da informação recebida com o TTL da informação armazenada na TCT local do receptor, qual informação é mais recente. Desta maneira, é possível assegurar que o monitoramento será realizado com base nas informações geradas mais recentemente.

Uma vantagem do DOCS4V em relação ao sistema proposto em (RIBEIRO JÚNIOR ET AL., 2013) é que a avaliação do DOCS4V se deu de maneira mais realista, utilizando cenários de larga escala. Em (RIBEIRO JÚNIOR ET AL., 2013), os experimentos foram realizados em cenários cujo limite de velocidade permitido era 40 km/h. Já no DOCS4V foram adotados os limites de 90 km/h para carros, e 70 km/h para caminhões. Tais parâmetros implicam maiores variações de velocidade, o que dificulta a asserção das condições de trânsito (maiores detalhes em 6.10), bem como diminuindo o tempo disponível para comunicação entre os elementos (maiores detalhes em 6.4).

Além disso, uma vez que no padrão IEEE 802.11p (padrão para comunicações em ambientes veiculares) desconsidera-se os tempos gastos durante as etapas de associação, desassociação, entre outros 2.1.3, é possível avaliar a escalabilidade de funcionamento do DOCS4V em ambientes reais de trânsito. Com base nesta análise, foi possível avaliar que o tempo disponível para comunicação se mostra satisfatório para a troca de informações no DOCS4V, devido a possibilidade de comunicação imediata entre os elementos.

## 1.3 Metodologia

Para alcançar o objetivo geral mencionado anteriormente, tornou-se necessária a realização das etapas descritas a seguir:

- Realizar um levantamento das referências bibliográficas existentes na literatura e analisar o estado da arte das principais propostas para monitoramento de trânsito;
- Estudar a ferramenta de simulação de eventos discretos NS-3 e os principais modelos de mobilidade e mudança de faixa para veículos presentes na literatura;
- Aperfeiçoar o modelo de mobilidade e modelo de troca de faixa escolhidos para realização dos experimentos em larga escala, possibilitando a avaliação

do sistema considerando características de trânsito próximas às encontradas no mundo real;

- Implementar e validar, por meio de experimentos simulados, a proposta descentralizada apresentada em (RIBEIRO JÚNIOR ET AL., 2013), utilizando cenários com condições próximas de um cenário real;
- Elaborar e implementar um mecanismo para definição do valor do tempo de vida útil das informações sobre as condições da via, de forma a minimizar os efeitos da falta de sincronismo, inerente a sistemas descentralizados;
- Realizar uma comparação dos resultados relacionados à asserção das condições de trânsito (obtidos pelo sistema de monitoramento) com um dispositivo GPS simulado, de forma a validar o funcionamento do mecanismo proposto no item anterior;
- Propor melhorias ao sistema de monitoramento de trânsito proposto em (RIBEIRO JÚNIOR ET AL., 2013), como a atribuição de novos mecanismos e funcionalidades de orientação aos condutores;
- Implementar e adaptar o modo de operação do sistema utilizando o padrão IEEE 802.11p como tecnologia de transmissão de dados entre os dispositivos;
- Analisar, por meio de experimentos simulados, o comportamento do sistema com relação às métricas de rede (atraso de rede, taxa de entrega de quadros, carga na rede, entre outras);
- Avaliar os resultados obtidos no item anterior e validar o funcionamento do sistema;
- Documentar todas as etapas de desenvolvimento desta pesquisa por meio da elaboração desta dissertação e submissão de artigos científicos.

## 1.4 Estrutura do Trabalho

O restante desta dissertação está organizada da seguinte forma: no Capítulo 2 são apresentados os conceitos fundamentais à compreensão do modo de operação do DOCS4V, bem como os principais trabalhos que serviram como base para seu desenvolvimento. Já no Capítulo 3, é apresentada a arquitetura do DOCS4V, no qual são detalhados o modo de operação do sistema de monitoramento de trânsito, inclusive detalhando seus algoritmos computacionais. O Capítulo 4 apresenta os detalhes

de implementação do sistema, necessários para compreensão dos cenários utilizados nos experimentos, bem como das métricas utilizadas para avaliação do desempenho em rede. O Capítulo 5 apresenta as considerações e parâmetros utilizados para elaboração dos cenários de simulação. No Capítulo 6, são analisados os resultados experimentais do DOCS4V no que se refere à acurácia das condições de trânsito inferidas, bem como os resultados relacionados à avaliação das métricas de rede utilizando o padrão IEEE 802.11p. Por fim, o Capítulo 7 apresenta as considerações finais e propõe os trabalhos futuros.

# Capítulo 2

## Referencial Teórico

Este capítulo apresenta alguns conceitos essenciais à compreensão do funcionamento e modo de operação do DOCS4V, bem como os principais trabalhos que serviram como base para seu desenvolvimento. Este capítulo também apresenta diversas categorias de propostas que se destinam ao monitoramento de trânsito, desde sistemas de monitoramento clássicos (como sensores embutidos na via e câmeras de vigilância), passando por abordagens mais atuais, que utilizam dados coletados por *smartphones* como forma de monitoramento (denominada *carros flutuantes* Gramaglia et al. (2014)). Também são exibidos alguns dos trabalhos relacionados encontrados na literatura, que abordam o monitoramento descentralizado de trânsito e assim influenciam o desenvolvimento desta pesquisa. As próximas seções detalham alguns conceitos básicos de redes veiculares, definindo sua aplicabilidade no mundo real, o modo como são classificadas e os padrões de comunicação utilizados (com destaque para o padrão de comunicação IEEE 802.11p).

### 2.1 Redes Veiculares

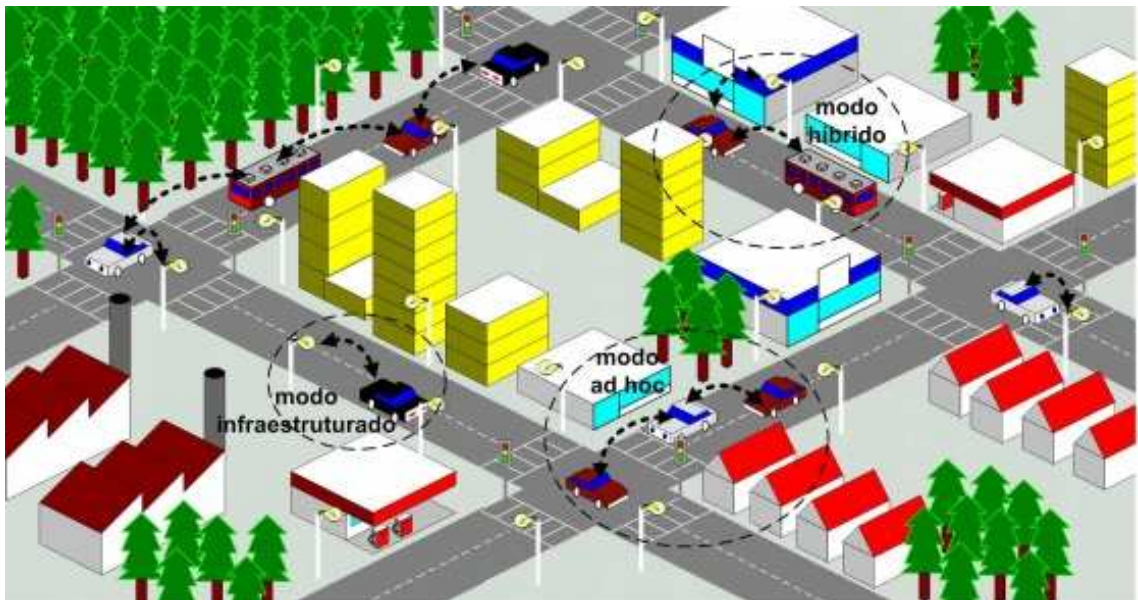
Redes veiculares são classificadas de acordo com sua arquitetura. A arquitetura define a forma como os nós se organizam e se comunicam (ALVES ET AL., 2009). Neste contexto, redes veiculares podem ser classificadas em três categorias diferentes:

- Redes *ad-hoc* puro: também conhecidas como redes V2V, se caracterizam pela comunicação entre os veículos sem qualquer tipo de suporte externo ou elemento central. Nesta arquitetura, cada veículo age como um roteador, encaminhando o tráfego através de saltos pela rede. Embora não exija infraes-

trutura, sua principal desvantagem está na dependência da densidade e padrão de mobilidade dos veículos para alcançar um nível aceitável de conectividade.

- Redes infraestruturadas: Emprega nós estáticos ao longo das vias para evitar o problema da falta de conectividade, pertinente às redes *ad-hoc*. Estes nós funcionam como pontos de acesso de redes padrão IEEE 802.11, centralizando todo o tráfego da rede e intermediando a comunicação entre os veículos, servindo também como referência em sistemas que envolvam localização. Redes infraestruturadas aumentam a conectividade, além de possibilitarem a comunicação com outras redes externas, como a Internet.
- Redes híbridas: A arquitetura híbrida é uma solução intermediária entre as arquiteturas *ad-hoc* e infraestruturadas, onde uma infraestrutura mínima é utilizada para aumentar a conectividade. Esta arquitetura permite ainda a possibilidade de veículos se comunicarem por múltiplos saltos. Esta é a arquitetura adotada no sistema desenvolvido nesta pesquisa.

A Figura 2.1 apresenta as diversas arquiteturas presentes em um cenário de redes veiculares.



**Figura 2.1.** Cenários com diferentes arquiteturas de redes veiculares (ALVES ET AL., 2009).

### 2.1.1 Aplicações de Redes Veiculares

As aplicações de redes veiculares podem ser categorizadas entre três grupos (ALVES ET AL., 2009):

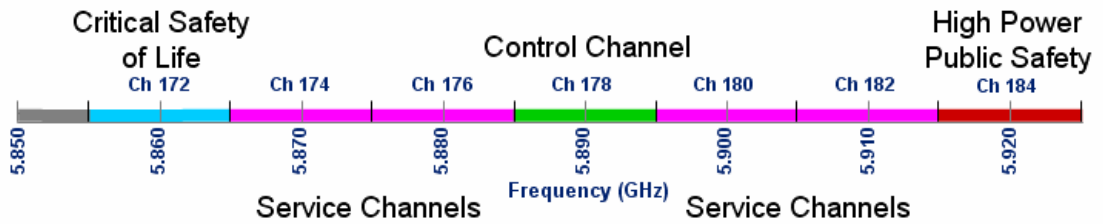
- Aplicações de segurança: projetadas com o objetivo de reduzir o número e a gravidade de acidentes através da troca de informações entre os veículos, contendo informações como localização, velocidade e direção na via.
- Aplicações de entretenimento: geralmente requerem a necessidade de acesso à Internet, sendo necessário adaptar aplicações como mensagem instantânea e distribuição de áudio e vídeo à realidade das redes veiculares.
- Aplicações de assistência ao condutor: auxiliam a condução do veículo a partir de informações disponibilizadas na via, como aviso de estacionamentos, auxílio a cruzamentos e controle de trânsito.

O desenvolvimento de aplicações de segurança e assistência ao condutor, categorias à qual pertence o DOCS4V, são o alvo desta pesquisa.

### 2.1.2 Padrões de Redes Veiculares

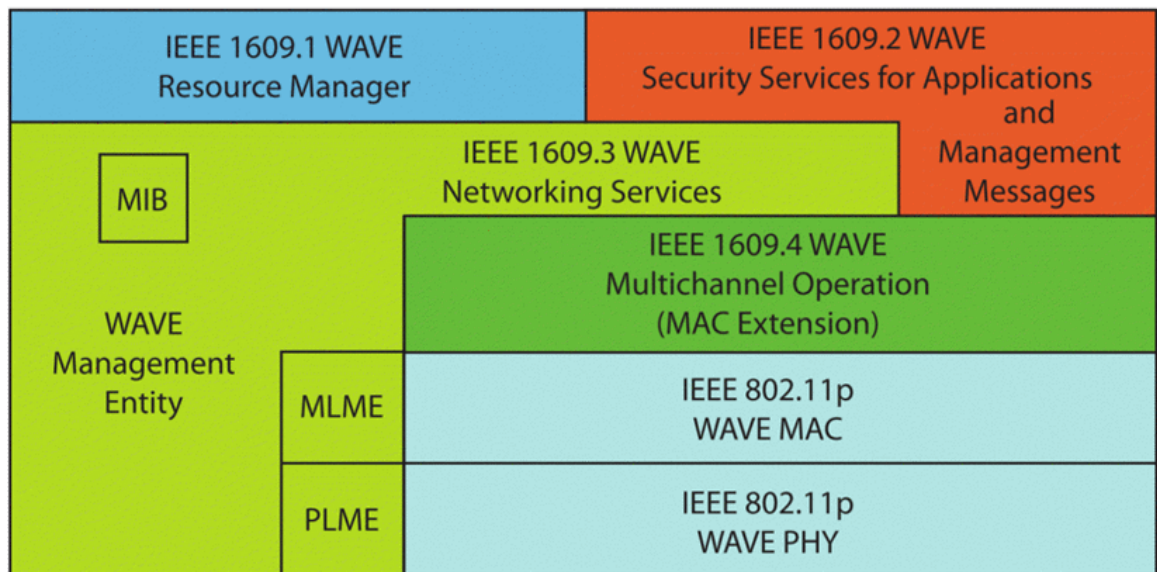
Esta seção apresenta os padrões de redes veiculares, com ênfase no padrão IEEE 802.11p. O movimento de padronização das redes veiculares começou em 1999, nos Estados Unidos, através da FCC (*Federal Communications Commission*), no qual alocou 75 MHz do espectro de frequências, na faixa de 5,9 GHz, para aplicações DSRC (*Dedicated Short Range Communications*) (ALVES ET AL., 2009). O objetivo principal era permitir o desenvolvimento de aplicações de segurança, com o intuito de salvar vidas e melhorar o fluxo de veículos. Na Europa, foram alocados 30 MHz do espectro de frequências na faixa de 5 GHz (JIANG & DELGROSSI, 2008), enquanto no Japão foram alocados 760 MHz (HARTENSTEIN & LABERTEAUX, 2010). A faixa DSRC é livre, porém é necessário obter uma licença para utilizá-la, uma vez que há uma limitação no que se refere às aplicações e tecnologias utilizadas. A Figura 2.2 apresenta a alocação de canais definida para aplicações DSRC.

A partir de 2004, o IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) iniciou os esforços com o objetivo de padronizar a comunicação em redes veiculares dentro do grupo de trabalho conhecido como IEEE 802.11p WAVE (*Wireless Access in the Vehicular Environment*). A arquitetura WAVE é definida em seis documentos:



**Figura 2.2.** Alocação de canais para aplicações DSRC. O espectro é estruturado em sete canais de 10 MHz (JIANG & DELGROSSI, 2008).

IEEE P1609.1, IEEE P1609.2, IEEE P1609.3, IEEE P1609.4, IEEE 802.11 e IEEE 802.11p. O padrão 802.11p, baseado no padrão de redes locais IEEE 802.11a, define as camadas física e de controle de acesso ao meio em redes veiculares. A Figura 2.3 apresenta os componentes da arquitetura WAVE.



**Figura 2.3.** Arquitetura WAVE (GRÄFLING ET AL., 2010).

A arquitetura WAVE não se limita somente à camada física ou subcamada MAC (*Medium Access Control*). O padrão IEEE P1609.1 define os serviços e as interfaces da aplicação de Gerenciamento de Recursos. Já o padrão IEEE P1609.2 define os formatos e o processamento seguro das mensagens. O padrão IEEE P1609.3 define os serviços das camadas de rede e de transporte, incluindo o endereçamento alternativo à camada IP, denominado WSMP (*WAVE Short Message*) e o roteamento,

enquanto o padrão IEEE P1609.4 define as alterações do padrão IEEE 802.11, necessárias para a operação em múltiplos canais. Por fim, o padrão IEEE 802.11p especifica as diferenças do controle de acesso ao meio em ambientes WAVE com relação ao IEEE 802.11 tradicional.

A família IEEE 1609 padroniza a comunicação em ambientes veiculares, possibilitando aos diferentes fabricantes de automóveis um conjunto padronizado de interfaces, com o objetivo de que haja interoperabilidade entre todos os dispositivos fabricados que provêm comunicação entre veículos (V2V) ou entre veículos e infraestrutura de comunicação (V2I). Além disso, o padrão deve considerar que os veículos estão em alta velocidade. Consequentemente, as comunicações devem ser completadas em curtos períodos de tempo (ALVES ET AL., 2009).

### 2.1.3 O Padrão IEEE 802.11p

Segundo Jiang *et al.* (JIANG & DELGROSSI, 2008), aplicações de segurança em ambientes veiculares não podem aguardar longos períodos para estabelecimento da conexão antes de habilitar a comunicação entre veículos em uma via. Do mesmo modo, aplicações comuns (cuja finalidade não é manter a segurança no trânsito) também dependem de conexões eficientes. Por exemplo, a conexão entre veículos e RSUs, que fornecem algum tipo de serviço na via, pode ser limitada devido ao tempo restrito que um veículo leva para transitar pela área de cobertura da RSU. Além disso, a alta mobilidade dos nós (veículos) e o ambiente complexo de uma rodovia apresentam diversos desafios de operação no nível físico da camada de rede.

De forma a solucionar (ou minimizar) estas questões, o padrão IEEE 802.11p foi desenvolvido, originário da alocação do espectro de frequências DSRC nos Estados Unidos. O padrão IEEE 802.11p descreve as funções e serviços necessários para que estações em modo WAVE operem sem a necessidade de juntar-se a um BSS (*Basic Service Set*), como acontece em aplicações tradicionais que utilizam IEEE 802.11. Conforme já mostrado anteriormente (vide Figura 2.3), o IEEE 802.11p é somente um dos padrões relacionados a todas as camadas de protocolos da arquitetura WAVE, responsável pelas camadas física (PHY) e de enlace (MAC) dentro de um único canal lógico. O principal objetivo do padrão IEEE 802.11p é simplificar as operações em um BSS, evitando a sobrecarga típica do padrão IEEE 802.11.

#### 2.1.3.1 Visão Geral sobre o Modo de Operação do IEEE 802.11

**Basic Service Set - BSS:** é um grupo de estações vinculadas a um ponto de acesso e que se comunicam por meio de um enlace sem-fio. Um BSS controla o acesso aos

recursos e serviços oferecidos por um ponto de acesso. Por meio do sensoriamento de quadros *beacons* emitidos periodicamente pelo ponto de acesso, uma estação junta-se a um BSS após concluir algumas etapas interativas para estabelecimento da conexão, como autenticação e associação.

***Basic Service Set Identification - BSSID***: um BSSID é o identificador de um BSS no nível da camada MAC, possuindo estrutura semelhante ao endereço MAC. Cada BSS possui um BSSID único (o endereço MAC do ponto de acesso), compartilhado entre todos os seus membros. O BSSID pode ser usado, por exemplo, para restringir, no nível MAC, a entrada de quadros transmitidos somente por estações que sejam membros de um mesmo BSS.

### 2.1.3.2 Modo de Operação do IEEE 802.11p

As operações no nível da camada MAC do IEEE 802.11 consomem um tempo considerável devido à necessidade de interação de uma estação por diferentes processos antes do estabelecimento da conexão. Deste modo, é desaconselhável o seu uso em ambientes veiculares (JIANG & DELGROSSI, 2008). Aplicações de segurança necessitam de troca de dados instantânea, que não dependam da alocação de tempo e recursos na monitoração de *beacons*, já que o tempo disponível para comunicação pode ser extremamente curto. Assim, um recurso introduzido pelo padrão IEEE 802.11p quando comparado ao IEEE 802.11 é a possibilidade de uma estação transmitir e receber quadros de dados em "Modo WAVE", ou seja, utilizando um BSSID coringa e sem a obrigatoriedade de pertencer a um BSS. Deste modo, dois veículos podem se comunicar imediatamente, sem nenhuma sobrecarga adicional de tempo.

Na camada física, poucas alterações foram realizadas no padrão IEEE 802.11p em comparação ao IEEE 802.11. No IEEE 802.11a, as estações já operam em 5 GHz, não havendo dificuldades de alterar a configuração de modo que possam operar em 5.9 GHz. Além disso, há também os desafios técnicos relacionados a uma mudança mais profunda da arquitetura. Enquanto no nível MAC as alterações podem ser realizadas basicamente com atualizações de *software*, na camada física as alterações podem implicar na necessidade de projeto de novas tecnologias de rede. Em resumo, de acordo com Gräfling *et al.* (GRÄFLING ET AL., 2010), as definições para a camada física do padrão IEEE 802.11p seguem a mesma estrutura do padrão IEEE 802.11a, exceto no que se refere à largura de banda do canal, que passa a ser de 10 MHz, em vez dos 20 MHz tipicamente usados em dispositivos configurados com o padrão IEEE 802.11a.

## 2.2 Simulações em Redes Veiculares

A execução de experimentos reais em redes veiculares pode exigir diversos recursos, como grande número de pessoas, altos custos e condições climáticas favoráveis, além de ser difícil controlar a realização de experimentos em um ambiente com tantas variáveis (ALVES ET AL., 2009). Sendo assim, experimentos utilizando simuladores aparecem como uma opção atrativa aos pesquisadores. Em uma simulação de redes veiculares, diversos parâmetros devem ser modelados, como a utilização de um modelo de mobilidade específico, a forma de propagação dos sinais, bem como a disputa de acesso ao meio e protocolos de rede.

As simulações envolvendo redes veiculares tipicamente são classificadas entre simulações de tráfego e simulações de rede. Existem na literatura diversos simuladores de tráfego, como o SUMO (*Simulation of Urban MObility*) (KRAJZEWICZ ET AL., 2006) e VanetMobiSim (HÄRRI ET AL., 2006). Estes simuladores são responsáveis por gerar o modelo de trânsito realístico dos veículos. Estes modelos são então integrados a simuladores de rede, como o NS-3 (*The Network Simulator*) (HENDERSON ET AL., 2006) e o GloMoSim (*Global Mobile system Simulator*) (BAJAJ ET AL., 1999), usados para medir o desempenho da rede. Entretanto, um problema com a utilização de simuladores integrados é que, em muitos casos, tanto o modelo de mobilidade quanto o modelo de rede são pouco aprofundados no que se refere às funcionalidades oferecidas (ARBABI & WEIGLE, 2010).

### 2.2.1 O Simulador de Eventos Discretos NS-3

O simulador de eventos discretos NS-3 é um dos mais populares simuladores de rede de código aberto, desenvolvido principalmente para uso educacional e acadêmico (HENDERSON ET AL., 2006). Tal como seu predecessor (NS-2), os modelos de simulação do NS-3 também são implementados em C++, com determinadas partes da simulação podendo ser opcionalmente implementadas em *Python*. Diferente do NS-2, o NS-3 não utiliza *scripts* desenvolvidos na linguagem oTcl para controlar as simulações, solucionando definitivamente os problemas introduzidos com a combinação das linguagens C++ e oTcl na versão anterior.

Atualmente, o NS-3 encontra-se estável em sua atualização 24, e a partir da atualização 19 passou a permitir, entre outros recursos, simulações realistas de redes veiculares por meio da implementação de módulos do padrão IEEE 802.11p. Neste simulador, parâmetros que modelam o meio sem-fio, como a perda de propagação devido à atenuação do sinal, atraso de propagação do canal, potência de transmissão,

limiar de energia do sinal recebido para uma correta detecção na camada física e frequência de operação dos dispositivos podem ser configurados.

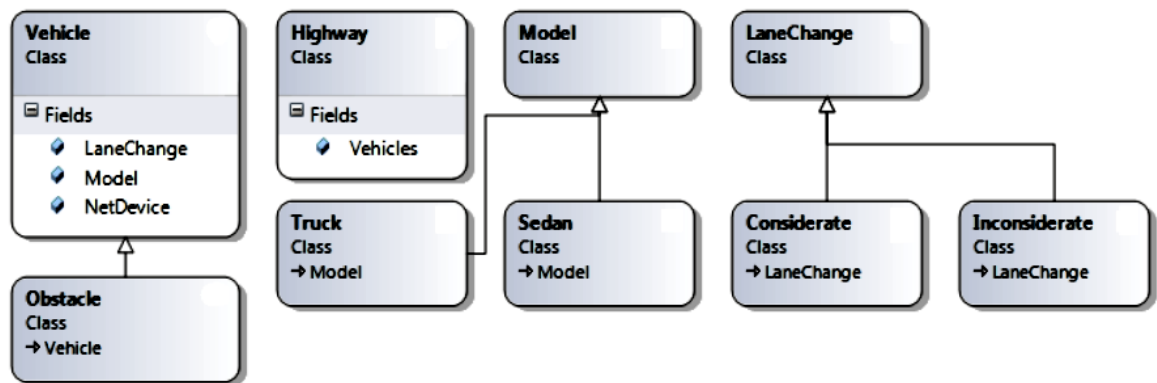
Por sua popularidade (o que garante uma vasta documentação disponível para consulta), possibilidade de execução de simulações realistas para cenários de redes veiculares, bem como capacidade de realizar simulações de rede em larga escala de uma maneira eficiente (WEINGÄRTNER ET AL., 2009), neste trabalho nós consideramos, como a melhor escolha, avaliar o DOCS4V por meio de simulações utilizando o NS-3.

### 2.2.2 Simulação da Mobilidade dos Veículos: IDM e MOBIL

Nesta pesquisa, a simulação da mobilidade dos veículos foi definida com base na implementação do modelo de mobilidade IDM (*Intelligent Driver Model*) e modelo de troca de faixa MOBIL (*Minimizing Overall Braking Induced by Lane change*), ambos propostos por Treiber *et al.* (MARTIN TREIBER, 2010A) (MARTIN TREIBER, 2010B) e integrados ao NS-3 por Arbabi *et al.* (ARBABI & WEIGLE, 2010). No geral, são implementadas cinco classe principais (Figura 2.4):

- **Vehicle**: nó móvel com uma interface sem-fio;
- **Obstacle**: nó estático, sem mobilidade;
- **Model**: modelo de mobilidade IDM;
- **LaneChange**: modelo de troca de faixa MOBIL;
- **Highway**: rodovia em linha reta, com múltiplas faixas e bidirecional. Possui os objetos **Vehicle** e **Obstacle** e usa as propriedades do **Model** e **LaneChange** para controlar a mobilidade dos objetos **Vehicle**.

No IDM, a aceleração e desaceleração de um veículo dependem da posição e velocidade de outros veículos à sua frente. Cada veículo no IDM possui uma velocidade desejada, tempo seguro de avanço (tempo necessário para cobrir uma distância entre dois veículos), aceleração em pista livre de trânsito, uma desaceleração confortável e a distância mínima desejada para o veículo da frente. Em um caminho livre, a aceleração diminui ao se aproximar da velocidade desejada. O modelo de mobilidade IDM usa estes parâmetros, além do estado atual do veículo e do veículo imediatamente à frente para calcular a nova aceleração. Usuários podem definir manualmente os parâmetros de aceleração e velocidade de cada veículo, bem como deixar que sejam baseados nas regras do próprio modelo.



**Figura 2.4.** Componentes dos modelos IDM e MOBIL - Adaptado de (AR-BABI & WEIGLE, 2010).

Já no modelo MOBIL, a mudança de faixa é baseada em critérios de segurança e incentivo. O critério de segurança define que, ao tentar trocar de faixa, um veículo não provoque uma desaceleração insegura para o veículo imediatamente atrás na nova faixa. O critério de incentivo é atendido se, ao trocar de faixa, um veículo obtém uma vantagem maior (aumento na aceleração) do que as desvantagens dos demais veículos (diminuição da aceleração) na nova faixa. Para tornar a simulação mais realista, o modelo também implementa um fator de cortesia, onde ambos os critérios podem ser influenciados pelo comportamento do condutor (imprudentes ou atenciosos). A troca de faixa só é efetivamente realizada se ambos os critérios são atendidos. Conforme apresentado na Seção 4.7, com a finalidade de simular o comportamento do condutor após receber um alerta de obstáculo, as condições que permitem a troca de faixa para veículos que irão entrar em um trecho que possui um obstáculo foram alteradas, de forma que apenas o critério de segurança seja considerado (maiores detalhes são apresentados na Seção 4.7).

Cada veículo possui as seguintes propriedades: um identificador, uma dimensão (comprimento e largura, em metros), uma faixa (número da faixa da via onde o veículo se encontra), uma direção (leste ou oeste), uma posição (baseada nas coordenadas  $x$ ,  $y$  e  $z$ , também em metros) uma velocidade (em  $m/s$ ), uma aceleração (em  $m/s^2$ ), um modelo de mobilidade (que define, por exemplo, a velocidade desejada do veículo), bem como um modelo para definir as condições para a troca de faixa. São definidos dois tipos de veículos: carro (classe *Sedan*) e caminhão (classe *Truck*). O modelo também pode ser expandido, permitindo que os usuários definam seus próprios tipos de veículos contendo diferentes parâmetros para experimentos específicos.

Um veículo corresponde a um nó sem-fio no NS-3, podendo se mover com mobilidade realística e se comunicar com outros veículos a fim de formar uma rede veicular. Na implementação original de (ARBABI & WEIGLE, 2010), os veículos são capazes de se comunicar (transmitir e receber pacotes) por meio dos canais WiFi (IEEE 802.11a) padrão do NS-3. Neste trabalho, a forma de comunicação entre os veículos (e também entre os veículos e as RSUs) foi alterada, de forma a possibilitar a comunicação entre os nós por meio do padrão IEEE 802.11p (padrão para ambientes veiculares). Entretanto, como os modelos originais implementados por Arbabi *et al.* são compatíveis apenas com a atualização 8 do NS-3, e a partir da atualização 11 a construção do sistema passou a ser modularizada em estruturas de diretórios (todo o código fonte foi reorganizado em bibliotecas modulares, em vez de bibliotecas individuais), foi necessário adaptar o código fonte original, substituindo bibliotecas e funções defasadas por suas correspondentes, uma vez que (conforme mencionado anteriormente) somente à partir da atualização 19 o NS-3 passou a oferecer suporte ao padrão IEEE 802.11p.

Obstáculos são nós estáticos que contêm um dispositivo de comunicação sem-fio. Obstáculos possuem todas as capacidades de um veículo, exceto a mobilidade. Desta forma, estes elementos podem ser usados para simular RSUs, bem como utilizados como barreiras para delimitar o trânsito e assim gerar congestionamentos. Neste cenário, é necessário determinar a faixa e direção que os obstáculos estarão. Também é possível simular redes entre RSUs (`Obstacles`) e OBU's (`Vehicles`) customizadas.

O objeto `Highway` gerencia o comportamento dos veículos e sua mobilidade na via, como posição, direção e faixa que ocupa. A cada período de tempo (1 ms), o objeto `Highway` atualiza a posição, velocidade e aceleração de cada veículo de acordo com seu modelo de mobilidade. Pode-se customizar o comprimento da via (em metros), fluxo de trânsito (unidirecional ou bidirecional), número de faixas em cada direção, largura das faixas (em metros), largura do canteiro central que divide ambas as direções (em metros), entre outros. Através dos parâmetros implementados no objeto `Highway`, é possível inserir veículos de maneira manual ou automática na via. Na inserção automática, é necessário definir a distância mínima de segurança para o veículo à frente. Novos veículos não são inseridos na via até que a posição  $x$  do veículo imediatamente à frente seja superior à distância mínima de segurança. Como o valor considerado para a distância mínima de segurança (52 metros) é fixo e não corresponde à realidade, nesta pesquisa optou-se por calcular a distância mínima de segurança de um veículo para o veículo imediatamente à frente de maneira dinâmica, baseado na velocidade atual de ambos os veículos (maiores detalhes serão

apresentados na Seção 4.4).

## 2.3 Monitoramento de Trânsito

Sistemas de monitoramento de trânsito possuem baixo grau de exigência quanto à precisão da localização do veículo na via. Segundo Boukerche *et al.* (BOUKERCHE ET AL., 2008), a margem de erro de sistemas de localização pode variar entre 10 e 30 metros. Deste modo, é viável compensar tais discrepâncias com a previsibilidade da movimentação do veículo na via. A Seção 2.3.1 apresenta as diversas propostas que se dedicam a monitorar e divulgar as condições de trânsito baseado na movimentação e localização do veículo. A Seção 2.3.2 é dedicada aos sistemas de monitoramento descentralizados que, de alguma forma, contribuem para o desenvolvimento do DOCS4V.

### 2.3.1 Categorias de Sistemas de Monitoramento

Três abordagens principais se dedicam ao monitoramento das condições de trânsito (GRAMAGLIA ET AL., 2014): laços de indução embutidos na via (GANGETTY, 1997) (OH ET AL., 2002) (ROBINSON & POLAK, 2005) (OH ET AL., 2006), câmeras de vídeo (HUBAUX ET AL., 2004) (RAYA ET AL., 2006) (KIRATIRATANAPRUK & SIDDHICHAJ, 2006) e o conceito de carros flutuantes (DOUANGPHACHANH & ONEYAMA, 2014) (MOHAMED ET AL., 2015) (VITTORIO ET AL., 2014) (DOLUI ET AL., 2013) (HAN ET AL., 2014). Das três técnicas, o monitoramento das condições de trânsito por laços de indução é a mais antiga e ainda mais utilizada nas estradas. Esta técnica consiste no uso de um conjunto de fios inserido sob o pavimento da via e acoplado a um sensor de medição que altera seu campo magnético sempre que detecta a passagem de um veículo sobre ele (ANDERSON, 1970). Características como o instante de tempo em que o veículo passou pelo laço, sua velocidade, a faixa e o tipo podem ser coletadas caso se faça a instalação em diversos segmentos da via. Entretanto, os custos de implantação e manutenção são extremamente caros, podendo custar em torno de US\$8.000,00 (ABUELELA ET AL., 2008) cada sensor.

Propostas de monitoramento que utilizem câmeras de vídeo também possuem altos custos de instalação e manutenção, além de introduzirem questões de privacidade. Ademais, trata-se de uma técnica pouco eficiente, uma vez que o monitoramento é restrito ao campo de visão e não pode reagir a potenciais problemas de circulação, podendo ainda não funcionar adequadamente em condições climáticas

adversas. Ainda assim, devido aos recentes avanços de *softwares* de reconhecimento de imagem e análise de dados (ZHOU ET AL., 2007) (ROBERT, 2009) (CHEN ET AL., 2011), tais propostas são capazes de fornecer informações adicionais quando comparadas a outras que utilizem laços de indução.

O conceito de carros flutuantes é a mais recente e acessível técnica de monitoramento de trânsito das três previamente mencionadas, consistindo no uso de dados sobre localização e deslocamento coletados colaborativamente de usuários a partir de dispositivos móveis presentes no interior dos veículos, como *smartphones*. Dotados de sensores de aceleração e aplicações geo-referenciadas que utilizam GPS, é possível definir a posição do veículo na via, e com redes 3G/4G (GOOGLE, 2016) (VALERIO ET AL., 2009) ou redes que utilizam o padrão IEEE 802.11 (RIBEIRO JÚNIOR ET AL., 2011) (SANGUESA ET AL., 2013) (BARCELOS ET AL., 2014) enviar os dados sobre a movimentação do mesmo. Dada a ubiquidade destes dispositivos e a alta densidade de pessoas em áreas metropolitanas, o sensoriamento participativo obtido através de *smartphones* pode atingir um nível de cobertura sem precedentes. Uma vez que os próprios usuários da via agem como sensores urbanos, a contribuição não se restringe a medidas obtidas pelo *hardware* dos sensores, mas também com sensações, percepções e observações pessoais (RESCH, 2013). Entretanto, questões relacionadas à garantia de privacidade das informações pessoais dos usuários, alta demanda da tecnologia 3G/4G e, principalmente, o aumento do consumo de bateria dos dispositivos móveis devido à combinação do GPS com outra tecnologia de transmissão, faz com que esforços de pesquisa sejam direcionados a buscar tecnologias complementares para o envio de dados originalmente projetados para redes celulares.

### 2.3.2 Sistemas Descentralizados de Monitoramento de Trânsito

Sistemas de monitoramento de trânsito baseados em uma arquitetura descentralizada vêm ganhando força como uma alternativa economicamente viável em termos de implantação e manutenção, uma vez que não requerem grandes investimentos em infraestrutura. Para ilustrar esta situação, tomemos como exemplo o uso de redes celulares com um servidor centralizado. Além de levar a diversos problemas, como sobrecarga da rede e custo ao usuário por adquirir um plano de dados, o custo médio de instalação de torres celulares (cuja cobertura é de aproximadamente 33 km) é de US\$150.000, com taxa média anual de US\$45.000 (STATISTIC BRAIN, 2015). Já RSUs podem ser encontradas por menos de US\$1.000 (com cobertura superior a 1 km), o que demonstra boa relação custo/benefício.

Em (WEDEL ET AL., 2009), os autores apresentam um sistema que permite recalcular rotas com base na velocidade média necessária para que os veículos percorram um segmento da via, proporcionando uma redução de até 50% no tempo de viagem. No algoritmo proposto, cada veículo envia a sua velocidade média para outros veículos vizinhos, que usam este valor para calcular o peso da informação para o segmento da via correspondente. Este peso é usado pelo veículo para recalcular sua rota de viagem. Uma vez que os congestionamentos são dependentes do tempo, valores de velocidade mais recentes devem ter maior peso. Desta forma, os pesos são calculados com a ajuda de um *timestamp* anexado à mensagem enviada pelo veículo e obtido por meio de um GPS, para que seja possível comparar o momento que a mensagem foi enviada com o tempo máximo para o qual um valor é considerado obsoleto, baseado na hora atual.

Já em (TSAO & CHENG, 2011), os autores propõem um sistema híbrido que explora as vantagens das arquiteturas VANET e P2P (*Peer-To-Peer*). O sistema é dividido em dois níveis: no nível inferior, os veículos formam uma VANET para se comunicar e trocar informações sobre o trânsito. Já no nível superior, alguns veículos selecionados estabelecem uma comunicação P2P por meio de uma infraestrutura que fornece cobertura banda larga sem-fio, cujo objetivo é atenuar as desconexões inerentes de sistemas *ad-hoc*. Assume-se que cada veículo é capaz de obter sua posição geográfica e velocidade por meio de um GPS ou outro mecanismo similar. Os resultados obtidos através de simulações revelam que a arquitetura híbrida proposta pelos autores é capaz de alcançar uma maior taxa de sucesso na consulta pelas informações de trânsito, realizada via comunicação V2V ou V2I, com menor latência e menores custos de manutenção.

Um sistema que permite aos veículos obter informações de trânsito através de comunicação *ad-hoc* e utilizar tais informações para recalcular sua rota é apresentado em (LEONTIADIS ET AL., 2011). O objetivo principal dos autores é minimizar os tempos de viagem e mostrar como um sistema baseado na arquitetura de comunicação *ad-hoc* pode reduzir o congestionamento de trânsito em um cenário real. No sistema, denominado CATE (*Computer-Assisted Traveling Environment*), sempre que um veículo sai de um segmento da via, é responsável por criar uma amostra das condições de trânsito, à qual conterá o ID e a direção do segmento, o tempo gasto pelo veículo para atravessá-lo, e o *timestamp* da informação. Para se obter o tempo necessário para atravessar um segmento e o *timestamp* da amostra, o sistema utiliza um dispositivo GPS para coletar o momento em que o veículo entrou e saiu do respectivo segmento. Periodicamente, CATE seleciona um conjunto de amostras presentes no *buffer* do veículo e dissemina a informação para seus vizinhos.

O algoritmo de seleção de amostras age de tal modo que somente as informações mais recentes, avaliadas com base no *timestamp*, sejam disseminadas de forma a maximizar a largura de banda restrita em sistemas *ad-hoc*.

Em (PICONE ET AL., 2012), é proposto um sistema chamado D4V. Neste sistema, as informações sobre o trânsito podem ser recuperadas de maneira eficaz bastando informar a posição geográfica desejada. Usuários participam do sistema utilizando seu *smartphone* para enviar e receber informações sobre as condições de trânsito, bem como sobre situações potencialmente perigosas, em tempo real. O conhecimento da posição geográfica dos usuários, periodicamente mantidas pelos veículos de acordo com o esquema de cobertura DGT (*Distributed Geographic Table*), habilita a disseminação de informação sobre as condições de trânsito. Cada mensagem inclui o tipo de notificação, a localização associada à informação, a área que a notificação deve alcançar e o tempo de vida para o evento. Dentre os módulos que compõem o sistema, está o *Location Manager* (LM), responsável por atualizar as informações sobre a localização do *smartphone* através de GPS, WiFi ou rede celular, tentando minimizar o consumo de energia. Experimentos foram realizados por meio de simulações e testes de campo, revelando que o uso do sistema pode reduzir o número de condutores envolvidos em congestionamentos.

Em (RIBEIRO JÚNIOR ET AL., 2013), os autores propõem um sistema descentralizado para monitoramento de trânsito que dispensa o uso do GPS como referência espacial e temporal. A conexão com a Internet não é necessária, minimizando o consumo de bateria dos dispositivos móveis e os custos ao usuário, além de viabilizar a implantação do sistema em locais sem infraestrutura de energia ou cobertura celular. Neste sistema, a transmissão de informações é feita exclusivamente via comunicação V2I, utilizando os próprios veículos como enlaces de comunicação. OBUs e RSUs trocam informações a fim de atualizar suas TCTs, estruturas que contêm informações sobre cada trecho da via. Nas TCTs são armazenadas as seguintes informações: Trecho, Condição e TTL. O Trecho representa o identificador único do trecho, a Condição representa a velocidade média atual no trecho e o TTL representa o tempo de vida de cada informação. Um protótipo do sistema utilizando uma rede IEEE 802.11b/g foi implementado e avaliado em experimentos práticos, onde os resultados obtidos demonstraram um alto grau de precisão tanto na detecção da posição dos veículos, quanto na estimativa da condição da via.

Assim como em (WEDEL ET AL., 2009), (TSAO & CHENG, 2011) e (LEONTIADIS ET AL., 2011), outros sistemas também fazem uso de receptores GPS para descartar informações consideradas obsoletas com base em seu *timestamp* (XU & BARTH, 2006) (GRAMAGLIA ET AL., 2014), aumentando desta maneira o consumo

de bateria em dispositivos como *smartphones* (BEN ABDESSLEM ET AL., 2009). Além do aumento do consumo de bateria proveniente do uso de dispositivos GPS, a grande maioria destes sistemas é baseada em redes *ad-hoc*. Nestas redes, caso a densidade de veículos seja insuficiente para formar uma VANET, as informações podem não ser distribuídas para todos os veículos com êxito. Outra desvantagem está relacionada ao problema conhecido como *broadcast storm*, passível de ocorrer em ambientes com alta densidade de veículos, degradando gravemente a performance da rede. Apesar de ser baseada em redes veiculares infraestruturadas, o sistema proposto em (RIBEIRO JÚNIOR ET AL., 2013) não garante que informações mais recentes serão privilegiadas, uma vez que nenhuma política para cálculo do TTL foi definida pelos autores. Além disso, como o sistema é baseado somente em comunicações V2I, a latência de divulgação dos dados é proporcional à velocidade dos veículos e maior que os 100 ms recomendados (VSC, 2005). Por fim, a funcionalidade do sistema é limitada à divulgação das condições de trânsito, e a viabilidade de uso em ambientes com condições reais de trânsito não foi avaliada.

Também descentralizado e com base no sistema apresentado em (RIBEIRO JÚNIOR ET AL., 2013), DOCS4V trabalha bem mesmo em condições com baixa densidades de veículos (importante vantagem sobre sistemas baseados puramente na arquitetura *ad-hoc*), mostrando-se acurado para estimar as condições de trânsito (como demonstrado no Capítulo 6). Além disso, assim como em (RIBEIRO JÚNIOR ET AL., 2013) e diferente da maioria dos sistemas descentralizados presentes na literatura, DOCS4V dispensa o uso de um receptor GPS como referência espacial. A localização da OBU na via é determinada com base na própria comunicação com as RSUs. Uma vez que em sistemas descentralizados não é possível assumir o sincronismo entre os relógios dos dispositivos, é necessário que algum mecanismo garanta que as informações mais recentes serão privilegiadas. Como solução, definiu-se que cada dispositivo fica responsável por decrementar o valor do TTL baseado no horário local. A falta de sincronismo é minimizada, ficando restrita apenas ao tempo de envio entre um elemento e outro. Dessa forma, o sistema dispensa o uso de GPS também como referência temporal, uma vez que não é necessária a definição de *timestamps* como rótulos de informações mais recentes.

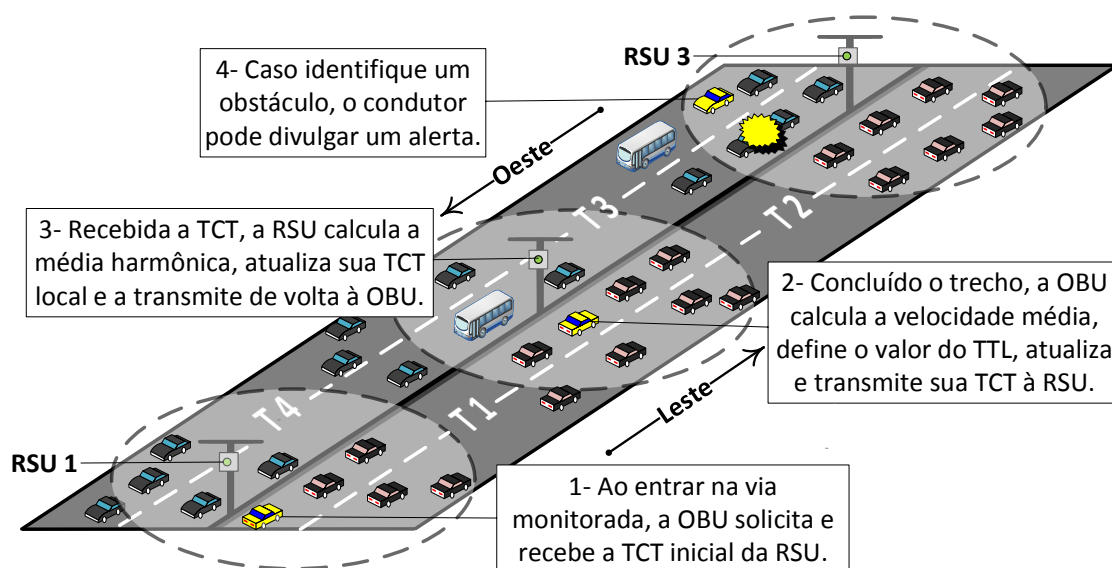
## Capítulo 3

# Arquitetura e Modo de Operação do Sistema

A arquitetura do DOCS4V se baseia na mesma estrutura fundamental definida na proposta elaborada por (RIBEIRO JÚNIOR ET AL., 2013). Considera-se que as OBUs localizadas no interior dos veículos estejam com a aplicação do sistema em execução. Uma OBU pode ser qualquer dispositivo móvel executando a aplicação do sistema dentro de um veículo na via. Já a RSU é composta por um ponto de acesso dentro de uma caixa hermética (RIBEIRO JÚNIOR ET AL., 2011). A seguir são listadas as principais características e definições propostas no sistema elaborado por (RIBEIRO JÚNIOR ET AL., 2013) e que são mantidas no DOCS4V:

- aplicável em vias com trânsito nos dois sentidos;
- as distâncias entre as RSUs (bem como sua identificação) são previamente conhecidas;
- um trecho é um segmento entre duas RSUs;
- considera-se um trecho diferente para cada sentido de direção;
- utiliza-se a média harmônica para calcular a condição única do trecho;
- a localização da OBU é inferida utilizando a variação do RSSI (*Received Signal Strength Indication*).

Em linhas gerais, o funcionamento do DOCS4V é o seguinte: OBUs e RSUs trocam informações a fim de atualizar suas TCTs. Assim, ao concluir a travessia de um trecho e calcular a velocidade média no mesmo (com base na distância e no tempo



**Figura 3.1.** Detalhes do modo de operação do DOCS4V em uma via monitorada.

de percurso entre duas RSUs), a OBU atualiza sua TCT local com a condição de trânsito calculada para o trecho e transmite a TCT para a RSU mais próxima. Como várias OBUs podem transmitir simultaneamente, a RSU utiliza a média harmônica para calcular uma condição de trânsito única no trecho. O uso da média harmônica minimiza o impacto de OBUs que apresentam velocidades médias destoantes, como carros de polícia ou ambulâncias. Por não haver um elemento centralizador, não há garantia de sincronismo entre os relógios dos dispositivos. Deste modo, toda informação gerada possui um tempo de vida (TTL), a ser interpretado de acordo com o relógio local do dispositivo. O objetivo é privilegiar as informações mais recentes, tornando possível o monitoramento do trânsito. Como os próprios veículos agem como enlaces de comunicação, o TTL da informação é baseado nas condições de trânsito dos trechos da direção oposta à direção do veículo emissor da informação (já que a informação gerada será transportada por veículos transitando por aquela direção). Caso detecte um obstáculo na via, o condutor tem a opção de registrá-lo no sistema. Nesta situação, alertas serão propagados para todos os veículos. O objetivo é permitir que os condutores replanejem suas rotas antecipadamente e evitem frenagens bruscas em frente ao obstáculo.

A Figura 3.1 apresenta os elementos que compõem a arquitetura do DOCS4V e seu modo de funcionamento.

### 3.1 Tabela de Condição de Trecho (TCT)

A TCT é usada para troca de dados entre OBUs e RSUs. A estrutura da tabela é composta por linhas que representam cada trecho da via. Assim, a quantidade de linhas de uma TCT será proporcional ao total de trechos da via monitorada, que é proporcional ao número de RSUs instaladas. O total de trechos ( $total_{trecho}$ ) é dado pela Equação 3.1:

$$total_{trecho} = ((num_{RSU} - 1) * num_{dir}) \quad (3.1)$$

onde  $num_{RSU}$  e  $num_{dir}$  são, respectivamente, o número de RSUs e o número de direções, que no DOCS4V será sempre 2.

No DOCS4V, cada linha da TCT contém os seguintes campos: **Trecho**, **Condição Atual**, **Condição Anterior**, **TTL**, **TTL Máximo**, **Faixa com Obstáculo**, **C00** (Controle de Ocorrência de Obstáculos) e **Cronômetro**. A Tabela 3.1 descreve todos os campos presentes em cada linha da TCT.

É importante ressaltar que o número de campos **Faixa com Obstáculo** e **C00** na TCT serão proporcionais ao número de faixas reais da via. Por exemplo, considerando a Figura 3.1, a TCT dos veículos e RSUs localizados na via ilustrada possuirão dois campos **Faixa com Obstáculo** (**Faixa com Obstáculo 0** e **Faixa com Obstáculo 1**) e dois campos **C00** (**C00 0** e **C00 1**). Nesta pesquisa, a faixa de trânsito localizada mais a direita da via possui identificador 0, enquanto a faixa localizada mais a esquerda da via possui identificador  $n-1$ , onde  $n$  é o número de faixas reais em cada direção. Os campos **Faixa com Obstáculo** e **C00** estão relacionados, ou seja, para cada **Faixa com Obstáculo** na via, haverá um **C00** associado. A quantidade de obstáculos por faixa (bem como sua posição) não influenciam, uma vez que DOCS4V não trabalha com GPS.

### 3.2 Transmissão da TCT pela Unidade de Bordo

O algoritmo 1 apresenta todas as etapas desempenhadas pela OBU: (1) identificar a RSU que delimita o início do novo trecho (linhas 3 e 4 do Algoritmo 1), (2) detectar o momento que passou por cada RSU (linha 5 do Algoritmo 1), (3) calcular, em tempo de execução, a velocidade média no trecho percorrido (linha 9 do Algoritmo 1), (4) calcular, em tempo de execução, um valor para o TTL da condição de trânsito gerada (linhas 10 a 19 do Algoritmo 1), (5) atualizar a TCT local e transmitir para a RSU mais próxima (linhas 20 e 21 do Algoritmo 1) e (6) receber a TCT enviada de

**Tabela 3.1.** Descrição das informações armazenadas em uma TCT.

| <b>Campo</b> | <b>Nome</b>         | <b>Descrição</b>  |
|--------------|---------------------|---|
| 1            | Trecho              | Identificador único do trecho em questão.   |
| 2            | Condição Atual      | Velocidade média atual no trecho.   |
| 3            | Condição Anterior   | Velocidade média anterior no trecho.  |
| 4            | TTL                 | Define o tempo de vida da informação, atribuindo maior peso para informações mais recentes (possuirão um TTL maior). Minimiza a falta de sincronismo entre os dispositivos. Informações defasadas recebem menor ou nenhum peso (se TTL = 0).  |
| 5            | TTL Máximo          | Maior TTL já calculado para informações de um trecho. Se o TTL calculado é inferior ao TTL máximo, o TTL é definido com o valor máximo. O objetivo é possuir uma base de tempo suficiente para substituir informações obsoletas, que ainda possam estar ativas devido ao grande valor atribuído ao TTL anteriormente, principalmente em momentos de grave congestionamento (Seção 3.4.1). |
| 6            | Faixa com Obstáculo | Indica a faixa com obstáculo em um trecho. Permite ao condutor ajustar sua rota antecipadamente.  |
| 7            | COO                 | Se o TTL é zero, garante que informações sobre obstáculos não sejam removidas nas RSUs por OBU's retardatárias transportando informações defasadas. Inicialmente, o valor do COO para cada faixa de trânsito é zero, sendo incrementado à medida que ocorram obstáculos inéditos (Seção 3.5.5)  |
| 8            | Cronômetro          | Garante que informações obsoletas (que não recebem atualização há um determinado tempo) sejam invalidadas, já que podem não condizer com as condições de trânsito atuais, inviabilizando seu uso como base de orientação dos condutores (Seção 3.4.2).  |

volta pela RSU e atualizar a TCT local com dados sobre os trechos à frente (linhas 22 a 28 do Algoritmo 1).

Ao passar pela RSU inicial e entrar no perímetro monitorado da via, a OBU solicita a TCT por meio de um quadro de requisição (linhas 6 e 7 do Algoritmo 1), conforme demonstrado na Figura 3.1. Esta ação permite ao condutor conhecer as

---

**Algorithm 1** Algoritmo V2I executado por uma OBU.

---

```

1:  $total_{trecho} \leftarrow ((num_{RSU} - 1) * num_{dir});$ 
2: while true do
3:   if  $RSU_{id}$  é conhecido then
4:      $RSU_{atual} \leftarrow RSU_{id};$ 
5:     if OBU ultrapassou a posição da RSU then
6:       if é uma RSU inicial then
7:         Solicita TCT inicial;
8:       else
9:         Calcula a velocidade média no trecho;
10:         $iteraLinhas_{TCT} \leftarrow 1;$ 
11:        while  $iteraLinhas_{TCT} < total_{trecho}$  do
12:          if  $trecho_{id} \geq trechoPar_{id}$  and  $trecho_{id} \leq ultimoTreDiOp_{id}$  then
13:            if  $condAtual < condAnterior$  then
14:              Calcula a variação das velocidades no trecho;
15:            end if
16:            Calcula o TTL, anexando o percentual da variação;
17:          end if
18:           $iteraLinhas_{TCT} \leftarrow iteraLinhas_{TCT} + 1;$ 
19:        end while
20:        Atualiza a linha referente ao trecho percorrido na TCT local e envia para
21:        a RSU;
22:        Após o envio da TCT pela RSU, atualiza as linhas da TCT local com
23:        dados sobre trechos à frente;
24:         $iteraLinhas_{TCT} \leftarrow 1;$ 
25:        while  $iteraLinhas_{TCT} < num_{RSU}$  do
26:          Atualiza as linhas da TCT local com base na TCT recebida;
27:           $iteraLinhas_{TCT} \leftarrow iteraLinhas_{TCT} + 1;$ 
28:        end while
29:         $RSU_{anterior} \leftarrow RSU_{atual};$ 
30:         $RSU_{atual} \leftarrow \{\};$ 
31:      end if
32:    end if
33:  end if
34:  Procura por  $RSU_{id}$  conhecido;
35: end while

```

---

condições de trânsito de toda a via. A OBU detecta que passou pela RSU quando recebe um *beacon* (quadros de gerenciamento disponíveis em redes IEEE 802.11 e enviados periodicamente pelas RSUs com o objetivo de se anunciar aos clientes em potencial) com RSSI no mínimo 0.5 dBm mais fraco que o maior RSSI recebido da mesma RSU. O valor de 0.5 dBm foi definido empiricamente baseado nos resultados dos experimentos simulados apresentados no Capítulo 6.

Ao concluir a travessia de um trecho (após passar pela RSU que delimita o fim do trecho), a OBU calcula a velocidade média do veículo no trecho percorrido

com base na Equação 3.2:

$$VM_{veiculo} = \frac{extensao_{trecho}}{tempo_{veiculo}(RSU_{atual}) - tempo_{veiculo}(RSU_{anterior})} \quad (3.2)$$

onde  $extensao_{trecho}$  é a extensão do trecho percorrido,  $tempo_{veiculo}(RSU_{atual})$  é o momento em que o respectivo veículo esteve mais próximo da RSU atual, e  $tempo_{veiculo}(RSU_{anterior})$  é o momento em que o respectivo veículo esteve mais próximo da RSU anterior.

Após calcular a velocidade média no trecho, a OBU deve então definir o valor do TTL da informação gerada para, em seguida, atualizar e enviar sua TCT local para a RSU. A definição do valor do TTL deverá ser realizada com base na velocidade média para percorrer todos os trechos paralelos aos trechos percorridos pela OBU que está emitindo a informação sobre a velocidade média no trecho. Nesta pesquisa, conceituamos como trechos paralelos todos os trechos da direção oposta à direção da OBU que está emitindo a informação e que sejam paralelos aos trechos percorridos por esta última (maiores detalhes na Seção 3.4).

Por exemplo, na Figura 3.1, a condição de trânsito do trecho 2 (T2) será gerada quando a OBU passar pela RSU 3. Nesta RSU, serão atualizadas todas as linhas de sua TCT local referentes aos trechos anteriores à sua posição, uma vez que os TTLs destas linhas, presentes na TCT transmitida pela OBU, são maiores. A exceção ocorre no caso do veículo (que possui esta OBU) ter sido ultrapassado por outro veículo na mesma direção e que, conseqüentemente, possua informações mais recentes sobre os trechos já percorridos. É importante destacar que inclusive as informações sobre os trechos 3 (T3) e 4 (T4) serão mais recentes. A OBU não viaja por estes trechos, mas recebe a informação pelas RSUs 1 e 2. Como a informação sobre o trecho percorrido é transportada pelas OBUs da direção oposta, o TTL da informação gerada no trecho 2 é baseado na velocidade média para viajar até o último trecho desta direção (T4). Esta informação deve viajar pelos trechos 3 e 4 para chegar, ainda válida, à RSU 1.

Ainda com base no exemplo anterior, caso a velocidade média atual nos trechos da direção oposta (T3 e T4) seja inferior à velocidade média anterior, é necessário calcular a variação destas velocidades e adicionar este valor ao TTL. Esta ação deve ser executada pela OBU durante o cálculo do TTL. A OBU consulta na própria TCT local ambas as velocidades médias (atual e anterior) dos trechos paralelos e define o valor correto para o TTL do trecho percorrido. A Seção 3.4 apresenta maiores detalhes sobre o TTL, incluindo o tratamento de alterações da velocidade média no trecho.

### 3.3 Recepção da TCT pela Unidade de Acostamento

Após receber a TCT enviada pela OBU (linha 3 do Algoritmo 2), a RSU precisa comparar cada linha da TCT recebida com sua TCT local com base no valor do TTL e, se necessário, atualizar a informação sobre o trânsito na via. O Algoritmo 2 apresenta as rotinas executadas por uma RSU ao receber a TCT enviada pela OBU via comunicação V2I.

Como mencionado anteriormente na Seção 3.2, o TTL é baseado nas condições de trânsito dos trechos da direção oposta à direção do veículo que está emitindo a informação sobre o trecho. Deste modo, o sistema depende de que haja um fluxo de veículos em ambas as direções para geração das velocidades médias nos trechos e, conseqüentemente, registro destas informações na TCT. Só assim serão construídas as informações utilizadas para cálculo do TTL por meio da consulta (na TCT) do tempo necessário para percorrer os trechos paralelos aos trechos já percorridos por um determinado veículo que está emitindo a condição de trânsito de um trecho. Assim, o valor do TTL só poderá ser calculado após pelo menos uma interseção de duas OBUs em direções opostas com uma RSU em comum. Neste momento, ambas compartilharão suas TCTs, possibilitando o cálculo do TTL para pelo menos metade dos trechos.

As Figuras 3.2(a), 3.2(b), 3.2(c) e 3.2(d) ilustram de maneira simplificada o processo descrito no parágrafo anterior. Os campos da TCT são identificados e numerados de acordo com a ordem à qual as informações são armazenadas, uma vez que o espaço disponível na figura para esta informação é reduzido. Ainda devido à limitação de espaço, considera-se, para as TCTs utilizadas como exemplo na figura, que exista apenas um campo "Faixa com Obstáculo" e "COO". O campo relacionado à faixa com obstáculo (identificado como C6) é o único campo que, inicialmente, possui valor diferente de zero. Isto se justifica pois, no DOCS4V, zero é a identificação da faixa mais à esquerda da via monitorada, e usar este valor inicialmente poderia implicar em má interpretação por parte do algoritmo sobre a existência de obstáculo nesta faixa. Ainda sobre a TCT utilizada no exemplo, será definido para o campo C8 (Cronômetro) um valor aleatório. Por fim, o campo "Condição Anterior"(C3), após calculada a velocidade média no trecho, receberá o mesmo valor definido para o campo "Condição Atual"(C2), já que a informação sobre a primeira ainda não existe (considera-se que ainda não há fluxo de veículos na via apresentada no exemplo).

Entretanto, até que ocorra a interseção de duas OBUs com uma RSU em co-

---

**Algorithm 2** Algoritmo V2I executado por uma RSU.
 

---

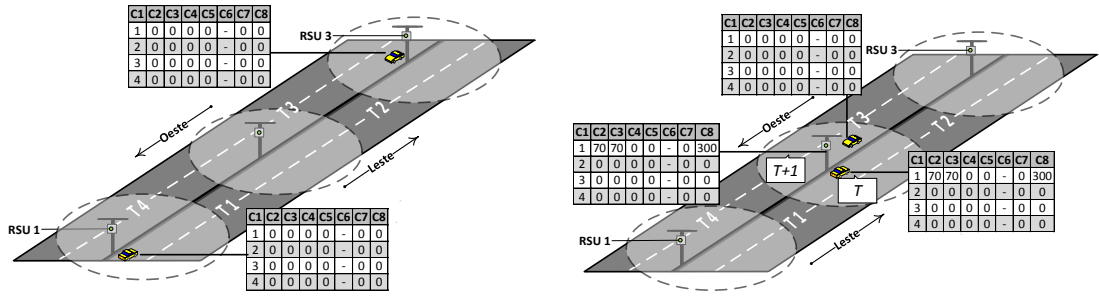
```

1:  $total_{trecho} \leftarrow ((num_{RSU} - 1) * num_{dir})$ ;
2: while true do
3:   Recebe a TCT transmitida pela OBU;
4:    $iteraLinhas_{TCT} \leftarrow 1$ ;
5:   while  $iteraLinhas_{TCT} < total_{trecho}$  do
6:     if  $condAnterior_{Local} = indefinido$  then
7:        $condAnterior_{Local} = condAtual_{Recebida}$ ;
8:     else
9:        $condAnterior_{Local} = condAtual_{Local}$ ;
10:    end if
11:    if  $TTL_{Local} = zero$  and  $COO_{Local} \leq COO_{Recebido}$  then
12:      if  $trecho_{id}$  foi percorrido pela OBU then
13:        if  $trecho_{id} = trechoAtualPercorrido_{id}$  then
14:           $TTLmax_{Local} \leftarrow TTL_{Recebido}$ ;
15:        else
16:           $TTLmax_{Local} \leftarrow TTLmax_{Recebido}$ ;
17:        end if
18:        Atualiza as demais entradas da TCT local com a TCT recebida;
19:      else
20:        if  $trecho_{id}$  é paralelo aos trechos percorridos pela OBU then
21:          Atualiza a TCT local com a TCT recebida;
22:        end if
23:      end if
24:    else
25:      if  $TTL_{Local} < TTL_{Recebido}$  or  $trecho_{id} = trechoAtualPercorrido_{id}$  then
26:        if  $trecho_{id} = trechoAtualPercorrido_{id}$  then
27:          Define a condição atual com o resultado da Média Harmônica;
28:          if  $TTL_{Recebido} < TTLmax_{Local}$  then
29:            Define o TTL e TTL máximo com o valor do TTL máximo local;
30:          else
31:            Define o TTL e TTL máximo com o valor do TTL recebido;
32:          end if
33:          Atualiza os demais campos do trecho com base na TCT recebida;
34:        else
35:          Atualiza as demais entradas da TCT local com base na TCT recebida;
36:        end if
37:      end if
38:    end if
39:     $iteraLinhas_{TCT} \leftarrow iteraLinhas_{TCT} + 1$ ;
40:  end while
41:  Transmite a TCT atualizada para a OBU;
42: end while

```

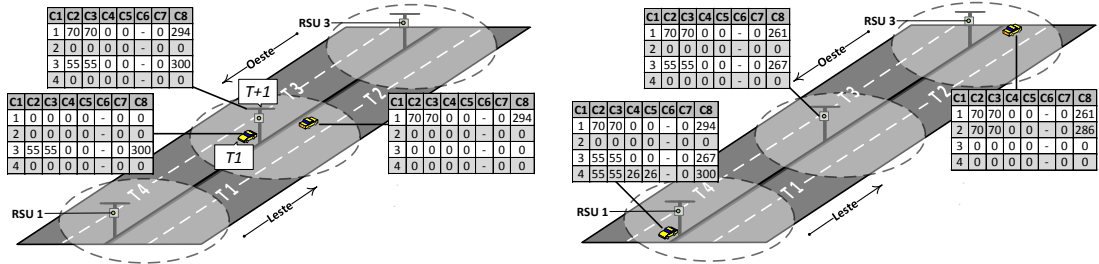
---

mum, toda informação gerada após finalizar a travessia de um trecho possui TTL com valor zero (já que ainda não pode ser calculado). Isto seria um problema caso esta particularidade não fosse tratada, uma vez que o algoritmo considera informações com o maior TTL como sendo as mais recentes. Por exemplo, se considerás-



(a) Veículos L (Leste) e O (Oeste) são os primeiros a entrar na via monitorada. Como este é o fluxo inicial de veículos na via, a TCT recebida inicialmente (transmitida pelas RSUs iniciais) está completamente zerada.

(b) O veículo L adquire maior velocidade, e alcança a RSU 2 antes do veículo O, concluindo o trecho 1 e enviando a TCT atualizada ( $T$ ). Como não há dados na TCT que indiquem a velocidade média nos trechos paralelos (T4), o TTL não pode ser calculado ( $TTL = 0$ ). Nestes casos, somente os trechos percorridos pelo veículo L (inclusive os paralelos) são atualizados na RSU 2 ( $T+1$ ). Como não concluiu o trecho, o veículo O ainda possui uma TCT zerada.



(c) O veículo O conclui o trecho 3, calcula a velocidade média no trecho e envia a TCT atualizada para a RSU 2 ( $T$ ). Como o TTL ainda não pode ser calculado, somente os trechos percorridos pelo veículo O (inclusive os paralelos) são atualizados na RSU 2 ( $T+1$ ). Isto proporciona a manutenção dos dados enviados anteriormente a TCT atualizada para a RSU 1 pelo veículo L. Em seguida, a RSU 2 enviará a TCT atualizada (com informações sobre os trechos 1 e 3) de volta ao veículo O.

(d) Após receber a TCT enviada pela RSU 2 (contendo dados sobre os trechos 1 e 3), o veículo O, ao concluir o trecho 4 e calcular a velocidade média, passa a possuir as informações necessárias para calcular (pelo menos em parte) o TTL da informação gerada antes de transmitir a TCT atualizada para a RSU 1.

**Figura 3.2.** Demonstração da primeira interseção entre duas OBU com uma RSU em comum e consequente geração da base de dados para cálculo do TTL.

semos atualizar as RSUs somente em situações onde o TTL já tenha sido definido com um valor válido, as condições de trânsito inferidas pelos veículos em momentos que antecedem este cenário seriam desprezadas, uma vez que o parâmetro de substituição de informações defasadas ( $TTL_{RSU} < TTL_{OBU}$ ) nunca seria atendido. O resultado seria a impossibilidade de realização do cálculo do valor do TTL (já que as TCTs das RSUs nunca seriam atualizadas com as velocidades médias nos trechos, tornando impossível o compartilhamento destas informações entre as OBU e

consequentemente, o cálculo do TTL).

Em casos onde o TTL de uma linha da TCT da RSU é zero e esta linha corresponda a um trecho percorrido pela OBU que está transmitindo a TCT, DOCS4V substitui as informações sobre o respectivo trecho pelas informações presentes na TCT da OBU, inclusive quando estas linhas correspondem a trechos paralelos aos trechos percorridos pela OBU (linhas 11 a 23 do Algoritmo 2). Em casos onde estas linhas são referentes a trechos localizados à frente da posição atual da OBU, seguramente estes mesmos trechos na TCT da OBU também possuirão TTL com valor zero (a RSU possui informações mais recentes sobre trechos localizados à frente da posição atual da OBU), não sendo necessário portanto substituir as informações sobre estes trechos na TCT da RSU. Além disso, a condição de atualizar somente as informações sobre trechos percorridos pela OBU (incluindo os paralelos) garante que informações recebidas pela RSU de uma OBU da direção oposta não sejam sobrescritas. A única exceção deste tipo de atualização ocorre nas linhas da TCT da RSU que armazenam informações sobre obstáculos e cujo COO seja mais recente (valor superior) que o COO da linha correspondente enviado pela OBU. Nestes casos, somente a linha da TCT da RSU que contém a informação sobre o obstáculo não será atualizada (a Seção 3.5.5 apresenta maiores detalhes sobre o funcionamento do COO).

Caso o valor do TTL já tenha sido definido, o algoritmo do DOCS4V executado nas RSUs comparará cada linha da TCT da RSU com as linhas correspondentes na TCT enviada pela OBU. As linhas da TCT da RSU, cujo TTL é menor que o TTL das linhas correspondentes na TCT da OBU, terão as informações sobre o respectivo trecho atualizadas (linhas 25 a 37 do Algoritmo 2). Uma vez que veículos podem apresentar diferentes velocidades de acordo com a condição de cada faixa, e como são vários veículos enviando informação simultaneamente, a RSU utiliza a média harmônica para calcular uma condição única para o trecho percorrido pelo veículo (linhas 26 e 27 do Algoritmo 2). O uso da média harmônica possibilita ainda minimizar o impacto de valores destoantes da amostra, como OBUs que apresentam velocidades médias irregulares comparadas à maioria das OBUs no trecho, como carros de polícia ou ambulâncias. A Equação 3.3 apresenta o cálculo da média harmônica do trecho.

$$MH_{trecho} = \frac{2}{\frac{1}{vel_{veiculo}} + \frac{1}{MH_{Ant_{trecho}}}}, \quad (3.3)$$

onde  $vel_{veiculo}$  é a velocidade de um determinado veículo e  $MH_{Ant_{trecho}}$  é a média harmônica anterior do trecho.

A Figura 3.3 compara duas TCTs com base na estrutura da via apresentada na Figura 3.1. Novamente, definiu-se um valor aleatório para o cronômetro. No instante  $t + 1$ , a TCT local da RSU 3 é atualizada em todos os trechos onde o TTL da TCT enviada pela OBU (que concluiu a travessia do trecho 2) é maior, ou mesmo onde o TTL é zero, quando considerados os trechos percorridos pela OBU (inclusive os paralelos). Pode-se observar que a informação acerca da presença de um obstáculo na faixa 0 do trecho 3 também fora atualizada, uma vez que, de acordo com a TCT enviada pela OBU, este obstáculo fora removido.

A divulgação feita pela RSU de sua TCT para as OBUs ocorre somente após o cálculo da média harmônica no trecho, possibilitando que as OBUs divulguem a condição global calculada no trecho atual aos trechos posteriores, e não somente a sua velocidade média no trecho. Antes da OBU sair de seu raio de cobertura, a RSU deve fornecer uma previsão acerca das condições dos trechos à frente para esta e todas as demais OBUs no raio de cobertura, em ambos os sentidos.

| TCT Local (instante $t$ ) |             |                |      |            |                 |     |            |
|---------------------------|-------------|----------------|------|------------|-----------------|-----|------------|
| Trecho                    | Cond. Atual | Cond. Anterior | TTL  | TTL Máximo | Faixa com Obst. | COO | Cronômetro |
| 1                         | 65 km/h     | 62 km/h        | 0 s  | 25 s       | -               | 0   | 275 s      |
| 2                         | 75 km/h     | 70 km/h        | 47 s | 48 s       | -               | 0   | 299 s      |
| 3                         | 80 km/h     | 83 km/h        | 1 s  | 26 s       | 0               | 1   | 299 s      |
| 4                         | 73 km/h     | 69 km/h        | 2 s  | 55 s       | -               | 0   | 299 s      |

+

| TCT Recebida (instante $t+1$ ) |             |                |      |            |                 |     |            |
|--------------------------------|-------------|----------------|------|------------|-----------------|-----|------------|
| Trecho                         | Cond. Atual | Cond. Anterior | TTL  | TTL Máximo | Faixa com Obst. | COO | Cronômetro |
| 1                              | 67 km/h     | 62 km/h        | 2 s  | 25 s       | -               | 0   | 277 s      |
| 2                              | 77 km/h     | 70 km/h        | 48 s | 48 s       | -               | 0   | 300 s      |
| 3                              | 82 km/h     | 80 km/h        | 3 s  | 26 s       | -               | 1   | 300 s      |
| 4                              | 75 km/h     | 73 km/h        | 5 s  | 55 s       | -               | 0   | 300 s      |

=

| TCT Local (instante $t+1$ ) |             |                |      |            |                 |     |            |
|-----------------------------|-------------|----------------|------|------------|-----------------|-----|------------|
| Trecho                      | Cond. Atual | Cond. Anterior | TTL  | TTL Máximo | Faixa com Obst. | COO | Cronômetro |
| 1                           | 67 km/h     | 62 km/h        | 2 s  | 25 s       | -               | 0   | 277 s      |
| 2                           | 77 km/h     | 70 km/h        | 48 s | 48 s       | -               | 0   | 300 s      |
| 3                           | 82 km/h     | 80 km/h        | 3 s  | 26 s       | -               | 1   | 300 s      |
| 4                           | 75 km/h     | 73 km/h        | 5 s  | 55 s       | -               | 0   | 300 s      |

Figura 3.3. Atualização da TCT local de uma RSU.

### 3.4 Mecanismo para Definição do Valor do TTL

Como apresentado na Seção 1.1, no DOCS4V não é possível garantir o sincronismo entre os relógios dos dispositivos (OBUs e RSUs), uma vez que o cenário é parcialmente desconectado. Cada dispositivo é responsável por decrementar o valor do TTL baseado em seu relógio local. Assim, a falta de sincronismo é minimizada, ficando restrita apenas ao tempo necessário para transmissão de uma TCT entre uma OBU e uma RSU. O valor do TTL depende das características da via, como extensão e limites de velocidade. Um valor de TTL muito pequeno pode não ser suficiente para atualizar as condições em trechos distantes, enquanto um valor de TTL muito grande pode fazer com que as RSUs tenham informação desatualizada sobre estes mesmos trechos.

O TTL é obtido considerando o tempo necessário para que uma OBU (da direção oposta à direção da OBU que está emitindo a informação sobre o trecho) transporte a informação até o último trecho de sua direção. O processo inicia no trecho paralelo ao trecho atualmente percorrido pela OBU que está emitindo a informação sobre o trecho. A Equação 3.4 define a relação entre os trechos percorridos pela OBU que está calculando o TTL para a informação gerada e os trechos paralelos da direção oposta que deverão ser percorridos pela OBU que irá transportar a respectiva informação.

$$trechoPara = ((num_{RSU} - 1) + (num_{RSU} - trechoPerc)), \quad (3.4)$$

onde  $num_{RSU}$  é o número de RSUs instaladas na via e  $trechoPerc$  é o identificador do trecho percorrido pela OBU (para o qual a OBU está emitindo a informação).

Por exemplo, analisando a Figura 3.1, as informações sobre o trecho 1 (T1) são importantes principalmente para as OBUs que ainda irão passar por este trecho (OBUs que estão na direção oposta ou que estão na mesma direção mas já passaram por este trecho não teriam interesse nesta informação). Assim, o TTL para o trecho 1 será o tempo necessário para percorrer o trecho 4, permitindo que a informação seja entregue válida para a RSU 1. Para melhor ilustrar este cenário, a Tabela 3.2 apresenta a definição do valor do TTL para os quatro trechos derivados das três RSUs apresentadas na Figura 3.1.

Como o DOCS4V não requer comunicação com a Internet, a consulta pelos valores históricos da velocidade média nos trechos paralelos aos trechos percorridos pela OBU que está emitindo a informação gerada no trecho torna-se impraticável.

**Tabela 3.2.** Política do mecanismo de definição do TTL.

| Trecho | Valor do TTL                                   |
|--------|--|
| 1      | Tempo necessário para percorrer o trecho 4     |
| 2      | Tempo necessário para percorrer os trechos 3-4 |
| 3      | Tempo necessário para percorrer os trechos 2   |
| 4      | Tempo necessário para percorrer os trechos 1-2 |

Como o algoritmo do DOCS4V precisa deste parâmetro de entrada para definir o valor do TTL, todo o cálculo é realizado dinamicamente, em tempo de execução, com base nas informações armazenadas na própria TCT do veículo emissor.

O valor do TTL é calculado com base no somatório do tempo para que uma OBU da direção oposta transporte a informação gerada no trecho em questão. Esta OBU deverá partir do trecho paralelo ao trecho atualmente percorrido pela OBU que está emitindo a informação, até chegar ao trecho paralelo ao trecho inicial da direção da OBU que está emitindo a informação (ou seja, até o último trecho da direção oposta). Desta forma, todos os veículos, ao entrar na via monitorada (ou seja, ao entrar no trecho inicial de sua direção), terão acesso às condições de trânsito de todos os trechos à frente. O TTL, dado em segundos, é calculado com base na velocidade média e extensão de cada um dos trechos pelo qual a OBU que transporta a informação irá passar, conforme demonstrado pela Equação 3.5.

$$tempoTravessia = \frac{extensao_{trecho} + 30}{condAtual_{trecho}}, \quad (3.5)$$

onde  $extensao_{trecho}$  é a extensão do trecho percorrido acrescido de 30 metros. O acréscimo de 30 metros foi baseado em Boukerche et al. (2008) e trata as possíveis discrepâncias na identificação do fim do trecho, realizada pela OBU com base no recebimento de *beacons*. Nos resultados apresentados no Capítulo 6, a discrepância encontrada não foi superior a este valor. Já  $condAtual_{trecho}$  (em  $m/s$ ) é a velocidade média do trecho em questão. Todas as informações estão na própria TCT local da OBU.

Conhecido o método para identificar os trechos paralelos, bem como calcular o tempo de travessia de cada trecho, a Equação 3.6 define como calcular o TTL.

$$TTL = \sum_{i=TP_A}^{TP_I} tempo_i \quad (3.6)$$

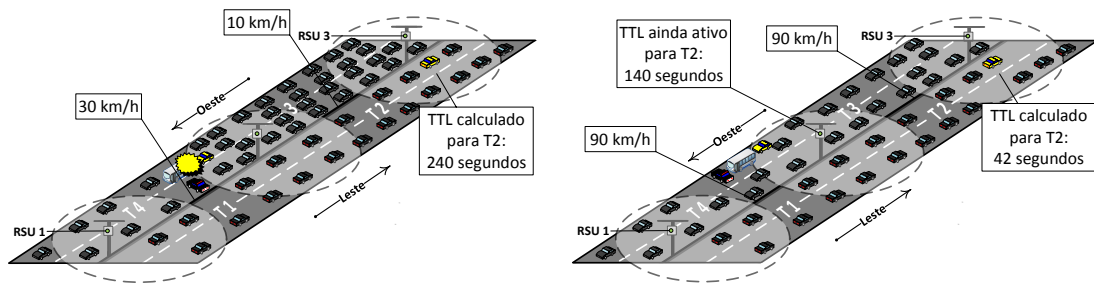
onde  $TP_A$  é o trecho paralelo ao trecho atualmente percorrido pela OBU que está emitindo a informação gerada no trecho,  $TP_I$  é o trecho paralelo ao trecho inicial da direção da OBU que está emitindo a informação, e  $tempo_i$  é o tempo para

percorrer cada um destes trechos. Tais informações estão na TCT da OBU que emite a informação.

### 3.4.1 Definição do Valor do TTL Máximo

Em momentos específicos, devido à ocorrência de eventos notáveis como acidentes, obras na via, trânsito de veículos lentos, entre outros, a velocidade média nos trechos de uma determinada direção poderá tornar-se extremamente baixa devido ao congestionamento gerado. Neste caso, o TTL de informações geradas por veículos da direção oposta a estes trechos deve ser grande o suficiente para que a informação transportada chegue ainda válida aos pontos de interesse, baseado nas baixas condições de velocidade. Entretanto, mesmo após o fim do congestionamento e consequente normalização da velocidade média nos respectivos trechos, o TTL para as informações geradas anteriormente ainda poderia permanecer ativo devido ao alto valor definido anteriormente. O valor atual calculado para o TTL, baseado nas condições de trânsito atuais dos trechos outrora impactados, provavelmente será menor que o TTL definido anteriormente, impedindo assim a atualização destas informações. Deste modo, corre-se o risco de não ser possível atualizar as condições sobre estes trechos nas RSUs que ainda mantêm estas informações. Isto é um problema, uma vez que informações obsoletas mantidas nas RSUs comprometem a confiabilidade e segurança na orientação ao condutor. As Figuras 3.4(a) e 3.4(b) apresentam um simples cenário ilustrativo desta situação.

Para prevenir que informações atualizadas sobre as condições de trânsito sejam perdidas devido à situação mencionada, DOCS4V registra na TCT os maiores valores já calculados para o TTL de informações geradas em cada trecho da via. Desta maneira, se o TTL calculado pela OBU para uma informação gerada em um trecho for inferior ao TTL máximo já registrado para informações no trecho em questão, a RSU, no processo de atualização de sua TCT local, substitui o valor calculado pela OBU pelo maior valor de TTL já registrado (linhas 28 e 29 do Algoritmo 2). Logo, a informação mais atual é preservada, chegando válida aos pontos de interesse e em condições de substituir as informações defasadas mantidas pelas RSUs. Caso o TTL calculado pela OBU seja maior que o valor máximo já registrado para informações no trecho, então a RSU mantém o valor calculado para o TTL e o define como TTL máximo (linhas 30 e 31 do Algoritmo 2). Apesar de garantir que somente as informações mais recentes serão mantidas pelas RSUs, independente de mudanças na velocidade média dos trechos, esta estratégia ainda pode provocar a distribuição de informações defasadas aos condutores. Em situações de longos congestionamentos



(a) O TTL necessário para que a informação gerada pela OBU no trecho 2 seja entregue ainda válida às RSUs 2 e 1 (considerando a baixa velocidade média atual nos trechos 3 e 4, de 10 e 30 km/h, respectivamente, provocadas por um acidente ocorrido no trecho 4) possui alto valor, estimado em 240 segundos, suficiente para que a informação seja transportada pelos trechos da direção oposta, impactados pelo congestionamento.

(b) Neste cenário, consideramos, para efeito de ilustração, que passado algum tempo após a geração da informação no trecho 2 anteriormente, a velocidade média nos trechos 3 e 4 já tenham sido normalizadas. Neste caso, o TTL calculado atualmente para a informação gerada pela OBU no trecho 2 não é grande o suficiente para substituir o TTL da informação gerada anteriormente (ainda ativo), ocasionando a manutenção de informações defasadas nas RSUs.

**Figura 3.4.** Manutenção de informações defasadas nas RSUs devido à impossibilidade de substituição com base no TTL.

ou até mesmo de via vazia, o sistema ainda informaria as condições de trânsito inferidas anteriormente como se ainda fossem válidas, devido ao TTL continuar ativo por um bom tempo antes de expirar. Para corrigir este problema, toda informação armazenada na TCT possui um cronômetro associado. O funcionamento do cronômetro é apresentado na Seção 3.4.2.

### 3.4.2 Cronômetro da Validade da Informação

O cronômetro controla o tempo de validade da informação, para que informações com TTL muito alto não se mantenham válidas por muito tempo sem receber atualização. Do mesmo modo que o TTL, o cronômetro é decrementado a cada segundo, exceto quando a informação emitida por um determinado veículo é carregada por um veículo da direção oposta. Neste caso, o cronômetro só começa a retroagir a partir do momento que a informação chega aos pontos de interesse. Caso alguma entrada da TCT local da RSU referente a um trecho não receba uma atualização durante, por exemplo, 5 minutos, o cronômetro zera e faz com que o valor do TTL associado à entrada também seja zerado, invalidando a informação.

Uma forma de calcular o cronômetro é definir o seu valor com base na extensão do trecho e no tempo necessário para percorrê-lo, tendo como referência a velocidade mínima permitida na via.

### 3.4.3 Cálculo da Variação da Velocidade no Trecho

No processo de definição do valor do TTL, é necessário calcular a variação das velocidades médias nos trechos paralelos quando a condição de trânsito atual do trecho paralelo é menor que a condição de trânsito anterior. Nestes casos, como houve uma redução na velocidade média do trecho, o tempo necessário para que uma OBU (da direção oposta à direção da OBU que está emitindo a informação) transporte a informação gerada pelo trecho paralelo poderá ser maior que o previsto, caso a velocidade no trecho continue a cair. Como há uma tendência de diminuição da velocidade no trecho paralelo, não é seguro definir um valor para o TTL baseado somente na condição de trânsito atual. Não é garantido que o valor definido para o TTL seja suficiente caso a velocidade no trecho paralelo continue a cair, podendo invalidar a informação transportada devido à expiração precoce do TTL. Neste caso, é agregado ao valor do TTL o percentual de variação entre a condição de trânsito atual e a condição de trânsito anterior do trecho paralelo. A Equação 3.7 apresenta o cálculo deste percentual:

$$variacao_{cond} = \left| \frac{cond_{atual} - cond_{anterior}}{cond_{anterior}} \right|, \quad (3.7)$$

onde  $cond_{atual}$  é a condição atual do trecho paralelo, e  $cond_{anterior}$  é a condição anterior. Se  $variacao_{cond} > 0$ , não há agregação do percentual da variação ao TTL.

## 3.5 Propagação de Quadros de Alerta de Obstáculos

Tal como o Waze, mas sem a necessidade de GPS e conexão à Internet, DOCS4V também permite a divulgação da existência de obstáculos nas faixas. Ao avistar um obstáculo na via, o condutor tem a possibilidade de colaborar com os demais sobre a existência deste incidente por meio da propagação de um alerta via *broadcast*. O objetivo é melhorar a segurança no trânsito, alertando o máximo de condutores em um curto espaço de tempo. Uma vez recebido o alerta, os condutores podem ajustar suas rotas e trocar de faixa antecipadamente, caso haja a incidência de obstáculos em sua faixa atual. Esta ação evita frenagens repentinas próximas aos obstáculos, reduzindo a possibilidade de congestionamentos. Uma vez que a faixa está livre, o respectivo campo é novamente alterado e disseminado nas TCTs.

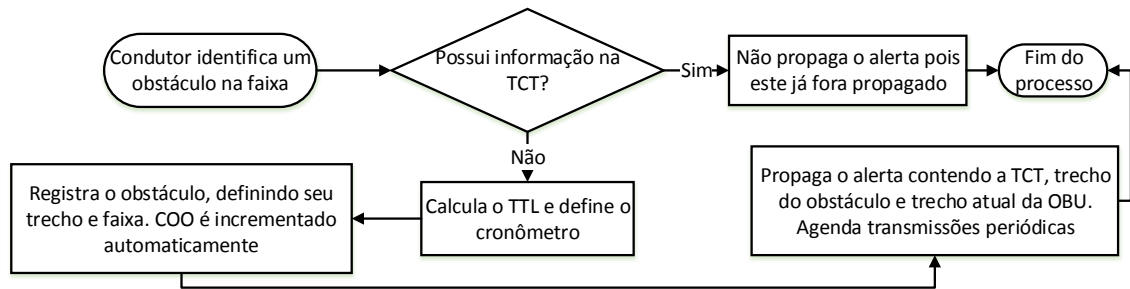
### 3.5.1 Registro do Obstáculo e Geração do Quadro de Alerta

O fluxograma da Figura 3.5 apresenta as ações que envolvem o registro do obstáculo e a geração do quadro de alerta de obstáculos. Se um condutor detecta um obstáculo inesperado no trecho (a informação não existe na TCT local), o mesmo tem a possibilidade de registrar na TCT a presença do obstáculo indicando a faixa em que este se encontra. O fato de a informação já existir na TCT indica que a mensagem já foi propagada anteriormente, não sendo necessária a transmissão de novos alertas. Esta e outras restrições de transmissão via *broadcast* tem por objetivo evitar a disseminação desnecessária de informações, amenizando os impactos do *broadcast storm* (TSENG ET AL., 2002). O registro do obstáculo na TCT resulta no incremento automático do COO. O COO é o campo da TCT responsável por garantir que, quando o valor do TTL é zero, não ocorra remoção de informação sobre obstáculos nas RSUs, via comunicação V2I, por OBUs retardatárias transportando informação desatualizada. Isto previne a perda de dados mais recentes propagados via *broadcast*.

Antes de realizar o registro do obstáculo detectado, o algoritmo do DOCS4V calcula o valor do TTL da informação (mesmo não tendo ainda concluído a travessia do trecho) como forma de garantir que a informação não expire caso o TTL atual do trecho onde encontra-se o obstáculo esteja no fim. Além disso, o cálculo se faz necessário pois, ao enviar o alerta via *broadcast*, OBUs localizadas em posições anteriores à posição da OBU que detectou o obstáculo, por terem entrado no trecho mais recentemente, possuirão um TTL mais atual, não sendo possível atualizar a informação sobre o obstáculo em suas TCTs. Após calcular o TTL, o algoritmo do DOCS4V verifica se o valor é maior ou menor que o TTL máximo, realizando os devidos tratamentos (apresentados em 3.4.1). Definido o TTL, a TCT da OBU é atualizada com as informações sobre o obstáculo. É atribuído o valor máximo ao cronômetro, garantindo que a informação não expire caso o valor atual esteja no fim.

### 3.5.2 Recepção e Propagação do Quadro de Alerta

Cada nó (RSU ou OBU) dentro do raio de cobertura do transmissor recebe o quadro e identifica que se trata de um alerta de obstáculo com base nas informações presentes no cabeçalho do quadro (que contém o tipo do quadro). O algoritmo do DOCS4V no receptor então desfragmentará o quadro, tendo acesso à área de *payload*. O *payload* conterá, além da TCT (enviada completa, possibilitando aos receptores localizados em trechos anteriores, a atualização das condições de trânsito, quando



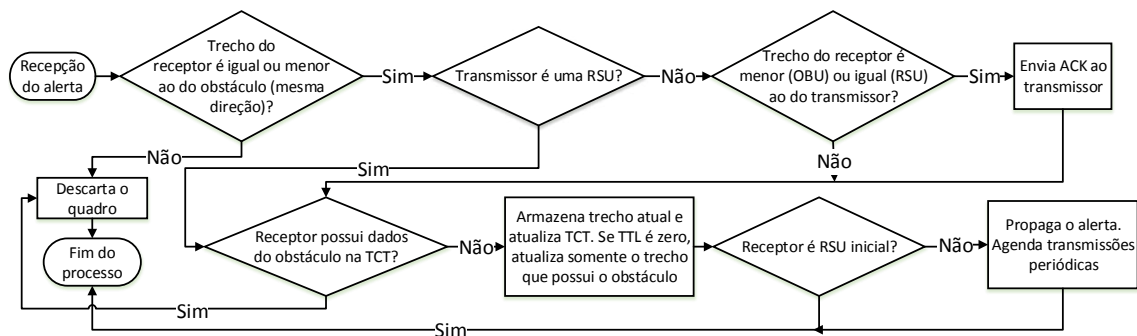
**Figura 3.5.** Representação das atividades de registro e geração do alerta.

possível) o trecho onde encontra-se o obstáculo, e o trecho atual do transmissor (OBU ou RSU).

O envio do trecho onde encontra-se o obstáculo é necessário para que somente os nós (OBUs e RSUs) localizados na mesma direção do obstáculo, e cuja posição está entre o trecho inicial de sua direção e o trecho do obstáculo, recebam e propaguem o alerta. Caso o nó receptor esteja localizado na direção oposta ao obstáculo, o mesmo deverá descartar o alerta. Esta restrição de recepção torna o processo de disseminação via *broadcast* finito, já que os nós (OBUs) localizados em posições anteriores ao trecho inicial da direção do obstáculo (ou seja, veículos que ainda não entraram na via monitorada) não receberão e, conseqüentemente, não propagarão o alerta. Isto acontece pois estes veículos possuem, de acordo com o DOCS4V, trecho indefinido (não atendendo desta forma aos requisitos de recepção citados anteriormente) e cujo valor só será válido após o recebimento da TCT pela RSU inicial. Nesta situação, caso o alerta de obstáculos esteja sendo propagado nesta região e alcance a OBU que está entrando na via, a RSU inicial desta direção seguramente já conterà a informação sobre o obstáculo, divulgado-a para a OBU via comunicação V2I e tornando descartável o alerta recebido de um obstáculo já conhecido. Já o trecho atual do transmissor é usado de forma que apenas receptores localizados em trechos anteriores (quando o receptor é uma OBU) ou trechos iguais (quando o receptor é uma RSU) emitam quadros de reconhecimento ACK (*Acknowledgement*), evitando a interrupção precoce da transmissão de alertas ainda não propagados para trechos anteriores ao obstáculo.

Se o valor do TTL das linhas da TCT do receptor é zero, somente a linha referente ao trecho que possui o obstáculo será atualizada. Atualizada a TCT local, o receptor agenda transmissões periódicas do alerta a cada segundo. RSUs localizadas na posição inicial de cada direção não precisam configurar a transmissão periódica, já que, neste momento, seguramente a informação já é acessível a todas as OBUs.

O fluxograma da Figura 3.6 descreve a sequência destes acontecimentos.



**Figura 3.6.** Representação das atividades de recepção e propagação do alerta.

### 3.5.3 Propagação Periódica do Quadro de Alerta

O alerta deverá ser propagado periodicamente até o recebimento de um quadro ACK válido. A propagação periódica do quadro de alerta de obstáculos não trata simplesmente da repetição da transmissão original. Antes de cada transmissão, o transmissor deverá atualizar a TCT contida no quadro, propagando o alerta de obstáculo junto às condições de trânsito mais recentes. OBUs que detectam um obstáculo inédito possuirão uma transmissão mais frequente, a cada 100 ms, de forma a disseminar o alerta às OBUs que dirigem-se mais rapidamente em encontro ao obstáculo. Demais nós transmitirão a cada segundo (de forma a gerar um menor volume de tráfego, já que o alerta fora disseminado na região crítica pela OBU que detectou o obstáculo).

Por se tratar de um elemento estratégico para a disseminação do alerta (já que mantêm a propagação de alertas ativa mesmo quando a densidade de OBUs no trecho não é suficiente), RSUs não cessam a transmissão periódica após o recebimento de quadros ACK. A transmissão de RSUs só é interrompida quando recebem uma TCT (via comunicação V2I) contendo informações sobre o obstáculo, de uma OBU da mesma direção do obstáculo, e cujo trecho em que estava ao receber o alerta seja duas vezes menor que o trecho da RSU em questão (valor de segurança, que confirma que a propagação do alerta pela via fora realizada com sucesso). O algoritmo do DOCS4V armazena o trecho atual do receptor sempre que o alerta recebido refere-se a um novo obstáculo. Esta informação deverá ser verificada no momento que o receptor do alerta ultrapassar a posição da RSU mais próxima e

transmitir sua TCT via comunicação V2I (o trecho em que a OBU estava quando recebeu o alerta é enviado junto à TCT no *payload* do quadro).

A transmissão periódica só será interrompida quando: (1) uma OBU conclui a travessia do trecho onde encontra-se o obstáculo, já que neste momento, a tendência é enviar alertas a OBUs que já passaram pelo obstáculo, devido à limitação do raio de cobertura; (2) uma OBU recebe um quadro ACK; (3) uma RSU recebe uma TCT enviada por uma OBU cujo trecho em que estava quando recebeu o alerta seja duas vezes menor que o trecho da RSU em questão; e, finalmente, (4) o transmissor do alerta (RSU ou OBU) recebe uma TCT, via comunicação V2I, informando da remoção do obstáculo que está sendo transmitido.

#### **3.5.4 Propagação da Informação sobre a Remoção de um Obstáculo**

Caso o obstáculo tenha sido removido, mas a TCT local da OBU mostre como se este ainda existisse, o condutor (ao concluir a travessia do trecho) tem a possibilidade de anular a informação sobre a presença do obstáculo na faixa do respectivo trecho. A atualização da TCT local ao final do trecho terá o valor do campo **Faixa com Obstáculo** anulado. Já o valor do COO associado ao campo **Faixa com Obstáculo** será mantido na TCT. Ou seja, o valor do COO para a referida **Faixa com Obstáculo** na TCT da OBU será igual ao correspondente na RSU (desta forma, o sistema garante que só ocorrerão remoções da informação sobre obstáculo nas RSUs por OBUs que efetivamente confirmaram a remoção de um obstáculo que existia anteriormente). A informação sobre a remoção de um obstáculo será disseminada gradativamente (via comunicação V2I) pela RSU a qual a OBU transmitirá a informação sobre a remoção.

#### **3.5.5 Detalhes do Modo de Operação do COO**

Para ilustrar a necessidade de uso do COO, pode-se considerar novamente o cenário apresentado na Figura 3.2(b). Caso o condutor do veículo que trafega pela direção leste detecte um obstáculo inédito no início do trecho 2 (trecho no qual acabou de entrar), o registro desta ocorrência na TCT resultaria no incremento automático do COO associado à faixa onde foi detectado o obstáculo. O valor deste campo na TCT (C7) seria modificado de zero para um. Imediatamente após a execução de todos os eventos que envolvem a detecção e registro do obstáculo na TCT, o quadro de alerta seria transmitido via *broadcast* e recebido pela RSU 2. Como o

veículo que trafega pela direção oeste não atende aos pré-requisitos para recepção deste quadro de alerta, o mesmo descartaria o quadro (caso este fosse recebido). Esta ação provocaria a manutenção das informações acerca do trecho 2 inalteradas (ou seja, sem o registro das informações sobre o obstáculo detectado, mantendo, conseqüentemente, o COO associado com valor zero).

Deste modo, ao concluir o trecho 3 e atualizar na RSU 2, via comunicação V2I, as informações sobre todos os trechos percorridos pelo mesmo (inclusive os paralelos), o veículo que trafega pela direção oeste substituiria a informação armazenada na TCT da RSU 2 acerca do obstáculo existente no trecho 2 (passando a impressão de que o obstáculo que antes existia naquele trecho fora removido). Entretanto, a comparação entre os valores do COO em momentos onde o TTL é zero (o que impossibilita seu uso como parâmetro de comparação) garante que a informação sobre o obstáculo presente no trecho 2 não seja substituída na TCT da RSU 2, uma vez que o COO presente na TCT desta RSU é mais recente (possui maior valor) que o COO correspondente na TCT transmitida pelo veículo da direção oeste.

## Capítulo 4

# Detalhes de Implementação do Sistema

A implementação do DOCS4V foi realizada com base na descrição do funcionamento do sistema, apresentado no Capítulo 3. Além da implementação das tarefas executadas por OBUs e RSUs, as próximas seções apresentam também a elaboração de mecanismos que possibilitam a geração de experimentos baseados em características de um cenário real de trânsito. Também são apresentadas as estratégias utilizadas para avaliação do sistema, bem como as definições dos parâmetros de configuração do IEEE 802.11p, tecnologia utilizada na transmissão de dados entre OBUs e RSUs.

### 4.1 Simulação de um GPS de Alta Precisão

Para avaliar a acurácia obtida pelo DOCS4V acerca das condições de trânsito nos trechos, um GPS que informa a posição quatro vezes por segundo foi simulado em cada veículo. Isto possibilita, a cada conclusão de trecho, a comparação das condições inferidas por ambos os métodos de monitoramento.

Assim como em outros sistemas existentes na literatura (GOOGLE, 2016), quatro intervalos de velocidade foram definidos para classificar as condições de trânsito emitidas por ambos os métodos: de 0 a 4 km/h, o sistema indica que o trânsito está **parado**. De 5 a 39 km/h, o trânsito é considerado **lento**; de 40 a 79 km/h, o sistema considera como **bom**, e a partir de 80 km/h, é considerado **rápido**. Considera-se uma boa precisão quando as condições de trânsito inferidas pelo DOCS4V e pelo GPS estão no mesmo intervalo.

Devido à possibilidade da existência de diferentes tipos de veículos na via (como carros e caminhões) apresentando diferentes velocidades, a condição de trâ-

sito gerada em cada trecho pelo GPS é calculada utilizando a mediana da velocidade de todos os veículos no trecho. A utilização da mediana se justifica por sua robustez a valores destoantes da amostra.

## 4.2 Inserção de Obstáculos na Via

Além das funções executadas por OBUs e RSUs, foram implementadas rotinas cujo objetivo é intensificar a validação do sistema por meio da criação de cenários próximos aos encontrados no ambiente real. Deste modo, foi adotada a possibilidade de criação de obstáculos na via, cujo objetivo é simular diversos tipos de ocorrências, como acidentes, veículos quebrados, paralisação devido à presença de manutenção em uma das faixas, entre outros (FERREIRA, 2011). É possível executar simulações com ou sem a presença de obstáculos. Caso se opte pela presença de obstáculos na via, deve ser definida a quantidade de obstáculos, sua localização inicial na faixa e a distância entre eles. Uma vez que a via simulada é bidirecional, a quantidade de obstáculos (bem como a localização inicial na faixa e distância entre cada obstáculo) será a mesma para ambos os sentidos de direção, permitindo desta maneira a homologação do sistema com ambas as direções sofrendo os impactos de variação de velocidade, decorrentes da inserção de obstáculos.

Obstáculos podem ser posicionados em locais fixos (na faixa mais à direita de ambas as direções, respeitando localização inicial e distância definida entre os obstáculos), ou de maneira aleatória, nas diversas faixas que compõem a via e sem posição geográfica pré-definida. Assim sendo, um obstáculo pode ter qualquer posição na via, partindo da posição inicial até a extensão máxima da via. É possível definir também se a simulação iniciará já com a presença de obstáculos na via, ou se estes serão inseridos dinamicamente no decorrer do trânsito de veículos, simulando o acontecimento de eventos notáveis, como acidentes. Nesta situação, deve-se definir a periodicidade com a qual cada obstáculo será inserido e removido da via. Nas simulações executadas nesta pesquisa, não há riscos de um obstáculo ser criado e removido antes que um veículo possa alcançá-lo e conseqüentemente ser impactado pelo mesmo, uma vez que só é considerada a criação de obstáculos após existirem veículos em todos os pontos da via.

## 4.3 Simulação das Unidades de Acostamento

De acordo com a implementação do modelo de mobilidade IDM e modelo de troca de faixa MOBIL, obstáculos também podem simular RSUs, devendo nestes casos ser posicionados fora das faixas. Para atender a este requisito, e também oferecer uma cobertura de sinal igualitária entre todas as OBU's na via (independente do sentido de direção), toda RSU criada é posicionada automaticamente no canteiro central que divide os dois sentidos de direção. Para fins de funcionamento do sistema, a criação das RSUs é feita automaticamente, cabendo ao usuário definir sua quantidade, localização inicial na via e distância uma da outra. Cabe ressaltar, conforme demonstrado pela Equação 3.1, que a quantidade de trechos da via depende diretamente da quantidade definida de RSUs.

## 4.4 Cálculo Dinâmico da Distância Mínima de Segurança

A distância mínima de segurança para o veículo imediatamente à frente é um dos parâmetros analisados pelo modelo de mobilidade IDM na realização do cálculo de aceleração de um determinado veículo. Já o modelo de troca de faixa MOBIL considera este parâmetro como a distância mínima que um determinado veículo deve manter para o veículo de trás e da frente no momento em que estiver tentando trocar de faixa. Entretanto, nos modelos originais, em ambas as circunstâncias o valor considerado é fixo e não corresponde à realidade.

Chen *et. al* (CHEN ET AL., 2013) apresenta um algoritmo que permite calcular dinamicamente a distância mínima de segurança entre veículos, baseado, entre outros parâmetros, na sua velocidade atual. Com o propósito de considerar nos cenários simulados o maior número possível de características de um ambiente real de trânsito, o modelo de mobilidade IDM e modelo de troca de faixa MOBIL foram alterados de forma a capacitá-los a calcular a distância mínima de segurança do veículo para o veículo imediatamente à frente de maneira dinâmica, baseado na velocidade atual de ambos os veículos. Desta maneira, por exemplo, veículos que estejam a 90 km/h deverão manter uma distância mínima de 52 metros para o veículo imediatamente à frente. De forma similar, veículos trafegando com velocidades inferiores a 10 km/h poderão manter uma distância menor para o veículo à frente, de até 2 metros. Em ambos os casos, as distâncias calculadas são suficientes para que haja uma desaceleração confortável e segura.

## 4.5 Densidade das Unidades de Bordo

No mundo real, nem todos os veículos em trânsito pela via possuirão uma OBU em seu interior, inviabilizando assim sua participação no sistema. Com base nesta realidade, é possível definir nas simulações o percentual de "veículos-inativos", veículos que não possuem uma OBU em seu interior e desta forma não participam colaborativamente do sistema a partir da troca de TCTs com outras OBUs e RSUs.

## 4.6 Tempo de Consolidação do Sistema

Conforme descrito na Seção 3.4, o valor do TTL é definido pelo veículo emissor da informação em tempo de execução, com base no tempo necessário para que um veículo da direção oposta transporte as informações geradas até último trecho de sua direção, partindo do trecho paralelo ao trecho atualmente percorrido pelo veículo emissor. O tempo necessário para que um veículo transporte a informação gerada por cada trecho que compõe o trajeto até o último trecho de sua direção é obtido com base na consulta das condições de trânsito dos respectivos trechos, realizada pelo veículo emissor da informação. Estes dados, ou seja, as condições de trânsito destes trechos, estão armazenadas na própria TCT local do veículo emissor.

Assim, com base nas premissas de que: (1) no início do monitoramento, as TCTs das OBUs e RSUs possuem entradas cujo valor do TTL é zero (como mencionado anteriormente na Seção 3.3, a definição de um valor para o TTL só será possível após a interseção de pelo menos dois veículos em direções opostas com uma RSU em comum, já que neste momento ambos compartilharão suas TCTs. Em momentos prévios, o veículo emissor da TCT não possui informações sobre as condições de trânsito da direção oposta, impossibilitando a definição de um valor para o TTL); (2) o TTL é calculado em tempo de execução (pelo veículo emissor da TCT, a cada travessia de trecho concluída); e (3) considerando que no DOCS4V os próprios veículos agem como enlaces de comunicação (permitindo que as informações sobre o trânsito sejam transportadas pelas OBUs para todas as RSUs da via), levará um certo tempo para que um veículo, ao entrar na via monitorada, receba da RSU inicial de sua direção as condições de trânsito dos trechos à frente com os respectivos TTLs já calculados.

Deste modo, considera-se que o sistema esteja consolidado quando a RSU inicial de cada direção possui informações válidas (com TTL já calculado) sobre todos os trechos pertencentes à sua direção. Neste momento, os condutores que

entram na via em ambas as direções já podem se orientar seguramente sobre as condições dos trechos à frente.

## 4.7 Mecanismo de Alerta de Obstáculos

Como mencionado anteriormente na Seção 3.5, do mesmo modo que aplicativos como o Waze (WAZE, 2016), mas sem a necessidade de recepção de GPS e conexão à Internet, DOCS4V permite ao condutor registrar a ocorrência e passar informações sobre obstáculos de qualquer natureza ocorridos na via, assinalando, na TCT, a faixa onde ocorreu o evento notável. Qualquer veículo que possuir uma OBU em seu interior e atender aos requisitos obrigatórios ao recebimento e propagação do alerta (apresentados na Seção 3.5) será alertado sobre a presença do obstáculo.

Com o intuito de simular o comportamento do condutor após o recebimento de um alerta de obstáculo, foram alteradas as condições que permitem a troca de faixa para veículos que irão entrar em um trecho que possui um obstáculo. O objetivo é viabilizar o planejamento eficiente da rota feita pelos condutores por faixas alternativas às faixas com obstáculos, o que diminui a incidência de engarrafamentos e variações bruscas de velocidade no trecho. Originalmente, o modelo de troca de faixa MOBIL analisa dois requisitos para verificar se o veículo poderá ou não trocar de faixa:

- Requisito principal: analisa a hipótese da troca de faixa se o veículo respeitar a distância mínima de segurança para o novo veículo da frente e de trás, além da desaceleração do novo veículo de trás ser maior que a desaceleração mínima.
- Requisito secundário: analisa se, atendido o item anterior, o veículo que deseja trocar de faixa terá uma aceleração maior do que tem atualmente em sua faixa atual.

O modelo de troca de faixa MOBIL foi alterado de forma que, na incidência de obstáculos no trecho que o veículo vai entrar, considere apenas o primeiro requisito, não sendo necessário analisar se o veículo terá vantagens em sua aceleração após a troca de faixa. Em nossa análise, consideramos que o veículo possuirá mais vantagem em sair de uma faixa que possua obstáculo, mesmo que não obtenha vantagens de aceleração em um primeiro momento após a troca de faixa. Deste modo, caso um veículo esteja na mesma faixa de um obstáculo, assim que conseguir mudar de faixa (com base nas alterações do modelo de troca de faixa MOBIL) não poderá voltar, até que ultrapasse a posição do obstáculo, minimizando a possibilidade de ficar preso

em frente ao mesmo. Tal medida é necessária para evitar que o veículo retorne para a mesma faixa que desviara antes do obstáculo, com base no segundo requisito do modelo de troca de faixa MOBIL.

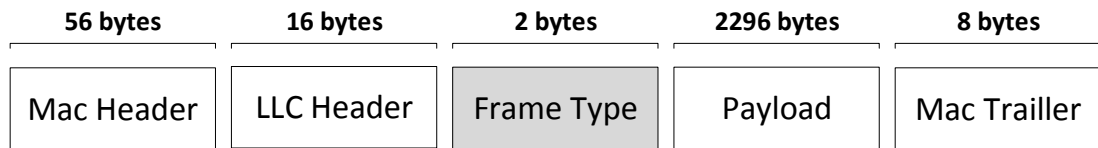
## 4.8 Parâmetros de Configuração do IEEE 802.11p

O IEEE 802.11p é utilizado como tecnologia de transmissão de dados entre OBUs e RSUs nas simulações executadas no NS-3. Deste modo, parâmetros que modelam o meio sem-fio, como perda de propagação devido à atenuação do sinal, atraso de propagação do canal, potência de transmissão, limiar de energia do sinal recebido para uma correta detecção na camada física e frequência de operação dos dispositivos foram configurados.

Dois tipos principais de comunicação são explorados no DOCS4V: comunicação V2I, que corresponde à comunicação *unicast* entre OBUs e RSUs na transmissão da TCT contendo as condições de trânsito ao final de cada trecho; e comunicação híbrida (V2I e V2V), que corresponde à comunicação *broadcast*, proveniente da propagação de alertas de obstáculos detectados na via. A estrutura do quadro foi alterada a fim de permitir a inserção do tipo de dado transmitido. Um campo "tipo" foi adicionado à estrutura do quadro, conforme apresenta a Figura 4.1, de forma a permitir o correto tratamento dos eventos de recepção. A Tabela 4.1 descreve os diferentes tipos de dados circulando pela rede.

**Tabela 4.1.** Diferentes tipos de quadros.

| ID | Transmissor | Receptor | Descrição   |
|----|-------------|----------|---|
| 0  | RSU         | OBU      | Transmissão periódica de <i>beacons</i> .                                       |
| 1  | OBU         | RSU      | Requisição da TCT inicial ao entrar na via monitorada.                          |
| 2  | RSU         | OBU      | Transmissão da TCT inicial ao requisitante.                                     |
| 3  | OBU         | RSU      | Transmissão da TCT ao concluir a travessia de um trecho.                        |
| 4  | RSU         | OBU      | Transmissão da TCT contendo as condições atualizadas sobre os trechos à frente. |
| 5  | RSU/OBU     | RSU/OBU  | Propagação do alerta de um obstáculo detectado na via.                          |
| 6  | RSU/OBU     | OBU      | Transmissão do reconhecimento após recebimento do alerta.                       |



**Figura 4.1.** Estrutura de um quadro personalizado do padrão IEEE 802.11p utilizado pelo DOCS4V.

### 4.8.1 Modelo da Camadas Física e Subcamada MAC

A camada física e subcamada MAC dos dispositivos de rede, bem como o modelo de propagação do canal, foram definidas de acordo com os objetos implementados no NS-3 baseados no modelo YANS (*Yet Another Network Simulator*) (LACAGE & HENDERSON, 2006). O canal é associado à camada PHY dos dispositivos de forma que todos compartilhem o mesmo canal.

### 4.8.2 Comunicação Fora do Contexto de um BSS

OBU e RSUs comunicam-se fora do contexto de um BSS, utilizando um BSSID coringa. Como aplicações de segurança em ambientes veiculares necessitam de troca de dados instantânea, parâmetros como sincronização, associação, desassociação e autenticação (típicos de uma rede baseada no modelo *Wi-Fi*) não são utilizados na abstração do 802.11p no NS-3, permitindo que dois dispositivos possam se comunicar imediatamente.

### 4.8.3 Definição da Potência de Transmissão

A extensão do padrão IEEE 802.11p para operação em múltiplos canais, incorporada através do padrão WAVE, define a utilização de sete diferentes canais de comunicação, compostos de seis canais de serviço (*Service Channels - SCH*) e um canal de controle (*Control Channel - CCH*). Para cada canal, diferentes frequências e potências de transmissão são definidas. O CCH é utilizado para aplicações críticas, possuindo a maior potência de transmissão, enquanto os demais SCH são utilizados por aplicações consideradas não-críticas, bem como aplicações críticas de curto-alcance, possuindo desta forma menor potência de transmissão (GRÄFLING ET AL., 2010). Dependendo do canal, a EIRP (*Effective Isotropic Radiated Power*) pode ser definida como 23, 33 ou 44.8 dBm. Para os cenários de simulação do DOCS4V, foi definida uma potência de transmissão de 23 dBm, sem ganho de an-

tena no transmissor ou receptor, simulando o pior caso de potência entre todos os canais.

#### 4.8.4 Configuração da Camada de Enlace

A configuração da camada de enlace conta com um algoritmo de controle de taxa que define transmissões constantes de dados e pacotes RTS, modulação baseada na multiplexação por divisão de frequência (*Orthogonal frequency-division multiplexing* - OFDM), taxa de 6 Mbps e largura de banda de 10 MHz. A atribuição destes parâmetros foi baseada nos valores típicos do padrão IEEE 802.11p.

#### 4.8.5 Sensibilidade do Receptor

O limiar de energia do sinal recebido para uma correta detecção na camada física foi definido de acordo com o trabalho realizado por Hernandez *et al.* (HERNANDEZ ET AL., 2015), o qual baseou-se nos valores de sensibilidade de produtos disponíveis no mercado e padrões internacionais do IEEE para redes veiculares para configurar o limiar de energia em -95 dBm.

#### 4.8.6 Frequência de Operação

Aplicações DSRC utilizam o espectro de frequência na faixa de 5,9 GHz, específico para uso de Sistemas Inteligentes de Transporte baseados no padrão IEEE 802.11p (JIANG & DELGROSSI, 2008). Assim sendo, a frequência de operação foi configurada em 5,9 GHz.

#### 4.8.7 Modelo de Perda de Propagação

Do mesmo modo que em (HERNANDEZ ET AL., 2015), os cenários projetados para serem simulados neste trabalho possuem características de um ambiente urbano. Desta maneira, foram utilizados os mesmos valores para os parâmetros de configuração do modelo de perda propagação Nakagami-m, que define o desvanecimento rápido no canal sem-fio, integrado ao 3-Log-Distance, que permite determinar os expoentes de atenuação por faixa de distância entre transmissor e receptor.

#### 4.8.8 Aplicação para Transmissão Periódica de *Beacons*

No DOCS4V, a movimentação de uma OBU é inferida utilizando a variação do RSSI. À medida que uma OBU se aproxima ou se afasta de uma RSU, o RSSI dos

quadros recebidos varia. Quando as informações da OBU são comparadas com as informações locais sobre o posicionamento das RSUs, é possível inferir a localização e a velocidade média da OBU. Como na abstração do IEEE 802.11p no NS-3 estações comunicam-se uma com as outras sem a necessidade de estabelecer um BSS, não há originalmente nas RSUs uma rotina de transmissão periódica de *beacons*. Assim sendo, do mesmo modo que no trabalho realizado por Martelli *et al.* (MARTELLI ET AL., 2012), foi desenvolvida para as RSUs uma aplicação para transmissão periódica de quadros simulando *beacons*. Os *beacons* são transmitidos periodicamente a cada 100 ms, intervalo padrão de transmissão para estes quadros. Entre as informações contidas nos *beacons*, somente o endereço MAC da RSU (BSSID) é utilizado pelo DOCS4V.

## Capítulo 5

# Considerações para os Cenários de Simulação

O cenário utilizado como referência para a realização das simulações envolvendo a avaliação do DOCS4V é a Marginal Tietê, localizada na cidade de São Paulo. A escolha deste cenário se justifica por se tratar de um ambiente com alta densidade de veículos, composição mista da frota (carros e caminhões) e altos índices de acidentes. Com 23 km de extensão, estima-se que 350 mil veículos circulem diariamente (CETSP, 2012) pela Marginal Tietê, o que oferece as condições necessárias para a homologação do DOCS4V.

### 5.1 Quantidade de Faixas

Um dos parâmetros de configuração para cada cenário simulado é a quantidade de faixas em cada direção. Cenários com duas faixas são considerados piores, uma vez que há apenas uma faixa como opção de desvio de obstáculos. Desta forma, é grande o número de trocas de faixas, resultando em constantes desacelerações e reacelerações. Nas simulações realizadas nesta pesquisa, utilizou-se a quantidade de duas e três faixas em cada sentido de direção.

### 5.2 Composição da Frota

Quanto à composição da frota, de acordo com (MARCELO CHAIM REZK, 2013), após a proibição da circulação de caminhões na Marginal Tietê e outras vias da cidade de São Paulo nos horários de pico (de 07:00 às 09:00 h e 17:00 às 20:00

h), a proporção, que antes era de 79% de veículos leves (carros e motos) e 21% de veículos pesados (caminhões) (CETSP, 2012), passou a ser de 83% de veículos leves e 17% de veículos pesados (caminhões e ônibus). Estes valores são baseados na média diária, na qual também inclui horários diferentes dos horários de pico, onde caminhões estão liberados para circular na Marginal.

Deste modo, nas simulações de avaliação do DOCS4V, definiu-se os mesmos valores para o percentual de cada tipo de veículo circulando na via: 83% de veículos leves (carros) e 17% de veículos pesados (caminhões).

### 5.3 Velocidade Máxima dos Veículos

Outro parâmetro considerado nas simulações foi a velocidade máxima permitida na via. Apesar de já estar em vigor desde julho de 2015 a lei que reduz a velocidade máxima permitida na via expressa da Marginal Tietê de 90 para 70 km/h (veículos leves) e de 70 para 60 km/h (veículos pesados) (TATTO, 2015), nesta pesquisa foram adotadas as velocidades máximas definidas anteriormente a este período, com 90 km/h para veículos leves e 70 km/h para veículos pesados.

Deste modo, a avaliação do DOCS4V é feita em condições mais realistas, uma vez que a probabilidade de se obter variações de velocidade (e conseqüentemente, dificultar a asserção das condições de trânsito já vez que o sistema trabalha com a velocidade média no trecho) é maior quando há uma discrepância elevada na velocidade máxima de ambos os veículos. Desta maneira, é possível que os veículos estejam nos diferentes intervalos de velocidade definidos para avaliação do sistema (conforme apresentado na Seção 4.1).

### 5.4 Comprimento da Via

Maior e mais bem avaliado sistema de navegação e trânsito baseado em uma comunidade (GOOGLE PLAY, 2016) (iTUNES, 2016) (WINDOWS STORE, 2016), o Waze fornece informações em tempo real sobre as condições da via. O aplicativo oferece a possibilidade de alteração da rota principal para rotas alternativas, através de um mecanismo que se baseia em notificações recebidas com relação às condições de trânsito. Tal alteração, porém, só é realizada com base na análise de um segmento específico da rota, uma vez que o algoritmo não calcula todas as possíveis rotas para grandes percursos. Neste caso, o replanejamento da rota com base nas condições

atuais de trânsito considera apenas segmentos em um raio de 10 km, sempre a partir da posição atual do veículo (WAZE, 2011).

O mecanismo de alteração automática da rota quando as condições do trânsito mudam, presente no sistema Waze, tem se mostrado eficiente ao trabalhar com distâncias inferiores a um raio de 10 km a partir da posição do veículo, oferecendo um maior nível de confiabilidade e acurácia na informação divulgada aos condutores. Deste modo, dos 23 km de extensão da Marginal Tietê, consideramos simular somente uma parte com 10 km de extensão, uma vez que considera-se que informações acerca das condições de trechos distantes (acima de 10 km a partir da posição do veículo) não são consideradas essenciais para que o planejamento de rotas alternativas seja feito em tempo hábil pelo condutor. Além disso, com base no tempo necessário para simular cenários baseados em uma via com 10 km de extensão (apresentados no Capítulo 6), a simulação de uma via com 23 km de extensão se mostra computacionalmente inviável, se consideradas as condições de avaliação presentes nos experimentos.

## 5.5 Quantidade de Unidades de Acostamento

Com base no comprimento definido para a via (10 km), adotou-se para cada cenário de simulação a criação de 19 RSUs, espaçadas entre si por uma distância de 500 metros. O objetivo é evitar a sobreposição de canais. Uma vez que as RSUs possuem cerca de 400 metros de diâmetro de cobertura, o espaçamento de 500 metros é suficiente para gerar zonas de sombra. A primeira RSU de cada direção está instalada 500 metros após a posição inicial de cada direção.

Com base no número de RSUs instaladas na via monitorada, conforme demonstrado na Equação 3.1, cada cenário possuirá 36 trechos.

## 5.6 Quantidade de Obstáculos

No modelo de mobilidade IDM, todos os veículos (carros e caminhões) buscam alcançar a velocidade máxima desejada quando se tem a faixa livre a frente. A principal finalidade de considerar a inserção de obstáculos na via é simular a ocorrência de eventos notáveis capazes de obstruir o trânsito, forçando o veículo a desacelerar ou trocar de faixa e, conseqüentemente, provocar variações de velocidade. Mesmo tendo os caminhões como veículos mais lentos (o que já torna o trânsito heterogêneo), o

objetivo é experimentar um cenário mais crítico, com obstáculos na velocidade zero, como acontece em vias como a Marginal Tietê.

Em (FERREIRA, 2011), o autor apresenta os resultados do acompanhamento de cinco dias das ocorrências geradas no trânsito da cidade de São Paulo. Segundo o autor, cada tipo de ocorrência (caminhões quebrados, acidentes com vítimas, alagamentos, entre outros) exerce diferentes impactos no percentual de lentidão e variação de velocidade. De todas as ocorrências observadas durante o período de monitoramento, paralizações devido à quebra de caminhões é a mais frequente, seguida por acidentes com vítimas. Visto que o trânsito de caminhões pela Marginal Tietê se tornou mais restrito após a proibição de circulação nos horários de pico, e pela dificuldade de mensurar a periodicidade da incidência dos demais eventos notáveis na Marginal, simulamos a criação de obstáculos com base nos dados mais recentes sobre o número de acidentes registrados na Marginal Tietê.

Somente em 2014, 558 acidentes foram registrados na Marginal Tietê, o que corresponde a uma taxa de aproximadamente 1.5 acidente por dia. Desta maneira, considerada a criação de obstáculos para um cenário de simulação, cada sentido de direção deve ter 1 obstáculo posicionado no meio da faixa mais a direita (trecho 9 na direção leste e 27 na direção oeste, considerando os 36 trechos totais) em determinado momento do trânsito, simulando desta forma a ocorrência de um acidente. Com relação ao momento de geração do acidente, uma vez que as simulações consideram um período de monitoramento proporcional a 24 horas, adotou-se que os acidentes em ambas as direções acontecerão aproximadamente na metade da simulação. Dado que um acidente típico obstrui a faixa por aproximadamente 45 minutos (SCHRAGE, 2006) (considerando períodos de monitoramento de 24 horas), e que o tempo de simulação proporcional adotado é de cerca de 2 horas (7.340 segundos), os acidentes simulados bloqueiam a faixa por 3 minutos.

## 5.7 Definição da Densidade de Unidades de Bordo

Conforme descrito anteriormente na Seção 4.5, no mundo real nem todos os veículos em trânsito pela via possuem uma OBU em seu interior. Deste modo, é necessário especificar o percentual de veículos que efetivamente participarão do processo de troca das TCTs no DOCS4V. Com este objetivo, utilizou-se como referência para este valor o total de usuários do aplicativo Waze em São Paulo proporcionalmente ao total de veículos em circulação na cidade. Com uma frota atual de mais de 7 milhões de veículos (DENATRAN, 2015) e 2,5 milhão de usuários do aplicativo

(MÍDIA, 2015), a densidade de usuários que utilizam o Waze para monitoramento das condições de trânsito e orientação de rotas pode ser estimada em aproximadamente 33% do total de veículos em circulação. Assim, nos cenários simulados, foram configurados somente 33% dos veículos colaborando com o sistema (com uma OBU em seu interior).

## 5.8 Tempo de Simulação

Os cenários utilizados nas simulações foram projetados de maneira a replicar um ambiente real de trânsito baseado em períodos de monitoramento 24 horas. Entretanto, devido ao tempo necessário para conclusão de cada cenário simulado (apresentado no Capítulo 6) torna-se inviável a realização de simulações considerando tempos de monitoramento reais.

Com base nesta premissa, e conforme já mencionando anteriormente na Seção 5.6, foi elaborado um tempo de simulação de aproximadamente 2 horas (7.340 segundos), proporcional a períodos de monitoramento 24 horas. Baseado nesta proporção, o tempo de permanência de um obstáculo na via passa a ser de 3 minutos (contados após o tempo de consolidação do DOCS4V, cujo valor foi obtido empiricamente), equivalente aos 45 minutos reais de obstrução. Desta forma, a avaliação do sistema é a mesma em ambos os casos, sendo feita com aproximadamente 3% do tempo total com obstáculos.

Cabe ressaltar que, apesar do tempo de avaliação da via sem obstáculos ser consideravelmente maior que o tempo de avaliação com obstáculos, o tempo de impacto na fluidez do trânsito devido a congestionamentos causados pela inserção de um obstáculo, observado empiricamente a partir das simulações de cada cenário, é de aproximadamente 53% do tempo total de monitoramento (mais detalhes serão apresentados no Capítulo 6).

## 5.9 Cenários de Simulação

A Tabela 5.1 apresenta os parâmetros fixos dos cenários utilizados nas simulações. Os cenários simulados são apresentados na Tabela 5.2.

Dos dois cenários apresentados, consideramos o cenário 1 como o cenário mais crítico para o DOCS4V no que se refere à taxa de asserção das condições de trânsito, uma vez que há apenas uma faixa como opção de desvio de obstáculos. Desta forma é grande o número de trocas de faixa, resultando em constantes desacelerações e

**Tabela 5.1.** Parâmetros dos experimentos.

| <b>Parâmetros</b>             | <b>Valor</b>   |
|-------------------------------|----------------|
| Tempo de simulação            | 7.340 segundos |
| Via bidirecional              | Sim            |
| Extensão da via               | 10.000 metros  |
| Largura da faixa              | 5 metros       |
| Número de RSUs                | 19             |
| Posição da primeira RSU       | 500 metros     |
| Distância entre as RSUs       | 500 metros     |
| Número de trechos             | 36             |
| Percentual de carros          | 83%            |
| Percentual de caminhões       | 17%            |
| Velocidade máxima (carros)    | 90 km/h        |
| Velocidade máxima (caminhões) | 70 km/h        |
| Densidade de OBU              | 33%            |
| Obstáculos na via             | Sim            |

**Tabela 5.2.** Cenários simulados.

| <b>Cenário</b> | <b>Número de Faixas</b> |
|----------------|-------------------------|
| 1              | 2                       |
| 2              | 3                       |

reacelerações. Essa dificuldade está no fato do DOCS4V trabalhar com a velocidade média no trecho. Essa variação é crítica neste cenário, devido a trocas constantes de faixa e um fluxo de veículos muito heterogêneo, com tempo de aceleração e frenagem diferentes, onde ambos resultam em grande variação dentro do trecho.

# Capítulo 6

## Resultados

Nesta seção, são apresentados os resultados dos experimentos utilizando o simulador NS-3. Os experimentos incluem propriedades que simulam um cenário próximo ao encontrado no mundo real, com grande volume de veículos, fluxo constante, composição mista de veículos (carros e caminhões) com diferentes velocidades, além da presença de obstáculos, que tornam a asserção das condições de trânsito mais difícil.

A avaliação do sistema se dá a partir do momento em que o DOCS4V está consolidado, ou seja, a partir do momento em que as primeiras RSUs de ambas as direções têm informações válidas sobre as condições de trânsito de todos os trechos de sua respectiva direção. Este modo de avaliação é o mais justo, uma vez que as informações válidas recebidas em momentos prévios são relativas a trechos localizados próximo à posição do veículo interessado na informação, tornando a informação mais precisa e conseqüentemente, favorecendo a asserção do sistema.

As simulações foram executadas em computadores Dell Optiplex 7010 com processador Intel Core i5-3470 de 3,20 GHz, com 4 GB de memória RAM. Cenários com duas faixas levaram cerca de 95 horas para serem executados, enquanto cenários com três faixas levaram aproximadamente 260 horas. Foram realizadas dez repetições da simulação projetada para cada cenário.

### 6.1 Tempo de Consolidação do Sistema

O tempo médio necessário para consolidar o sistema é apresentado pela Tabela 6.1. Conforme pode ser visto, o tempo para que o sistema esteja consolidado, ou seja, o tempo necessário para que as RSUs instaladas no início de cada direção tenham

informações válidas sobre as condições de trânsito de todos os trechos associados à mesma direção é de aproximadamente 1.414 segundos (pouco mais de 23 minutos) em cenários com duas faixas. Em cenários com três faixas este tempo é 4,9% inferior, levando cerca de 22 minutos para que o DOCS4V seja consolidado. Isto se deve ao fato deste cenário possuir três faixas, o que proporciona um aumento considerável do número de veículos na via e, conseqüentemente, uma maior taxa de colaboração com o sistema.

**Tabela 6.1.** Tempo de consolidação do DOCS4V para cada cenário.

| Cenário | Tempo      |
|---------|------------|
| 1       | 23min34seg |
| 2       | 22min25seg |

## 6.2 Total de Veículos na Via

A Tabela 6.2 apresenta a média do fluxo total de veículos que passaram pela via durante o período de monitoramento, além da média do volume total de veículos em circulação simultânea.

**Tabela 6.2.** Fluxo e volume de veículos na via.

| Cenário | Fluxo Total | Volume Total |
|---------|-------------|--------------|
| 1       | 9.161       | 756          |
| 2       | 13.870      | 1.137        |

Como esperado, com uma faixa a mais, o cenário 2 apresenta maior fluxo e maior volume de veículos durante o período proporcional a 24 horas de monitoramento, com um fluxo total superior a 13 mil veículos e mais de 1.130 veículos em circulação simultânea na via. A simulação de um cenário com três faixas e sem obstáculos também foi executada experimentalmente com o objetivo de se obter uma referência a ser utilizada como parâmetro de comparação. Nestes cenários, estes números são ainda maiores. Por exemplo, o fluxo total em cenários sem obstáculos ultrapassa a marca de 16 mil veículos. A explicação é que a presença de obstáculos restringe a quantidade de veículos em circulação. Devido ao congestionamento provocado, a injeção de novos veículos na via é prejudicada devido à dificuldade em atender ao requisito da distância mínima de segurança para o veículo imediatamente à frente.

Os valores apresentados pela Tabela 6.2 demonstram as condições realísticas obtidas por meio das simulações, possibilitando a avaliação da escalabilidade do

DOCS4V em ambientes simulando condições reais de trânsito, como alto número de veículos. É importante ressaltar que apenas 33% do número de veículos expostos possuem uma OBU.

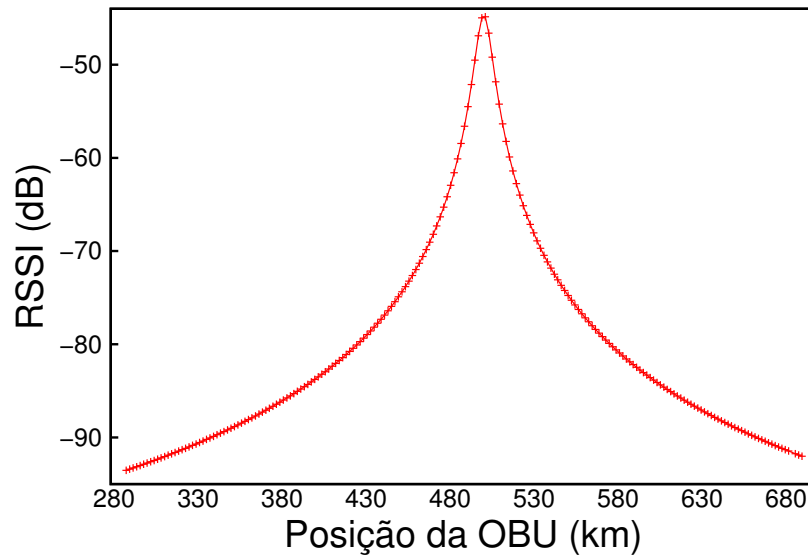
### 6.3 Localização dos Veículos Baseada no RSSI

A Figura 6.1 indica a movimentação de uma OBU (escolhida aleatoriamente) pela via com base no RSSI de *beacons* recebidos. Uma amostra de sua movimentação (pelo trecho 1) foi coletada com o objetivo de homologar a aplicação desenvolvida para transmissão de *beacons* nas RSUs, bem como demonstrar a eficácia na localização baseada no recebimento de *beacons*. Homologação semelhante foi realizada nos experimentos práticos executados em (RIBEIRO JÚNIOR ET AL., 2013). É possível observar pela Figura 6.1 o momento que a OBU recebe o primeiro *beacon* da RSU (na posição 289 metros da via simulada de 10 km), o momento que o DOCS4V identifica que a OBU se encontra mais próxima desta RSU (posição 505 metros) e o momento que a OBU recebe o último *beacon* da RSU em questão, saindo da sua área de cobertura (posição 691 metros).

DOCS4V se mostrou eficiente ao estimar a localização de uma OBU pela via, obtendo uma discrepância aproximada de cinco metros quando comparadas as posições da OBU e da RSU no momento da ultrapassagem. Este valor é muito inferior às discrepâncias consideradas aceitáveis em trabalhos encontrados na literatura (BOUKERCHE ET AL., 2008). Este resultado é considerado satisfatório, uma vez que sistemas de monitoramento de trânsito não requerem alto nível de acurácia na localização de veículos, onde erros são minimizados pela previsibilidade de movimento dos nós clientes. A taxa de variação média do RSSI para cada *beacon* recebido foi de 0,5 dBm, o que torna viável a acurácia na localização.

### 6.4 Tempo Disponível para Comunicação

O tempo de contato entre OBUs e RSUs será inversamente proporcional à velocidade da OBU na área de cobertura da RSU. Como RSUs possuem cerca de 200 metros de raio de cobertura, considerando a velocidade máxima definida para os experimentos (90 km/h), o tempo disponível para comunicação entre uma OBU e uma RSU será, no pior caso, de 8 segundos. Uma vez que o padrão IEEE 802.11p não requer o prévio estabelecimento de um BSS, desconsideram-se os tempos gastos durante as etapas de associação, desassociação e autenticação, possibilitando a comunicação



**Figura 6.1.** Movimentação de uma OBU pelo trecho 1 baseada no RSSI de *beacons* recebidos.

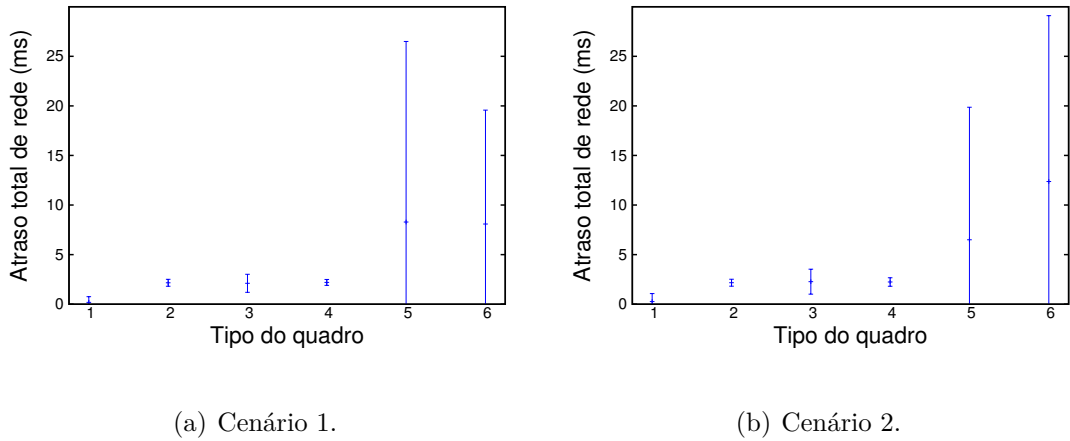
imediate entre os elementos. Deste modo, o tempo disponível para comunicação (8 segundos, no pior caso) se mostra suficiente para a troca de dados no DOCS4V (baseado nos resultados relacionados ao atraso total de rede para transmissão de cada quadro utilizado no DOCS4V, conforme apresentado na Seção 6.5).

Já nos experimentos utilizando o padrão IEEE 802.11b/g, apresentados em (RIBEIRO JÚNIOR ET AL., 2013), somente o tempo gasto na associação entre uma OBU e uma RSU foi de 9 segundos. Cabe ressaltar que este tempo foi obtido com o veículo trafegando a 40 km/h, com grande possibilidade de aumento no tempo se submetido às condições dos experimentos de avaliação do DOCS4V. De acordo com o próprio autor em (RIBEIRO JÚNIOR ET AL., 2013), quanto mais rápido o veículo estiver, mais tempo ele leva para estabelecer a conexão. Estando mais lento, os efeitos da atenuação são menores, permitindo que a conexão seja concluída mais rapidamente. Deste modo, a comunicação entre os elementos que compõem o sistema apresentado em (RIBEIRO JÚNIOR ET AL., 2013) pode ser ineficaz se o mesmo for avaliado sob as condições de um ambiente real de trânsito.

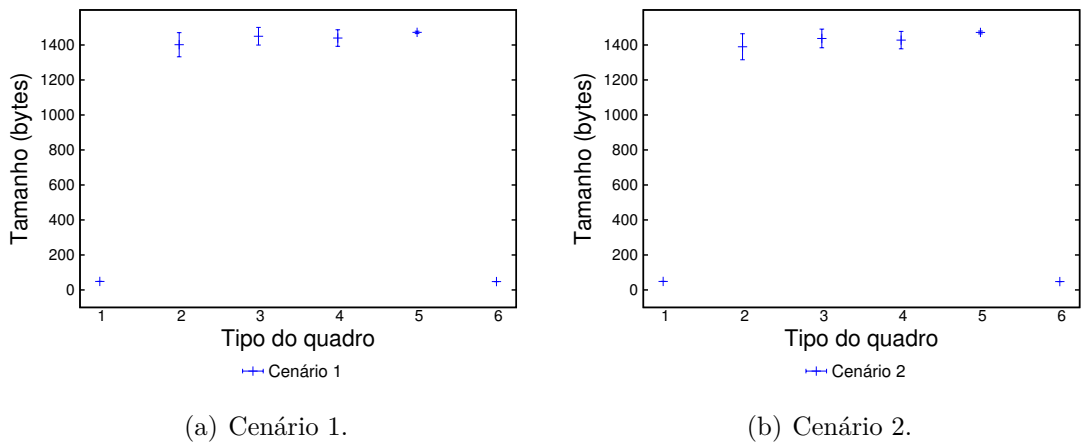
## 6.5 Atraso de Rede e Tamanho de Cada Tipo de Quadro

As Figuras 6.2(a) e 6.2(b) apresentam, para os cenários 1 e 2, o tempo médio de atraso para cada tipo de quadro utilizado pelo DOCS4V no monitoramento do

trânsito (*beacons* não são considerados). Já as Figuras 6.3(a) e 6.3(b) apresentam, também para ambos os cenários, o tamanho médio destes mesmos quadros. Considera-se o desvio padrão para todos os casos. Exceto a propagação do alerta de obstáculos via *broadcast* (a qual podem incluir múltiplos saltos pela rede), os demais quadros realizam comunicações diretas envolvendo apenas um transmissor e um receptor.



**Figura 6.2.** Atraso total de rede por quadro.



**Figura 6.3.** Tamanho por quadro.

O atraso total de rede é um componente fundamental para avaliar se uma rede veicular é capaz de entregar a informação aos nós clientes em tempo. De acordo com o consórcio VSC (*Vehicle Safety Communications*), o atraso total de rede para aplicações de segurança em redes veiculares (como uma aplicação para alerta de colisão) deve ser inferior a 100 ms por salto (VSC, 2005). Em (LEE ET AL., 2011), os autores apresentam um algoritmo para disseminação de alertas que utiliza um

número fixo de nós com privilégio de retransmissão, permitindo desta forma baixa sobrecarga da rede e atrasos inferiores a 100 ms. Assim como em (LEE ET AL., 2011), a média do atraso total de rede para transmissão de alertas no DOCS4V (inferior a 10 ms em média) é muito inferior ao recomendado para aplicações de segurança em redes veiculares e três ordens de grandeza menor que o resultado obtido nos experimentos realizados por Ribeiro Júnior *et al.* em (RIBEIRO JÚNIOR ET AL., 2013). Cabe ressaltar que, diferente de (LEE ET AL., 2011), no DOCS4V a disseminação de alertas não é completamente dependente da densidade de OBUs, já que as RSUs mantêm a propagação de alertas ativa mesmo quando não há OBUs em seu perímetro de transmissão.

Apesar da grande diferença de tamanho entre o quadro de requisição e os demais quadros, a diferença do atraso total de rede não é tão grande. Isto se deve ao fato da estrutura do quadro ser a mesma para todos os tipos de quadro, com a mesma quantidade de bits reservados para cada área. Apenas o *payload* é variável. O impacto causado pelo atraso de propagação pode ser considerado o mesmo para estes quadros (a tendência é que, para os quadros 1 a 4, a distância entre o transmissor e receptor seja quase sempre a mesma). Assim, a ligeira diferença no atraso total de rede se explica pela influência exercida pelo atraso de transmissão, o qual está diretamente relacionado com a área do *payload*. É importante ressaltar que o tamanho dos quadros do tipo 2 ao 5 (transmissão das TCTs e alertas de obstáculos) refere-se ao tamanho final para os cenários simulados, já que a carga de dados aumenta à medida que a TCT é preenchida.

## 6.6 Tempo para Disseminação de Alertas de Obstáculos

O tempo médio necessário para que a informação sobre um obstáculo chegue às RSUs iniciais das direções leste e oeste (demonstrando que a propagação do alerta fora realizada com sucesso pela via) é apresentado na Tabela 6.3. Os resultados são altamente satisfatórios, considerando a distância (definida nos experimentos) entre o obstáculo e a RSU inicial, de 4.5 km.

Como apenas 33% dos veículos possuem uma OBU em seu interior, há momentos em que a taxa de colaboração com o sistema pode ser prejudicada (no caso de não haver nenhuma OBU no perímetro de transmissão do emissor do alerta), implicando no aumento considerável do tempo de propagação. Nestas situações, é importante destacar o papel estratégico desempenhado pelas RSUs, que mantêm

**Tabela 6.3.** Tempo médio para disseminar alertas de inserção (I) e remoção (R) de obstáculos nas direções leste (L) e oeste (O), bem como o número médio de saltos (S) necessários.

| Cenário | I (L)  | S (L) | I (O)  | S (O) | R (L) | R (O) |
|---------|--------|-------|--------|-------|-------|-------|
| 1       | 219 ms | 31    | 187 ms | 30    | 256 s | 256 s |
| 2       | 170 ms | 30    | 191 ms | 30    | 217 s | 217 s |

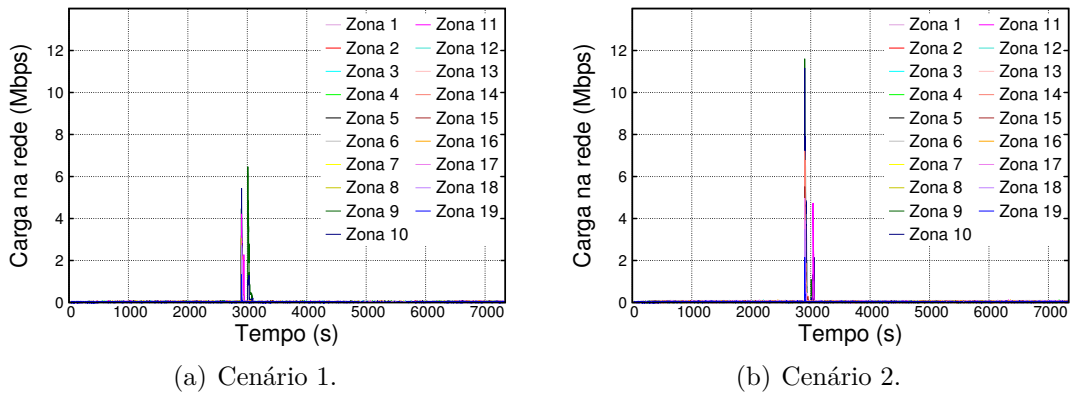
a propagação dos alertas ativa mesmo quando não há OBUs em seu perímetro de transmissão, auxiliando a disseminação da informação por toda a via.

Por se tratar de uma informação menos crítica, e com o objetivo de minimizar a sobrecarga de tráfego na rede causada por transmissões via *broadcast*, o alerta sobre a remoção de um obstáculo é transportado pelas OBUs da direção oposta à direção do obstáculo e atualizado nas TCTs das RSUs iniciais de cada direção via comunicação V2I. Como estas OBUs atuam como enlaces de comunicação, o tempo para propagação da informação de remoção do obstáculo corresponderá à velocidade média das OBUs que transportam esta informação.

## 6.7 Carga na Rede

As Figuras 6.4(a) e 6.4(b) apresentam a carga na rede gerada pelo DOCS4V nos cenários avaliados. O cálculo da carga é realizado a partir do somatório das cargas individuais de todos os nós da rede (OBUs e RSUs), possibilitando avaliar a taxa de ocupação do canal em cada zona de comunicação. Conceitua-se como zona de comunicação o perímetro compreendido pela área de cobertura de cada RSU instalada ao longo da via. A identificação de uma zona de comunicação está relacionada à identificação de uma RSU. Por exemplo, a zona de comunicação 1 (Figuras 6.4(a) e 6.4(b)) é o perímetro compreendido pela área de cobertura da primeira RSU (tendo a direção leste como referência).

Como é possível perceber, a carga aumenta devido à eventual disseminação de alertas via *broadcast*. Particularmente no cenário 2, o aumento é maior por consequência do maior número de nós colaborando com o sistema e a possibilidade de transmissões simultâneas devido ao problema do terminal escondido. Este resultado é considerado satisfatório, já que, graças às restrições impostas pelo DOCS4V no que se refere à recepção e propagação de alertas, o processo completo de disseminação via *broadcast* dura apenas alguns segundos em cada zona de comunicação. Esses resultados mostram que, na maior parte do tempo, DOCS4V não impacta no funcionamento de outras aplicações utilizadas simultaneamente.



**Figura 6.4.** Carga dos nós a cada segundo de simulação.

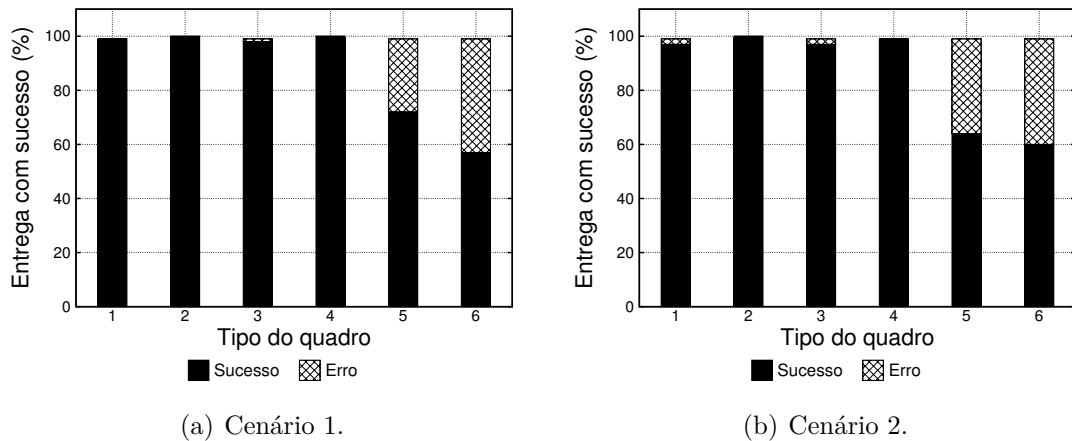
Cabe ressaltar que o baixo valor de carga na rede na maior parte do tempo de monitoramento não é imposto por limitações ou problemas na rede, e sim pela estratégia de comunicação adotada no DOCS4V. No DOCS4V, o monitoramento de trânsito é realizado com base em um pequeno volume de dados de controle, já que somente um quadro (TCT) é necessário para inferir as condições de trânsito. Além disso, as transmissões só são realizadas em momentos específicos (após a ultrapassagem de uma RSU, ou ao detectar um obstáculo na via), visando diminuir o tráfego na rede, comparado, por exemplo, a uma opção de divulgação regular via *broadcast*.

## 6.8 Estatísticas da Entrega de Quadros

As Figuras 6.5(a) e 6.5(b) apresentam as estatísticas da entrega para cada tipo de quadro utilizado pelo DOCS4V. Novamente, *beacons* não são considerados. Em transmissões baseadas na comunicação V2I (quadros 1 a 4), a probabilidade de entrega com sucesso do pacote é próxima de 100%. Nestes cenários, OBUs estão localizadas em posições geográficas próximas às RSUs. Nestas posições, o RSSI atinge seu nível máximo, proporcionando uma SINR (*Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio*) composta de uma quantidade de sinal válido muito superior à quantidade de interferência e ruído.

Já nos demais casos (propagação do alerta de obstáculos e transmissão de quadros ACK), a comunicação entre OBUs e entre OBUs e RSUs pode ser realizada com os nós localizados em posições geograficamente distantes. Este aspecto pode comprometer a probabilidade de sucesso na entrega do quadro devido ao baixo tempo de contato entre os nós, sujeitos à perda de conectividade. Além disso, o

grande aumento no número de transmissões devido à propagação periódica do alerta aumenta a presença de interferência e ruído (de tal forma que o quadro não possa ser decodificado). Como o sinal enfraquece com a distância, a relação de interferência e ruído passa a ser superior ao sinal de interesse. Para estes quadros (tipos 5 e 6) recebidos com erro, o valor médio da SINR foi 2,50 e 2,80 dB respectivamente, em ambos os cenários.



**Figura 6.5.** Estatísticas de entrega para cada tipo de quadro.

Apesar de menor, o índice de alertas de obstáculos entregues com sucesso é superior a 70%, no cenário 1, e próximo dos 65%, no cenário 2, resultados aceitáveis para comunicações de segurança, conforme definido em (CHEN ET AL., 2007). Quadros ACK são mais afetados pela maior relação de ruído e interferência (na maior parte, transmissores e receptores estarão em trechos distintos). Como são transmitidos concomitantemente às transmissões de alertas via *broadcast*, há um aumento na taxa de erros proveniente da adulteração dos dados, devido principalmente a interferência. Apesar disso, a taxa de entrega de aproximadamente 60% para quadros ACK, em ambos os cenários, também é considerada aceitável, uma vez que não compromete a disseminação dos alertas de obstáculos (conforme demonstrado pela Tabela 6.3), bem como a conclusão do processo de disseminação dos alertas via *broadcast*.

Cabe ressaltar a relação entre a densidade de OBUs e a probabilidade de colisões devido a interferências na rede. Em (ELBATT ET AL., 2006), experimentos realizados em um cenário baseado em comunicações DSRC utilizando o padrão IEEE 802.11a apontam que a probabilidade de sucesso na entrega do quadro para um ambiente com alta densidade de OBUs é de 93% considerando uma distância de 0-15 metros e 38% quando consideradas distâncias de 135-150 metros, valores

compatíveis com os resultados apresentados neste trabalho.

## 6.9 Impacto Causado por Obstáculos e Variações de Velocidade

Conforme já mencionado no Capítulo 5, o tempo de impacto no trânsito causado pela inserção de um obstáculo simulando um acidente em cada direção foi de aproximadamente 53% do tempo total de monitoramento. A partir do momento em que o acidente ocorre, instantaneamente os veículos posicionados atrás do local da ocorrência são impactados, alterando sua aceleração para  $0\text{ m/s}$  e provocando congestionamento imediato em todas as faixas da respectiva direção onde houve o incidente. A explicação para este quadro está na brusca redução de velocidade dos veículos que transitam pelas faixas obstruídas pelo obstáculo. Após a incidência de um acidente, veículos que trafegam pela faixa bloqueada tendem a tentar trocar de faixa, ocasionando sobrecarga do volume de veículos nas faixas vizinhas, e consequentemente, gerando um congestionamento que reflete por toda a extensão da via, inclusive nas faixas sem a incidência de obstáculos. O tempo total em que os veículos se mantêm parados (com velocidade igual a zero) em cada trecho aumenta proporcionalmente ao aumento da distância do respectivo trecho do local do acidente. Por exemplo, no trecho inicial de cada direção (4.5 km distante do local de incidência do acidente), veículos chegaram a ficar até 11 minutos parados em fila devido ao impacto do congestionamento.

Além do engarramento, a inserção e remoção de obstáculos em tempo de execução produzem também efeitos pontuais de variação da velocidade. Veículos com faixa livre tendem a alcançar a velocidade desejada de forma constante e rápida, enquanto que veículos que tentam utilizar as vias com obstáculos apresentam uma maior variação na velocidade com as constantes trocas de faixa. Estas variações de velocidade são fundamentais para avaliar a acurácia do DOCS4V em cenários críticos, uma vez que o sistema trabalha com a velocidade média no trecho. Nos cenários 1 e 2, por exemplo, as variações de velocidade (ou a diferença entre a maior e menor velocidade alcançada em um trecho) provocadas no intervalo de 10' a 40' é pequena, inferior a 10 km/h (neste momento, a via ainda estava livre de obstáculos). Já nos intervalos de 50' a 120' (após a ocorrência de obstáculos) as variações de velocidade são maiores e mais frequentes.

## 6.10 Taxa de Acerto das Condições de Trânsito no DOCS4V

Nas simulações de cenários sem obstáculos, independente da quantidade de faixas, os resultados obtidos pelo DOCS4V estiveram dentro do mesmo intervalo dos resultados obtidos pelo GPS em ambos os cenários, apresentando uma taxa de acerto de 100%. O mesmo acontece em cenários experimentais com 100% de carros ou 100% de caminhões, mesmo com obstáculos. Estes resultados foram omitidos, portanto, por serem tão concisos. Cenários sem obstáculos ou onde veículos apresentam características semelhantes (como velocidade de aceleração e desaceleração, tamanho, entre outros) resultam numa variação de velocidade menor e mais homogênea, possibilitando esta taxa alta de acerto uma vez que há pouca variação dentro do trecho.

Para os cenários 1 e 2, apresentados na Seção 5.9, são analisadas as seguintes taxas de acerto:

- Taxa de acerto global: avalia se as condições de trânsito com TTL válido presentes na TCT da OBU estão no mesmo intervalo dos resultados obtidos pelo GPS a cada troca de TCT efetuada entre uma OBU e uma RSU;
- Taxa de acerto por trecho: compara as condições de trânsito inferidas pelo DOCS4V para o trecho que a OBU acabou de percorrer com o resultado obtido pelo GPS para o respectivo trecho;
- Taxa de acerto para veículos-fantasma: veículos-fantasma são veículos especiais que recebem a TCT da RSU inicial assim que entram na via monitorada e não participam do processo de trocas de TCT nos momentos seguintes. Sua única função é comparar a condição em cada um dos trechos presentes na TCT que recebeu inicialmente, verificando se as condições recebidas correspondem à condição encontrada ao passar pelos respectivos trechos. São analisados somente os trechos da mesma direção do veículo, uma vez que são os únicos pelo qual o veículo irá passar e conseqüentemente, comparar as condições. Sua implementação se deu para traçar um paralelo com a estimativa do tempo de viagem dado pelo GPS até um determinado destino, a qual é baseada nas condições dos trechos naquele momento (que podem mudar no decorrer da viagem e conseqüentemente alterar sua duração).

A Tabela 6.4 apresenta os resultados obtidos pelo DOCS4V, comparado aos resultados obtidos pelo GPS, para cada um dos cenários:

**Tabela 6.4.** Acurácia média das condições de trânsito pelo DOCS4V.

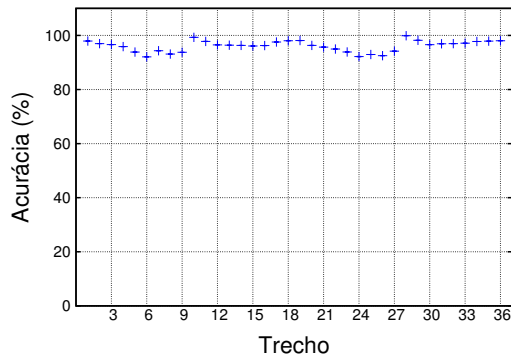
| Cenário | Global | Trecho Atualmente Percorrido | Veículos Fantasma |
|---------|--------|------------------------------|-------------------|
| 1       | 96.1%  | 97.9%                        | 90.7%             |
| 2       | 97.2%  | 98.3%                        | 93.7%             |

Como pode ser visto, os resultados obtidos pelo DOCS4V comparados aos resultados do GPS são altamente satisfatórios. Independente do número de faixas, presença de obstáculos na via e baixa densidade de OBUs, os resultados mostram-se sempre superiores a 90%, em todos os cenários avaliados. É possível observar também que, apesar da variação ser pequena, a acurácia aumenta à medida que se avalia informações próximas à posição da OBU (conforme demonstra a acurácia no trecho atualmente percorrido pela OBU). Outra observação importante é acerca da taxa de acerto dos veículos fantasma, sempre superiores a 90%, demonstrando que as informações recebidas por condutores ao entrar na via monitorada podem ser usadas de maneira confiável e segura como base de conhecimento para a tomada de decisões e planejamento da melhor rota.

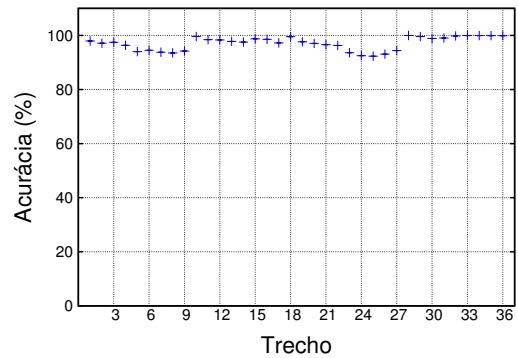
Uma vantagem do DOCS4V em relação ao sistema proposto por Ribeiro Júnior é que a homologação do DOCS4V se deu de maneira mais realista. Em (RIBEIRO JÚNIOR ET AL., 2013), os experimentos foram realizados em cenários cujo limite de velocidade permitido era 40 km/h. Deste modo, a comparação entre as condições de trânsito obtidas pelo sistema proposto com as condições obtidas pelo GPS só poderiam estar em um dos três intervalos de velocidade definido pelo autor. Apesar de regulamentada a redução de velocidade nas via expressas da Marginal Tietê desde julho de 2015, nesta dissertação ainda foram adotados os limites de velocidade anteriores (90 km/h para carros, e 70 km/h para caminhões) possibilitando que um veículo esteja em todos os intervalos de velocidade utilizados no DOCS4V (Seção 4.1).

Os resultados da taxa de acerto global, taxa de acerto no trecho e taxa de acerto para veículos-fantasma, para ambos os cenários e discriminado cada trecho da via, são apresentados nas Figuras 6.6(a), 6.6(b), 6.7(a), 6.7(b), 6.8(a) e 6.8(b). É possível observar claramente o impacto na precisão do DOCS4V nos trechos que antecedem ao trecho onde ocorreu a incidência do obstáculo (trechos 9 e 27 das direções leste e oeste, respectivamente). Uma vez que obstáculos simulando um acidente são produzidos nos respectivos trechos, imediatamente as velocidades dos veículos começam a variar devido às constantes frenagens, acelerações, reacelerações e trocas de faixas executadas pelos veículos que tentam escapar das aglomerações, o que prejudica a taxa de acerto do DOCS4V. Este impacto é menos sentido na avaliação da

condição de trânsito no trecho atualmente percorrido pelo veículo (Figuras 6.7(a) e 6.7(b)), devido à recenticidade da informação (o que aumenta a sua acurácia). Entretanto, considerando a taxa de acerto dos veículos-fantasma (Figuras 6.8(a) e 6.8(b)), é notório o impacto que a ocorrência de obstáculos causa na estimativa das condições de trânsito, uma vez que a informação sobre estas condições foram recebidas somente quando o veículo foi inserido na via.

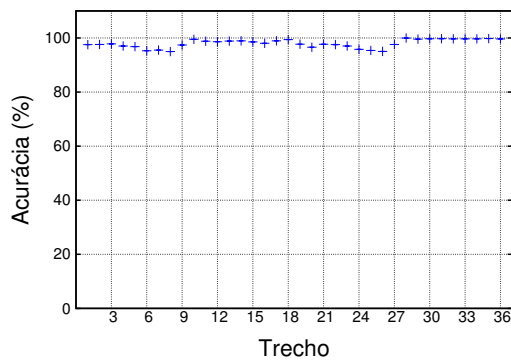


(a) Cenário 1.

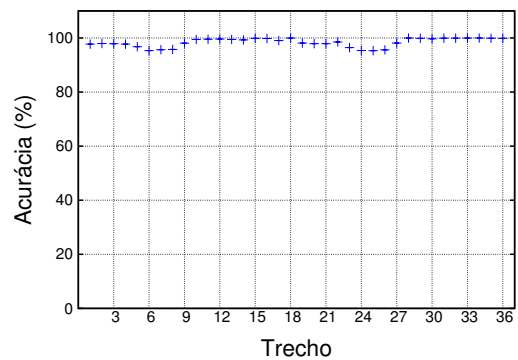


(b) Cenário 2.

**Figura 6.6.** Taxa de acerto "global" do DOCS4V discriminado por trecho.

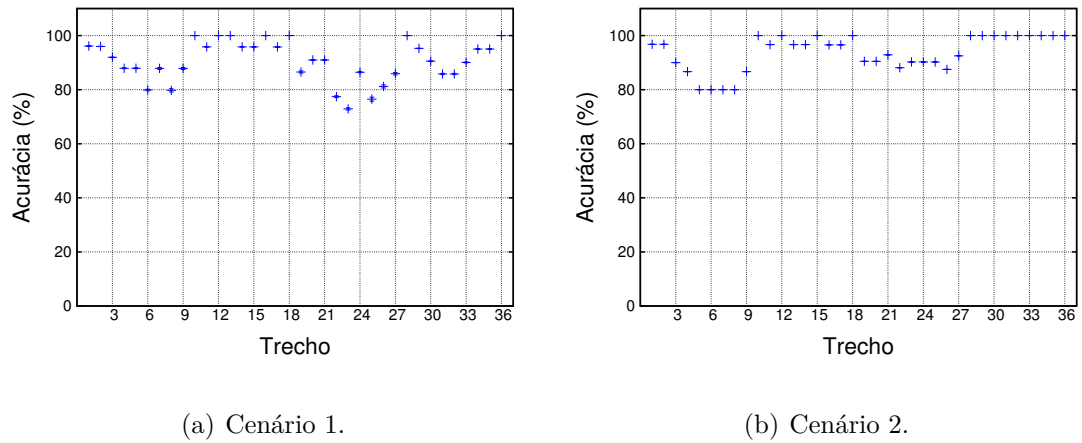


(a) Cenário 1.



(b) Cenário 2.

**Figura 6.7.** Taxa de acerto "trecho atual" do DOCS4V discriminado por trecho.



**Figura 6.8.** Taxa de acerto "veículos-fantasma" do DOCS4V discriminado por trecho.

# Capítulo 7

## Conclusões e Trabalhos Futuros

### 7.1 Conclusões

Esta dissertação apresentou o desenvolvimento e análise do DOCS4V, um sistema colaborativo para monitoramento e divulgação das condições de trânsito de forma descentralizada usando redes veiculares. Conforme mencionado no decorrer desta dissertação, DOCS4V é o resultado da evolução do sistema para monitoramento de trânsito proposto em (RIBEIRO JÚNIOR ET AL., 2013), cujos fundamentos e modo de operação foram descritos nos Capítulos 2 e 3.

DOCS4V utiliza um mecanismo de atribuição de tempos de vida (TTL) relativos para cada informação gerada, interpretados de acordo com o relógio local dos dispositivos, que minimiza a falta de sincronismo inerente à sistemas descentralizados. Detalhes sobre a política e cálculo do TTL foram descritos na Seção 3.4 do Capítulo 3. As Seções 3.2 e 3.3 do Capítulo 3 descreveram o monitoramento realizado pelo DOCS4V, onde as condições de trânsito de cada trecho da via são armazenadas em tabelas (TCTs) compartilhadas entre OBUs e RSUs por meio de comunicação V2I. Caso um obstáculo seja detectado pelo condutor, alertas são propagados via *broadcast* como forma de compartilhar a informação em tempo hábil aos demais interessados. A Seção 3.5 do Capítulo 3 apresentou os detalhes do mecanismo de propagação de alertas de obstáculos.

Para avaliar a performance e escalabilidade do DOCS4V em ambientes que simulam características reais de trânsito, foram realizados experimentos baseados nas características físicas e de trânsito da Marginal Tietê, em São Paulo. Simulações utilizando o padrão IEEE 802.11p foram realizadas tendo somente 33% dos veículos colaborando com o sistema. Cenários com alto número de veículos e composição mista da frota foram projetados com o objetivo de validar o funcionamento do

DOCS4V em ambientes com características próximas às encontradas no mundo real. Adicionalmente, a presença de obstáculos nas faixas simulando acidentes torna o ambiente mais dinâmico e dificulta a asserção das condições de trânsito pelo sistema, em virtude das constantes trocas de faixa e variações da velocidade média no trecho. Os Capítulos 4 e 7 apresentaram os detalhes de implementação e projeto dos cenários utilizados nos experimentos.

Independente dos cenários avaliados, a acurácia do sistema é altamente satisfatória, sempre superior a 90% quando comparada aos dados de um GPS, conforme dados apresentados na Seção 6.10 do Capítulo 6. Como apresentado na Seção 6.7 do Capítulo 6, o tráfego de rede gerado pelo sistema é, na maior parte do tempo, muito pequeno (inferior a 200 Kbps por zona de comunicação), uma vez que somente um quadro é necessário para divulgar informações sobre o deslocamento na via. A Seção 6.5 do Capítulo 6 apresentou os dados relacionados ao atraso total de rede para transmissão de alertas no DOCS4V, cujos resultados foram inferiores a 10 ms em média, muito abaixo do recomendado para aplicações críticas em redes veiculares.

## 7.2 **Trabalhos Futuros**

Como trabalhos futuros, pretende-se estender a capacidade de armazenamento de informações nas TCTs. Novos mecanismos deverão ser implementados de forma a auxiliar, através da divulgação de dados estratégicos, a atuação de veículos preferenciais (como carros de polícia e ambulâncias). Para estes casos, um dos objetivos é explorar a funcionalidade de operação em múltiplos canais, oferecida pela arquitetura WAVE (padrão IEEE 1609.4). Mais precisamente, pretende-se realizar a troca de dados utilizando, principalmente, o canal de controle (CCH), por este possuir maior potência de transmissão, o que permite maior alcance de transmissão.

Pretende-se ainda implementar um protótipo utilizando o padrão IEEE 802.11p e realizar experimentos práticos utilizando OBUs e RSUs em um cenário real. O objetivo é avaliar o funcionamento do cálculo do TTL, bem como a troca de dados utilizando o padrão IEEE 802.11p como tecnologia de transmissão. Pretende-se comparar os resultados obtidos nos experimentos práticos com os resultados apresentados no Capítulo 6. Para isso, deverão ser consideradas, obviamente, as diferentes densidades de OBUs presentes em ambos os experimentos.

## Referências Bibliográficas

- Abuelela, M.; Olariu, S. & Weigle, M. C. (2008). Notice: An Architecture for the Notification of Traffic Incidents. Em *Vehicular Technology Conference, 2008. VTC Spring 2008. IEEE*, pp. 3001 -- 3005. IEEE.
- Alves, R. d. S.; Campbell, I. d. V.; Couto, R. d. S.; Campista, M. E. M.; Moraes, I. M.; Rubinstein, M. G.; Costa, L. H. M.; Duarte, O. C. M. & Abdalla, M. (2009). Redes Veiculares: Principios, Aplicações e Desafios. *Minicursos do Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores, SBRC*.
- Anderson, R. L. (1970). Electromagnetic Loop Vehicle Detectors. *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, 19(1):23 -- 30.
- Arbabi, H. & Weigle, M. C. (2010). Highway Mobility and Vehicular Ad-Hoc Networks in NS-3. Em *Proceedings of the Winter Simulation Conference*, pp. 2991 -- 3003. Winter Simulation Conference.
- Bajaj, L.; Takai, M.; Ahuja, R.; Tang, K.; Bagrodia, R. & Gerla, M. (1999). Glosim: A Scalable Network Simulation Environment. *UCLA Computer Science Department Technical Report*, 990027(1999):213.
- Balasubramanian, A.; Mahajan, R. & Venkataramani, A. (2010). Augmenting Mobile 3G Using WiFi. Em *Proceedings of the 8th International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services*, pp. 209 -- 222. ACM.
- Barcelos, V. P.; Amarante, T. C.; Drury, C. D.; Correia, L. H. et al. (2014). Vehicle Monitoring System Using IEEE 802.11 p Devices. Em *Computer Networks and Distributed Systems (SBRC), 2014 Brazilian Symposium on*, pp. 460 -- 467. IEEE.
- Ben Abdesslem, F.; Phillips, A. & Henderson, T. (2009). Less is More: Energy-efficient Mobile Sensing with Senseless. Em *Proceedings of the 1st ACM Workshop on Networking, Systems, and Applications for Mobile Handhelds, MobiHeld '09*, pp. 61 -- 62, New York, NY, USA. ACM.

- Boukerche, A.; Oliveira, H. A.; Nakamura, E. F. & Loureiro, A. A. (2008). Vehicular Ad Hoc Networks: A New Challenge for Localization-Based Systems. *Computer Communications*, 31(12):2838 -- 2849.
- CETSP (2012). Volume Diário de Tráfego na Marginal Tietê. Disponível em <http://www.cetsp.com.br/noticias/2012/03/02/fiscalizacao-na-marginal-tiete-e-vias-do-minianel-comeca-dia-5-de-marco.aspx>. Acessado em janeiro de 2016.
- Chen, X.; Refai, H. H. & Ma, X. (2007). A quantitative approach to evaluate dsrc highway inter-vehicle safety communication. Em *Global Telecommunications Conference, 2007. GLOBECOM'07. IEEE*, pp. 151--155. IEEE.
- Chen, Y.-L.; Shen, K.-Y. & Wang, S.-C. (2013). Forward Collision Warning System Considering Both Time-to-Collision and Safety Braking Distance. Em *ICIEA '13*, pp. 972--977.
- Chen, Y.-L.; Wu, B.-F.; Huang, H.-Y. & Fan, C.-J. (2011). A Real-Time Vision System for Nighttime Vehicle Detection and Traffic Surveillance. *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, 58(5):2030--2044.
- DATASUS (2015). Estatísticas do Ministério da Saúde. Disponível em <http://www2.datasus.gov.br/DATASUS>. Acessado em janeiro de 2016.
- DENATRAN (2015). Frota de Veículos, por Tipo e com Placa, Segundo os Municípios da Federação. Disponível em <http://www.denatran.gov.br/frota2015.htm>. Acessado em janeiro de 2016.
- Dolui, K.; Mukherjee, S. & Datta, S. K. (2013). Traffic Status Monitoring Using Smart Devices. Em *Intelligent Interactive Systems and Assistive Technologies (IISAT), 2013 International Conference on*, pp. 8 -- 14. IEEE.
- Douangphachanh, V. & Oneyama, H. (2014). Exploring the Use of Smartphone Accelerometer and Gyroscope to Study on the Estimation of Road Surface Roughness Condition. Em *Informatics in Control, Automation and Robotics (ICINCO), 2014 11th International Conference on*, volume 1, pp. 783 -- 787. IEEE.
- ElBatt, T.; Goel, S. K.; Holland, G.; Krishnan, H. & Parikh, J. (2006). Cooperative Collision Warning Using Dedicated Short Range Wireless Communications. Em *Proceedings of the 3rd International Workshop on Vehicular Ad Hoc Networks*, pp. 1 -- 9. ACM.

- Feng, C.; Li, K.; Li, Z. & Jiang, S. (2014). A Compressed Sensing Approach to Monitor Urban Traffic with Data Aggregation in VANETs. Em *Parallel Processing Workshops (ICCPW), 2014 43rd International Conference on*, pp. 380 -- 386. IEEE.
- Ferreira, R. (2011). *Combinação de Técnicas da Inteligência Artificial para Previsão do Comportamento do Tráfego Veicular Urbano na Cidade de São Paulo. 2011. 107 p.* PhD thesis, Dissertação (Mestrado) – Universidade Nove de Julho, Engenharia de Produção, São Paulo.
- G1 (2014). SP Bate Recorde Histórico com 344 km de Vias Congestionadas. Disponível em <http://g1.globo.com/sao-paulo/noticia/2014/05/sp-bate-recorde-historico-com-344-km-de-vias-congestionadas-diz-cet.html>. Acessado em janeiro de 2016.
- Gangisetty, R. (1997). Advanced Traffic Management System on I-476 in Pennsylvania. Em *Intelligent Transportation System, 1997. ITSC'97., IEEE Conference on*, pp. 373 -- 378. IEEE.
- Google (2016). Maps for Mobile Help. Disponível em <https://support.google.com>. Acessado em janeiro de 2016.
- Google Play (2016). Top Aplicativos na Categoria Turismo e Local. Disponível em <https://play.google.com>. Acessado em janeiro de 2016.
- Gräfling, S.; Mahonen, P. & Riihijarvi, J. (2010). Performance Evaluation of IEEE 1609 WAVE and IEEE 802.11 p for Vehicular Communications. Em *Ubiquitous and Future Networks (ICUFN), 2010 Second International Conference on*, pp. 344 -- 348. IEEE.
- Gramaglia, M.; Calderon, M. & Bernardos, C. (2014). ABEONA Monitored Traffic: VANET-Assisted Cooperative Traffic Congestion Forecasting. *Vehicular Technology Magazine, IEEE*, 9(2):50 -- 57.
- Han, H.; Yu, J.; Zhu, H.; Chen, Y.; Yang, J.; Zhu, Y.; Xue, G. & Li, M. (2014). SenSpeed: Sensing Driving Conditions to Estimate Vehicle Speed in Urban Environments. Em *INFOCOM, 2014 Proceedings IEEE*, pp. 727 -- 735. IEEE.
- Härri, J.; Filali, F.; Bonnet, C. & Fiore, M. (2006). VanetMobiSim: Generating Realistic Mobility Patterns for VANETs. Em *Proceedings of the 3rd International Workshop on Vehicular Ad Hoc Networks*, pp. 96 -- 97. ACM.

- Hartenstein, H. & Laberteaux, K. (2010). *VANET: Vehicular Applications and Inter-Networking Technologies*, volume 1. Wiley Online Library.
- Henderson, T. R.; Roy, S.; Floyd, S. & Riley, G. F. (2006). NS-3 Project Goals. Em *Proceeding from the 2006 Workshop on NS-2: the IP Network Simulator*, p. 13. ACM.
- Hernandez, D. A.; Medeiros, D. S.; Campista, M. E. M. & Aloysio de Castro, P. P. (2015). Uma Avaliação da Influência da Velocidade dos Nós no Estabelecimento de Caminhos em Redes Ad Hoc Veiculares.
- Hubaux, J.-P.; Capkun, S. & Luo, J. (2004). The Security and Privacy of Smart Vehicles. *IEEE Security & Privacy*, (3):49 -- 55.
- iTunes (2016). Top Aplicativos na Categoria Navegação. Disponível em <https://itunes.apple.com>. Acessado em janeiro de 2016.
- Jiang, D. & Delgrossi, L. (2008). IEEE 802.11 p: Towards an International Standard for Wireless Access in Vehicular Environments. Em *Vehicular Technology Conference, 2008. VTC Spring 2008. IEEE*, pp. 2036 -- 2040. IEEE.
- Kiratiratanapruk, K. & Siddhichai, S. (2006). Vehicle Detection and Tracking for Traffic Monitoring System. Em *TENCON 2006. 2006 IEEE Region 10 Conference*, pp. 1 -- 4. IEEE.
- Krajzewicz, D.; Bonert, M. & Wagner, P. (2006). The Open Source Traffic Simulation Package SUMO. *RoboCup 2006 Infrastructure Simulation Competition*, 1:1 -- 5.
- Lacage, M. & Henderson, T. R. (2006). Yet Another Network Simulator. Em *Proceeding from the 2006 Workshop on NS-2: the IP Network Simulator*, p. 12. ACM.
- Lee, D.; Bai, S.; Kwak, D. & Jung, J. (2011). Enhanced selective forwarding scheme for alert message propagation in vehicular ad hoc networks. *International Journal of Automotive Technology*, 12(2):251--264.
- Leontiadis, I.; Marfia, G.; Mack, D.; Pau, G.; Mascolo, C. & Gerla, M. (2011). On the Effectiveness of an Opportunistic Traffic Management System for Vehicular Networks. *Intelligent Transportation Systems, IEEE Transactions on*, 12(4):1537 -- 1548.

- Marcelo Chaim Rezk (2013). Alterações no Perfil da Frota de Veículos de Carga Urbana em Decorrência das Restrições a Circulação de Caminhões na Cidade de São Paulo. Disponível em <http://www.sinaldetransito.com.br>. Acessado em janeiro de 2016.
- Martelli, F.; Renda, M. E.; Resta, G. & Santi, P. (2012). A Measurement-Based Study of Beaconing Performance in IEEE 802.11 p Vehicular Networks. Em *INFOCOM, 2012 Proceedings IEEE*, pp. 1503 -- 1511. IEEE.
- Martin Treiber (2010a). Longitudinal Traffic Model: The IDM. Disponível em <http://www.mtreiber.de/MicroApplet/IDM.html>. Acessado em janeiro de 2016.
- Martin Treiber (2010b). The Lane-change Model MOBIL. Disponível em <http://www.mtreiber.de/MicroApplet/MOBIL.html>. Acessado em janeiro de 2016.
- Mídia, I. (2015). Aberto para Publicidade desde 2013, Waze Atrai Atenção do Mundo Automotivo. Disponível em <http://portalimprensa.com.br/>. Acessado em janeiro de 2016.
- Mohamed, A.; Fouad, M. M. M.; Elhariri, E.; El-Bendary, N.; Zawbaa, H. M.; Tahoun, M. & Hassanien, A. E. (2015). RoadMonitor: An Intelligent Road Surface Condition Monitoring System. Em *Intelligent Systems' 2014*, pp. 377 -- 387. Springer.
- Oh, C.; Park, S. & Ritchie, S. G. (2006). A Method for Identifying Rear-End Collision Risks Using Inductive Loop Detectors. *Accident Analysis & Prevention*, 38(2):295 -- 301.
- Oh, S.; Ritchie, S. & Oh, C. (2002). Real-Time Traffic Measurement from Single Loop Inductive Signatures. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (1804):98 -- 106.
- Picone, M.; Amoretti, M. & Zanichelli, F. (2012). A Decentralized Smartphone Based Traffic Information System. Em *Intelligent Vehicles Symposium (IV), 2012 IEEE*, pp. 523 -- 528. IEEE.
- Raya, M.; Papadimitratos, P. & Hubaux, J.-P. (2006). Securing Vehicular Communications. *IEEE Wireless Communications Magazine, Special Issue on Inter-Vehicular Communications*, 13(LCA-ARTICLE-2006-015):8 -- 15.

- Resch, B. (2013). People as Sensors and Collective Sensing-Contextual Observations Complementing Geo-Sensor Network Measurements. Em *Progress in Location-Based Services*, pp. 391 -- 406. Springer.
- Ribeiro Júnior, J.; Costa, L.; Campista, M.; Moraes, I.; Alves, R.; Couto, R.; Silva, F.; Valverde, L.; Lanza, M.; Camilo, B. et al. (2011). GT-ReBUS: Redes de Acesso em Ônibus Universitários.
- Ribeiro Júnior, J. G.; Campista, M. M. & Costa, L. (2014). COTraMS: A Collaborative and Opportunistic Traffic Monitoring System. *Intelligent Transportation Systems, IEEE Transactions on*, 15(3):949 -- 958.
- Ribeiro Júnior, J. G.; Quintanilha, I. M.; Campista, M. E. M. & Costa, L. H. M. (2013). Sistema para Monitoramento Descentralizado de Trânsito Baseado em Redes Veiculares Infraestruturadas. *SBRC 2013 (Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos)*.
- Robert, K. (2009). Video-Based Traffic Monitoring at Day and Night Vehicle Features Detection Tracking. Em *Intelligent Transportation Systems, 2009. ITSC '09. 12th International IEEE Conference on*, pp. 1-6.
- Robinson, S. & Polak, J. (2005). Modeling Urban Link Travel Time With Inductive Loop Detector Data by Using the k-NN Method. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (1935):47 -- 56.
- Sanguesa, J. A.; Fogue, M.; Garrido, P.; Martinez, F. J.; Cano, J.-C.; Calafate, C. T. & Manzoni, P. (2013). An Infrastructureless Approach to Estimate Vehicular Density in Urban Environments. *Sensors*, 13(2):2399 -- 2418.
- Schrage, A. (2006). Traffic Congestion and Accidents. *Regensburger Diskussionsbeiträge zur Wirtschaftswissenschaft*, 419.
- Schrank, D.; Eisele, B.; Lomax, T. & Bak, J. (2015). 2015 Urban Mobility Scorecard. Technical report, Texas Transportation Institute.
- Statistic Brain (2015). Cell Phone Tower Statistics. Disponível em <http://www.statisticbrain.com/cell-phone-tower-statistics/>. Acessado em fevereiro de 2016.
- Tatto, J. (2015). Redução de Velocidades nas Marginais. Technical report, Prefeitura de São Paulo, SP, Brasil.

- Tsao, S.-L. & Cheng, C.-M. (2011). Design and Evaluation of a Two-Tier Peer-to-Peer Traffic Information System. *Communications Magazine, IEEE*, 49(5):165 -- 172.
- Tseng, Y.-C.; Ni, S.-Y.; Chen, Y.-S. & Sheu, J.-P. (2002). The Broadcast Storm Problem in a Mobile Ad Hoc Network. *Wireless Networks*, 8(2-3):153 -- 167.
- Valerio, D.; D'Alconzo, A.; Ricciato, F. & Wiedermann, W. (2009). Exploiting Cellular Networks for Road Traffic Estimation: A Survey and a Research Roadmap. Em *Vehicular Technology Conference, 2009. VTC Spring 2009. IEEE 69th*, pp. 1-5.
- Vittorio, A.; Rosolino, V.; Teresa, I.; Vittoria, C. M.; Vincenzo, P. G. et al. (2014). Automated Sensing System for Monitoring of Road Surface Quality by Mobile Devices. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 111:242 -- 251.
- VSC (2005). Vehicle Safety Communications Project Task 3 Final Report. Technical report, U.S. Department of Transportation.
- Waze (2011). Routing server. Disponível em <https://wiki.waze.com>. Acessado em janeiro de 2016.
- Waze (2016). Waze Help Center. Disponível em <https://support.google.com/waze>. Acessado em janeiro de 2016.
- Wedel, J. W.; Schunemann, B. & Radusch, I. (2009). V2X-Based Traffic Congestion Recognition and Avoidance. Em *Pervasive Systems, Algorithms, and Networks (ISPAN), 2009 10th International Symposium on*, pp. 637 -- 641. IEEE.
- Weingärtner, E.; Vom Lehn, H. & Wehrle, K. (2009). A Performance Comparison of Recent Network Simulators. Em *Communications, 2009. ICC'09. IEEE International Conference on*, pp. 1 -- 5. IEEE.
- WHO (2015). Road Traffic Injuries. Disponível em <http://who.int/mediacentre/factsheets/fs358>. Acessado em janeiro de 2016.
- Windows Store (2016). Top Aplicativos na Categoria Navegação. Disponível em <http://www.windowsphone.com>. Acessado em janeiro de 2016.
- Xu, H. & Barth, M. (2006). An Adaptive Dissemination Mechanism for Inter-Vehicle Communication-Based Decentralized Traffic Information Systems. Em *Intelligent Transportation Systems Conference, 2006. ITSC'06. IEEE*, pp. 1207 -- 1213. IEEE.

Zhou, J.; Gao, D. & Zhang, D. (2007). Moving Vehicle Detection for Automatic Traffic Monitoring. *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, 56(1):51–59.

# Apêndice A

## Publicações

A seguir estão relacionados os trabalhos (realizados a partir desta dissertação) submetidos em periódicos e anais de eventos científicos:

- Título:** DOCTraMS: A Decentralized and Offline Community-based Traffic Monitoring System.  
**Autores:** Thales T. Almeida, José Augusto M. Nacif, Fabiano P. Bhering, José Geraldo R. Júnior.  
**Evento:** IEEE Transaction On Intelligent Transportation Systems.  
**Situação:** Em processo de revisão.
- Título:** Projeto e Análise de um Sistema Descentralizado e Local para Monitoramento de Trânsito Baseado em Dados Colaborativos.  
**Autores:** Thales T. Almeida, José Geraldo R. Júnior, Fabrício A. Silva, José Augusto M. Nacif.  
**Evento:** XXXIV Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais (SBrT 2016).  
**Local:** Santarém, Brasil.  
**Período:** 30 de agosto a 02 de setembro de 2016.  
**Situação:** Em processo de revisão.
- Título:** DOCS4V: Design and Evaluation of a Distributed and Offline Traffic Monitoring System Based in Collaborative Data.  
**Autores:** Thales T. Almeida, José Geraldo R. Júnior, Christopher J. Gull, Fabrício A. Silva, José Augusto M. Nacif  
**Evento:** 27TH Annual IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC 2016).

**Local:** Valência, Espanha.

**Período:** 04 a 07 de setembro de 2016.

**Situação:** Em processo de revisão.