



SISTEMA OPORTUNÍSTICO E COLABORATIVO PARA MONITORAMENTO  
DE TRÂNSITO BASEADO EM REDES VEICULARES  
INFRAESTRUTURADAS

José Geraldo Ribeiro Júnior

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica.

Orientador: Luís Henrique Maciel Kosmowski  
Costa

Rio de Janeiro  
Junho de 2013

SISTEMA OPORTUNÍSTICO E COLABORATIVO PARA MONITORAMENTO  
DE TRÂNSITO BASEADO EM REDES VEICULARES  
INFRAESTRUTURADAS

José Geraldo Ribeiro Júnior

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

Examinada por:

---

Prof. Luís Henrique Maciel Kosmalski Costa, Dr.

---

Prof. Aloysio de Castro Pinto Pedroza, Dr.

---

Prof. Célio Vinicius Neves de Albuquerque, Ph.D.

---

Prof. Luciano Paschoal Gaspar, D.Sc.

---

Prof. Pedro Braconnot Velloso, Dr.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL  
JUNHO DE 2013

Ribeiro Júnior, José Geraldo

Sistema Oportunístico e Colaborativo para Monitoramento de Trânsito baseado em Redes Veiculares Infraestruturadas/José Geraldo Ribeiro Júnior. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2013.

XV, 99 p.: il.; 29,7cm.

Orientador: Luís Henrique Maciel Kosmalski Costa  
Tese (doutorado) – UFRJ/COPPE/Programa de Engenharia Elétrica, 2013.

Referências Bibliográficas: p. 89 – 98.

1. Monitoramento de Trânsito. 2. Colaborativo.  
3. Redes Veiculares. I. Costa, Luís Henrique Maciel Kosmalski. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Elétrica. III. Título.

*Dedico esta conquista a Deus e a  
minha família, em especial a  
minha esposa Cecília e a meus  
filhotes, Rafael e Manuela.*

# Agradecimentos

A Deus! Só Ele pra me dar tanta força e proteger viajando praticamente todas as semanas por quase quatro anos.

À minha esposa Cecília sempre presente.

Aos meus queridos filhos, Rafael e Manuela, razões da minha vida.

Ao meu pai, José Geraldo, por tudo que fez até hoje por mim, servindo de base para alcançar essa conquista.

À minha mãe, que também é parte de tudo isso. Sei que está sempre olhando por mim.

Ao meu orientador, Prof. Luís Henrique Maciel Kosmowski Costa, que esteve sempre presente na busca por soluções aos tantos desafios apresentados.

Ao Prof. Miguel, pelas inúmeras sugestões durante as revisões dos artigos que trabalhamos juntos.

Às minhas irmãs Patrícia e Márcia e sobrinhos.

Aos meus sogros, Angelito e Dona Rosa, que seguraram a barra por tantas vezes durante estes últimos anos.

Às tias Dóia e Tetê, que mesmo à distância sempre acompanharam, torceram e vibraram a cada conquista.

Aos colegas de apartamento, Mayron, Thiago e Pereirão.

Aos amigos do GTA, em especial ao Quintanilha, Rodrigo, Lino, Daniel, Alyson, Marcus, e tantos outros que por aqui estiveram e ajudaram de alguma forma.

Aos professores e servidores do CEFET-MG, em especial aos que participaram do projeto DINTER COPPE/CEFET-MG e aos professores da Coordenação de Informática.

À Lindsey, pela ajuda na preparação para as apresentações nos congressos internacionais.

Aos amigos que perdoaram essa enorme ausência.

À secretaria do PEE.

Ao Prof. Richard, coordenador do Projeto Dinter COPPE/CEFET-MG.

Enfim, ao CEFET-MG, à Capes, à FAPERJ e ao CNPq pelo apoio financeiro.

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

SISTEMA OPORTUNÍSTICO E COLABORATIVO PARA MONITORAMENTO  
DE TRÂNSITO BASEADO EM REDES VEICULARES  
INFRAESTRUTURADAS

José Geraldo Ribeiro Júnior

Junho/2013

Orientador: Luís Henrique Maciel Kosmowski Costa

Programa: Engenharia Elétrica

Com o excesso de veículos em circulação nas vias, o monitoramento e o controle do trânsito, em tempo real, se tornaram prioridade. Sistemas de monitoramento mais utilizados incluem o uso de câmeras de vídeo ou sensores magnéticos. Enquanto o uso de câmeras, controladas manualmente, se limita ao campo de visão, o uso de sensores apresenta alto custo de instalação e manutenção. Com a popularização dos *smartphones*, novas propostas têm surgido baseadas no deslocamento destes equipamentos. Esta tese apresenta duas arquiteturas para um sistema oportunístico e colaborativo para monitoramento de trânsito utilizando redes sem-fio IEEE 802.11 infraestruturadas (COTraMS). Na arquitetura centralizada, o veículo é responsável por informar o momento em que passou por determinado ponto da via. A central de controle é responsável por inferir a direção, localização e velocidade dos veículos nos trechos. A arquitetura centralizada proposta não requer nenhuma modificação nos equipamentos entre unidade de bordo e central de controle. Na arquitetura descentralizada as unidades de bordo atuam como enlaces de rede. Unidades de bordo e de acostamento trocam informações por meio de uma tabela de condições dos trechos, possibilitando que todos os elementos da rede possuam uma visão geral das condições na via. A arquitetura descentralizada é uma opção para vias sem infraestrutura elétrica ou cobertura de celular, como algumas estradas brasileiras. Para avaliar o COTraMS, foram executados experimentos na Avenida Brasil e no campus da Ilha do Fundão, na UFRJ, utilizando uma rede IEEE 802.11 b/g. A arquitetura centralizada também foi avaliada, por meio de simulações, em cenários com mais de um veículo. Os resultados apresentaram alto grau de precisão tanto na detecção da posição dos veículos quanto na estimativa da condição da via.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

OPPORTUNISTIC AND COLABORATIVE TRAFFIC MONITORING SYSTEM  
BASED ON VEHICLE-TO-INFRASTRUCTURE COMMUNICATIONS

José Geraldo Ribeiro Júnior

June/2013

Advisor: Luís Henrique Maciel Kosmowski Costa

Department: Electrical Engineering

Traffic monitoring and control is becoming more and more important as the number of vehicles and traffic jams grow. Nevertheless, this task is still predominantly done by visual means using strategically-placed video cameras. For more effectiveness, proposals to improve the traffic monitoring and control should consider automated systems. Other proposals use inductive loops inside the pavement, but these sensors are very expensive. In this thesis, motivated by popularity of smartphones, we propose two architectures for a Colaborative and Opportunistic Traffic Monitoring System (COTraMS), centralized and decentralized. In the first architecture, monitoring is done centrally, the vehicle being responsible for sending information about the moment it crossed a given point on the road. The control center is responsible for inferring the direction, location and speed of on-board units. The centralized architecture requires no modification to the protocols between on-board unit and central control. In the decentralized architecture, on-board units work as network links. On-board units and roadside exchange information to allow all elements to have an overview of the road conditions. The decentralized architecture is an option for roads without electrical infrastructure or cellular coverage, as some Brazilian roads. To validate the COTraMS, two prototypes were implemented using an IEEE 802.11b/g network. Measurements from a real public wireless network, in Rio de Janeiro city, demonstrate the possibility of obtaining traffic conditions with COTraMS. In addition, we analyse the centralized architecture to evaluate, via simulations, its performance in scenarios with more than one vehicle. The comparison of the obtained results with the data obtained from a GPS shows a high accuracy degree in detecting both the position of the vehicle and the estimation of the road condition.

# Sumário

<b>Lista de Figuras</b>	<b>x</b>
<b>Lista de Tabelas</b>	<b>xiii</b>
<b>Lista de Abreviaturas</b>	<b>xiv</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Objetivo . . . . .	3
1.2 Proposta . . . . .	5
1.3 Experimentos . . . . .	6
1.4 Contribuições . . . . .	7
1.5 Organização . . . . .	8
<b>2 Trabalhos Relacionados</b>	<b>9</b>
2.1 Redes Veiculares . . . . .	9
2.1.1 Padrões de Redes Veiculares . . . . .	12
2.1.2 Experimentos utilizando o padrão IEEE 802.11 p . . . . .	15
2.2 Monitoramento de Trânsito . . . . .	17
2.2.1 Comportamento do Tráfego . . . . .	17
2.2.2 Detecção da Movimentação e Localização do Veículo . . . . .	19
2.3 Projetos Relacionados . . . . .	21
2.3.1 Consumo de Energia em <i>Smartphones</i> . . . . .	24
2.3.2 Sensoriamento Urbano e Uso de Smartphones . . . . .	26
2.3.3 Soluções para Autonomia de Energia nas Unidades de Acos- tamento . . . . .	28
2.3.4 Escoamento de Trânsito . . . . .	30
<b>3 Arquiteturas para Monitoramento de Trânsito: Centralizada e Dis- tribuída</b>	<b>32</b>
3.1 Requisitos Básicos . . . . .	32
3.2 Arquitetura Centralizada . . . . .	33
3.2.1 Algoritmo da Central de Controle . . . . .	33



3.2.2	Algoritmo da Unidade de Bordo . . . . .	36
3.3	Arquitetura Descentralizada . . . . .	38
3.3.1	Funções da Unidade de Bordo . . . . .	39
3.3.2	Função da Unidade de Acostamento . . . . .	40
3.3.3	Cálculo do TTL . . . . .	42
<b>4</b>	<b>Protótipo Baseado no IEEE 802.11 b/g</b>	<b>45</b>
4.1	Parte Conceitual do COTraMS . . . . .	45
4.1.1	Detecção da Movimentação da Unidade de Bordo - Proposta Inicial . . . . .	47
4.1.2	Detecção da Movimentação da Unidade de Bordo - Proposta Atual . . . . .	49
4.2	Arquitetura Centralizada no COTraMS . . . . .	50
4.3	Arquitetura Descentralizada no COTraMS . . . . .	53
4.3.1	Etapas Executadas na Unidade de Bordo . . . . .	53
4.3.2	Unidade de Acostamento . . . . .	55
<b>5</b>	<b>Avaliação Experimental</b>	<b>57</b>
5.1	Mapeamento das Unidades de Acostamento e Detecção da Movimen- tação da Unidade de Bordo . . . . .	57
5.2	Experimentos - Arquitetura Centralizada . . . . .	62
5.2.1	Conexão entre Unidade de Bordo e uma Unidade de Acosta- mento . . . . .	63
5.2.2	Experimento na Avenida Brasil . . . . .	65
5.2.3	Experimentos Realizados via Simulação . . . . .	69
5.3	Experimentos - Arquitetura Descentralizada . . . . .	78
<b>6</b>	<b>Conclusões e Trabalhos Futuros</b>	<b>84</b>
6.1	Trabalhos Futuros . . . . .	86
	<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>89</b>

# Lista de Figuras

1.1	Etapas para melhorar o tráfego de veículos. . . . .	4
2.1	Taxonomia dos trabalhos relacionados neste capítulo. . . . .	10
2.2	Arquiteturas de redes veiculares [1]. . . . .	11
2.3	Alocação de espectro para aplicações DSRC [1]. . . . .	12
2.4	A pilha de protocolos WAVE (Adaptado de [2]). . . . .	13
2.5	Arquitetura IEEE 802.11. Adaptado de [3]. Na Figura, a STA 1, localizada no BSS1, transmite para a STA4, no BSS2. Os dois BSSs contêm APs que estão conectados pelo DS “global”. Quando a STA1 envia uma mensagem, o dado primeiro passa pelo AP do BSS1. O AP encaminha o dado para o DSS, que encaminha o dado para o AP do BSS2. Uma vez dentro do BSS2, o dado é encaminhado para a STA4, o destino final. . . . .	14
2.6	Trânsito livre - momento t1 [4]. . . . .	19
2.7	Inserção de veículos pela pista da direita - momento t2 [4]. . . . .	19
2.8	Reflexo em todas as pistas - momento t3 [4]. . . . .	20
2.9	Problema se reflete em toda a via - momento t4 [4]. . . . .	20
2.10	Interface Web - <i>DTN for Urban Environment</i> . É possível visualizar os pontos de ônibus nas vias monitoradas. Os círculos destacam a localização de dois ônibus que participam do projeto (Reproduzido de [5]). . . . .	22
2.11	Unidade de Acostamento do Projeto ReBus. . . . .	30
2.12	Esquemático do nó fixo [6]. . . . .	30
3.1	Elementos da arquitetura Centralizada: unidades de bordo (UnB), unidades de acostamento (UnA) e central de controle. . . . .	33
3.2	Elementos da arquitetura descentralizada: unidades de bordo (UnB) e unidades de acostamento (UnA). . . . .	38

3.3	Atualização da TCT local de uma unidade de bordo (UnB). Neste exemplo a unidade de bordo recebeu uma TCT onde três valores de TTL são maiores que da TCT local. Desta forma, as informações locais sobre os trechos D2, E3 e E4 serão atualizadas. Uma TCT completa com 60 trechos possui 1,1 kBytes. . . . .	39
3.4	Tempo de convergência da condição dos trechos mais extremos em uma via onde cada trecho possui 500 metros. . . . .	43
4.1	Informações contidas no quadro de sonda, obtidas via <i>tcpdump</i> , utilizando um <i>laptop</i> dentro de um veículo em movimento, na Avenida Brasil. . . . .	46
4.2	Divisão da área de cobertura em zonas. . . . .	47
4.3	Comportamento da potência do sinal dos quadros de sonda. . . . .	50
4.4	Processo de comunicação entre unidade de bordo e de acostamento. . . . .	51
4.5	Interface para visualização das condições de trânsito na via [7]. . . . .	53
4.6	Diagrama das etapas de funcionamento do sistema proposto. . . . .	56
5.1	Dados obtidos via GPS por um veículo em movimento na Avenida Brasil. . . . .	58
5.2	Variação da potência do sinal recebido - Captura de <i>beacons</i> na faixa de velocidade entre 30 e 50 km/h. . . . .	59
5.3	Comportamento do valor de Potência do Sinal Recebido pela Unidade de Acostamento. . . . .	60
5.4	Comparação do comportamento dos quadros de sonda recebidos após o descarte de 90%. . . . .	61
5.5	Captura de <i>beacons</i> - Variação da potência recebida. . . . .	61
5.6	Velocidade durante o percurso - dados obtidos via GPS. . . . .	62
5.7	Kit que compõe a Unidade de Acostamento. . . . .	63
5.8	Cenário - Experimento 1 - UFRJ. . . . .	64
5.9	Mapeamento de 63 unidades de acostamento na Avenida Brasil. . . . .	66
5.10	Regiões da Avenida Brasil onde foram realizados os experimentos. . . . .	66
5.11	Comportamento da potência do sinal recebido - Região com 4,2 km da Avenida Brasil. . . . .	67
5.12	Comparação de resultados (velocidade média em cada trecho) - Região com 4,2 km da Avenida Brasil. . . . .	67
5.13	Comportamento da potência do sinal recebido - Região com 6,8 km da Avenida Brasil. . . . .	68
5.14	Comparação de resultados (velocidade média em cada trecho) - Região com 6,8 km da Avenida Brasil. . . . .	68
5.15	Componentes principais do simulador, adaptado de [8]. . . . .	71

5.16	Movimentação dos veículos apenas em um sentido da via. . . . .	73
5.17	Movimentação dos veículos nos dois sentidos da via. . . . .	73
5.18	Exemplo de uma parte do cenário usado na avaliação da implementação. . . . .	74
5.19	Variação da velocidade dos veículos. . . . .	75
5.20	Cenário usado para testar bloqueio pelo obstáculo. . . . .	75
5.21	Cenário com três pistas (velocidade média em cada trecho) - 90% correto. . . . .	77
5.22	Cenário com quatro pistas (velocidade média em cada trecho) - 94% correto. . . . .	78
5.23	Trecho 1 - Experimento 2 - UFRJ. . . . .	80
5.24	Trecho 2 - Experimento 2 - UFRJ. . . . .	81
5.25	Funcionamento do algoritmo. . . . .	81
5.26	Histograma - Tempo detalhado de cada etapa. . . . .	82
5.27	Comparação entre a velocidade média obtida via COTraMS com a velocidade média obtida por meio de um GPS. . . . .	83
6.1	Cenário de uso - Campus da UFRJ. . . . .	86
6.2	Unidade de acostamento instalada na UFRJ. . . . .	87

# Lista de Tabelas

1.1	Comparativo entre tecnologias utilizadas no monitoramento. . . . .	4
2.1	Resultados dos testes de V2I (Adaptado de [9]). . . . .	17
2.2	Comparação entre as principais características dos sistema de monitoramento. Apenas o COTraMS, na arquitetura descentralizada, não depende de uma central de controle para gerar as condições em cada trecho. . . . .	24
4.1	Faixas de velocidade para definição de condição de trânsito, considerando o alcance da unidade de acostamento de 400m e a extensão de cada zona de 133 m de raio. . . . .	48
4.2	Exemplo de <i>buffer</i> de 2 segundos. . . . .	49
5.1	Tempo médio de conexão entre unidade de bordo e unidade de acostamento. Segundo Gass et al. [10]. o limite técnico para o padrão IEEE 802.11 b é de 120 km/h, em um cenário livre de interferências. . . . .	65
5.2	Parâmetros para unidades de bordo e unidade de acostamento. . . . .	71
5.3	Parâmetros usados na simulação . . . . .	74
5.4	Parâmetros Fixos. . . . .	76
5.5	Resultados - Carros, 110 km/h e Caminhões, 80 km/h. . . . .	79
5.6	Resultados - Carros, 100 km/h e Caminhões, 80 km/h. . . . .	79
5.7	Resultados - Carros, 90 km/h e Caminhões, 70 km/h. . . . .	80

# Lista de Abreviaturas

API	<i>Application Programming Interface</i> , p. 23
BSSID	<i>Basic Service Set Identification</i> , p. 46
BSS	<i>Basic Service Set</i> , p. 13
COTraMS	<i>Collaborative and Opportunistic Traffic Monitoring System</i> , p. 5
DG TREN	<i>Directorate-General for Transport and Energy</i> , p. 1
DHCP	<i>Dynamic Host Configuration Protocol</i> , p. 5, 11
DSRC	<i>Dedicated Short Range Communication</i> , p. 12
ESSID	<i>Extended Service Set Identification</i> , p. 11
FAPERJ	Fundação Carlos Chagas de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro, p. 5
FCC	<i>Federal Communications Commission</i> , p. 12
GNSS	<i>Global Navigation Satellite System</i> , p. 19
GPS	<i>Global Positioning System</i> , p. 2
GTA	Grupo de Teleinformática e Automação, p. 29
HTTP	<i>HiperText Transfer Protocol</i> , p. 24
IC	Instituto de Computação da UFF, p. 28
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i> , p. 12
INEA	Instituto Estadual do Ambiente do Estado do Rio de Janeiro, p. 1
ITS	<i>Intelligent Transportation System</i> (Sistemas de Transportes Inteligentes), p. 2

LVD	<i>Low Voltage Directive</i> , p. 29
MAC	<i>Media Access Control</i> , p. 46
MIT	<i>Massachusetts Institute of Technology</i> , p. 31
NS-3	<i>Network Simulator version 3</i> , p. 7
NUS	<i>National University of Singapore</i> , p. 21
OBU	<i>On-Board Unit</i> (Unidade de Bordo), p. 4
PWM	<i>Pulse-Width Modulation</i> , p. 29
RNP	Rede Nacional de Ensino e Pesquisa, p. 29
RSSI	<i>Received Signal Strength Indication</i> , p. 6
RSU	<i>Road Side Unit</i> (Unidade de Acostamento), p. 5
SECT	Secretaria Estadual de Ciência e Tecnologia do Rio de Janeiro, p. 5
STA	<i>Station</i> , p. 31
TCT	Tabela de Condição do Trecho, p. 5
TET	Departamento de Engenharia de Telecomunicações da UFF (Universidade Federal Fluminense), p. 28
UERJ	Universidade do Estado do Rio de Janeiro, p. 5
UFF	Universidade Federal Fluminense, p. xv
UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro, p. 6
V2I	<i>Vehicle-to-Infrastructure</i> , p. 9
V2V	<i>Vehicle-to-Vehicle</i> , p. 9
VANET	<i>Vehicular Ad-Hoc Network</i> , p. 9
WAVE	<i>Wireless Access in the Vehicular Environment</i> , p. 12
WSMP	<i>WAVE Short Message Protocol</i> , p. 13
XML	<i>Extensible Markup Language</i> , p. 23

# Capítulo 1

## Introdução

De acordo com o DG TREN (*Directorate-General for Transport and Energy*) europeu, o número de veículos em circulação na Europa aumentou de 232 a cada mil habitantes, em 1975, para 460 em 2002. Isso representa um aumento de três milhões de veículos a cada ano [11] na Europa. No estado do Rio de Janeiro, o aumento médio é de 500.000 veículos a cada dois anos, com previsão de cerca de cinco milhões de veículos em circulação no ano de 2012 [12]. A impressionante marca de dois bilhões de veículos em circulação em todo o planeta está próxima de ser alcançada [13], impulsionada especialmente pelo crescimento de países como Brasil, China e Índia. Esta saturação das vias afeta diretamente a produtividade econômica, a segurança e o meio ambiente. O problema afeta principalmente as grandes cidades, como São Paulo e Rio de Janeiro, resultando em engarrafamentos que se estendem por quilômetros.

Segundo estatísticas do Departamento de Transporte dos Estados Unidos (USDOT) e da Administração Nacional de Segurança no Trânsito (NHTSA) [14], o custo por ano com congestionamentos ultrapassa 70 bilhões de dólares em perda de produtividade e resulta em mais de 8,5 bilhões de galões (mais de 38 bilhões de litros) de combustível desperdiçados. Estatísticas mostram ainda que mais da metade dos congestionamentos é causada por incidentes como pequenas batidas, reformas na pista, imprudência e até mesmo, reduções bruscas de velocidade [15]. Por outro lado, a importância da mobilidade é cada vez mais evidente no desenvolvimento da economia. No Banco Mundial, por exemplo, cerca de 40% dos empréstimos estão relacionados a projetos na área de transportes [16]. Já a Comissão Europeia estima que congestionamentos resultam em prejuízos atualmente de 100 bilhões de euros por ano [17].

Em termos de meio ambiente, a lentidão no trânsito afeta diretamente a qualidade do ar. De acordo com o INEA (Instituto Estadual do Ambiente do Estado do Rio de Janeiro), os veículos já são responsáveis pela emissão de 77% do total de poluentes emitidos na capital, entre eles o CO<sub>2</sub> (Gás Carbônico) [12]. Desse total,



quase 30% é emitido apenas por veículos que circulam na Avenida Brasil, uma importante avenida que corta a capital do estado, com extensão de 58 km. Na Europa, a emissão de CO<sub>2</sub> corresponde a 50% do total de poluentes [11].

É fato que a notificação prévia das regiões congestionadas, permitindo aos motoristas tomar decisões fundamentadas sobre rotas alternativas, auxilia na segurança no trânsito, na redução da gravidade dos congestionamentos e, ao mesmo tempo, possibilita a economia de tempo e combustível. Qualquer proposta que tenha como objetivo minimizar os problemas no trânsito deve ter como base um sistema de monitoramento automatizado, que permita conhecer, divulgar e armazenar as condições da via de forma eficiente. A criação de uma base de dados sobre cada trecho, além de possibilitar ações em tempo real, torna possível a identificação de problemas pontuais. Essas informações podem servir de base, por exemplo, para um planejamento de escoamento do trânsito em setores com maior índice de engarrafamentos. Este, aliás, é um dos maiores desafios para o ITS (*Intelligent Transportation System* - Sistemas de Transportes Inteligentes), que busca, por meio das tecnologias da informação e comunicação, gerar informação para melhorar a eficiência, segurança e sustentabilidade ambiental dos sistemas de transporte [18].

Apesar da maioria dos sistemas de monitoramento em todo o mundo utilizar câmeras de vídeos [19], [20], que possuem limitações como o campo de visão, os sensores magnéticos embutidos na via [21], [22] também são muito utilizados. Esses sensores fazem o registro de apenas um sinal cada vez que um veículo passa sobre eles, o que é considerado uma vantagem quando comparado ao volume de dados gerados por sistemas que analisam imagens, por exemplo. No entanto, cada ILD (*Inductive Loop Detector*), incluindo hardware e controladores, custa em torno de 8.000 dólares [23]. Acrescenta-se ainda que o uso de sensores fixos tem como objetivo principal fazer o monitoramento baseado apenas no controle da densidade de veículos. Desta forma, departamentos de transportes por todo o mundo buscam novas soluções menos dispendiosas, mais confiáveis e automatizadas para monitoramento de tráfego [15].

Outras propostas de sistemas automatizados começam a se tornar uma realidade. Entre as propostas estão sistemas que usam: (1) sensores nas vias e nos carros [24–27], como equipamentos portáteis ou dispositivos embarcados, (2) sensores acústicos [28], utilizados na detecção de veículos de emergência, ou (3) técnicas de computação gráfica [29], que exigem maior processamento e equipamentos sofisticados. Especialmente pela popularização dos *smartphones*, sistemas automatizados têm utilizado a combinação do GPS (*Global Positioning System*) [30, 31], para definir a posição do veículo na via, com 3G/4G [32–35] ou redes IEEE 802.11 [5, 36–38], para enviar os dados sobre a movimentação do veículo. Outros sistemas dispensam o uso do GPS para localização do veículo [39], o que reduz o consumo de bateria,

especialmente em equipamentos portáteis como *smartphones*. A maioria desses sistemas depende de um elemento centralizador, responsável por inferir e divulgar as condições na via. Essa central de controle pode ser um elemento externo, conectado via Internet, ou fazer parte da rede local. Outras propostas utilizam carros autônomos [40], capazes de manter um sincronismo entre os veículos minimizando o número de reduções bruscas de velocidade e reduzindo o número de reacelerações. No entanto, estes sistemas ainda enfrentam barreiras relacionadas ao custo de implantação.

A popularidade dos *smartphones* pode ser comprovada por um relatório da Cisco sobre previsão do crescimento do tráfego móvel global. Segundo o relatório, até 2015 haverá um *smartphone* por habitante no planeta [41]. Em 2008, o número de celulares no mundo já ultrapassava três bilhões de aparelhos [42]. A maioria desses equipamentos possui interface IEEE 802.11, 3G/4G ou GPRS, GPS, e outros sensores, como o acelerômetro, que permite, por exemplo, distinguir quando usuários estão dentro de um mesmo meio de transporte por meio de padrões de leituras destes sensores [31]. Além de prover mobilidade e acesso ubíquo, *smartphones* podem ser usados para que o usuário participe de sistemas colaborativos, provendo informações sobre sua localização e deslocamento. Ao mesmo tempo, é importante garantir o anonimato do usuário, evitando que informações pessoais como nome ou número de telefone sejam transmitidas pela rede, principalmente se estiverem associadas à localização. Uma opção é utilizar apenas informações do equipamento, como endereço MAC do dispositivo. Além de não prover o anonimato, a alta demanda da tecnologia 3G/4G está deteriorando a qualidade e a garantia do serviço prestado aos usuários devido a congestionamentos na rede [43], fazendo as operadoras limitarem os planos a uma taxa máxima de uso. Devido a essa limitação, esforços de pesquisa têm buscado o uso de tecnologias de rede complementares para o envio de dados originalmente direcionados para redes celulares [44]. Esta técnica é chamada de *Mobile Data Offloading* [45].

A combinação do GPS com outra tecnologia de transmissão resulta em um aumento do consumo de bateria dos equipamentos portáteis [36, 46]. O uso do GPRS (como opção ao 3G/4G) tem como vantagem a grande área de cobertura, uma vez que utiliza a rede celular. Entretanto, a taxa de envio de dados para a Internet é menor que a obtida com o IEEE 802.11 [46] quando ambas as possibilidades coexistem. A Tabela 1.1 apresenta um resumo comparativo entre as tecnologias citadas.

## 1.1 Objetivo

O objetivo principal desta tese é detectar as condições de trânsito em rodovias e disseminar essa informação para veículos que estão na via e/ou fora dela, tudo

Tabela 1.1: Comparativo entre tecnologias utilizadas no monitoramento.

Problemas	GPS	GPRS	3G	802.11	Sensores
Alto consumo de bateria (usuário)	X	X	X	X	
Custo para usuário final		X	X		
Alto investimento com infraestrutura					X
Taxa limitada		X	X		
Baixa taxa de upload		X			
Pequena cobertura				X	X

em tempo real, ou seja, atualizado a cada minuto, por exemplo. A Figura 1.1 apresenta uma divisão em cinco etapas do processo de monitoramento e controle, necessárias para melhorar o tráfego de unidades de bordo (OBU - *On-Board Unit*) a partir de dados obtidos em tempo real. Essa tese apresenta uma proposta para as etapas em destaque, que são: coletar as informações sobre a via, organizar as informações obtidas e divulgar as condições da via. Na primeira etapa, o objetivo é obter informações sobre a movimentação dos veículos, definindo o momento em que estes passaram por pontos específicos da via. Na segunda etapa, os dados são organizados e tratados a fim de gerar uma velocidade média final para cada trecho da via, identificando a condição do trânsito no trecho. A condição de cada trecho pode ser divulgada tanto para veículos na via quanto para usuários conectados, por exemplo, via Internet.



Figura 1.1: Etapas para melhorar o tráfego de veículos.

## 1.2 Proposta

Nesta tese é proposto o COTraMS (*Collaborative and Opportunistic Traffic Monitoring System*), um sistema colaborativo que tem por objetivo fazer o monitoramento e a divulgação das condições de trânsito. No COTraMS, duas arquiteturas são implementadas, sendo uma na forma centralizada [39] e outra descentralizada [47]. Na forma centralizada, unidades de bordo são responsáveis por enviar para uma central de controle o momento em que estas passaram pelas unidades de acostamento (RSU - *Road Side Unit*). De posse dos dados, a central de controle calcula e divulga, de acordo com o intervalo de tempo definido, as condições de trânsito da via, como demonstrado no Capítulo 3. Uma vantagem da arquitetura centralizada está no fato de não ser necessária nenhuma modificação nos elementos que compõem a infraestrutura física, incluindo os elementos ativos da rede, entre a unidade de bordo e a central de controle. Na proposta descentralizada, unidades de bordo e de acostamento trocam informações a fim de atualizar suas próprias TCTs (Tabelas de Condições dos Trechos). Estas tabelas contêm informações sobre cada trecho da via. Um diferencial da arquitetura descentralizada é o fato das unidades de acostamento não precisarem estar conectadas, nem entre si e nem tampouco a uma central de controle, o que reduz o custo de implantação e manutenção. Utilizando kits de acostamento, já propostos na literatura [6], a arquitetura descentralizada pode ser utilizada mesmo em rodovias onde não existe infraestrutura, como energia ou cobertura celular.

Em ambas arquiteturas, as medidas geradas pelas unidades de bordo são ponderadas para privilegiar as informações mais recentes e ainda para auxiliar na definição de um tempo de vida útil para a informação, uma vez que o objetivo é inferir a condição da via em tempo real. Na proposta descentralizada, por não haver um elemento centralizador, não há garantia de sincronismo entre os relógios. Dessa forma, foi necessário utilizar um mecanismo de controle semelhante ao controle de empréstimo (*lease*) do DHCP (*Dynamic Host Configuration Protocol*) [48], onde o tempo de vida útil é dado em segundos e cada dispositivo decreta o tempo, baseado no relógio local, até chegar a zero, quando a informação perde valor.

Outra contribuição desta tese foi a avaliação da proposta utilizando dados reais, fazendo uso de uma estrutura existente na Avenida Brasil, na cidade do Rio de Janeiro. Graças ao projeto Avenida Brasil Digital, iniciado em 2009 pela SECT (Secretaria Estadual de Ciência e Tecnologia do Rio de Janeiro), com recursos da FAPERJ (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro) e coordenação técnica de pesquisadores da UERJ (Universidade do Estado do Rio de Janeiro), os 58km da avenida foram totalmente cobertos por 163 pontos de acesso [49]. O projeto Avenida Brasil Digital e outros projetos, como o Orla Digital [50], demonstram

uma tendência no crescimento do número de projetos que envolvem redes sem-fio IEEE 802.11. Essa tendência possibilita uma expansão no número de aplicações e serviços que podem ser disponibilizados através dessas redes, que ainda possibilitam captar, analisar e integrar dados de diferentes serviços. Assim, os usuários podem usufruir de respostas mais inteligentes a certas necessidades. Dentre essas necessidades está o auxílio no monitoramento de trânsito.

Devido a problemas de vandalismo e depredação sofridos pela rede, o projeto Avenida Brasil Digital foi desativado ao final de 2010. Desta forma, foi necessário criar outro cenário de uso, montado no campus da UFRJ (Universidade Federal do Rio de Janeiro), na Ilha do Fundão, utilizando uma rede IEEE 802.11 b/g. Fazendo uso apenas de informações obtidas por meio de quadros de sonda (*beacon frames*), emitidos pelos pontos de acesso no gerenciamento da rede, essas mensagens são usadas para extrair informações que permitam inferir a movimentação da unidade de bordo, por exemplo, em uma rodovia. À medida que uma unidade de bordo se aproxima ou se distancia de uma unidade de acostamento, há uma variação na potência do sinal recebido (RSSI - *Received Signal Strength Indication*). Quando as informações da unidade de bordo são comparadas com informações locais sobre o posicionamento das unidades de acostamento, é possível inferir a localização, a direção e a velocidade média de deslocamento da unidade de bordo [51]. Combinando informações sobre o deslocamento de várias unidades de bordo é possível inferir a condição do trânsito em um trecho de uma rodovia. As unidades de bordo têm papel fundamental no sistema proposto, uma vez que são as responsáveis por receber os quadros de sonda, filtrar as informações necessárias e enviá-las tanto para a central, na arquitetura centralizada, quanto para as unidades de acostamento, na descentralizada, tornando o processo colaborativo. O cenário criado para simulação possui características semelhantes a vias públicas como o grande fluxo de veículos e a existência de outras redes na mesma frequência.

### 1.3 Experimentos

Nos experimentos, foram coletados dados sobre cada etapa do processo utilizando um veículo. Entre as medições estão o tempo de associação e configuração de rede, o tempo para envio e atualização da tabela de condição do trecho (no sistema descentralizado) e a detecção de passagem da unidade de bordo pela unidade de acostamento. A comparação dos resultados obtidos com os dados de um GPS de alta precisão (informando a posição 4 vezes por segundo) mostrou um alto grau de precisão tanto na detecção da posição dos veículos quanto na estimativa da condição da via.

A proposta centralizada foi validada também por meio de simulações em cená-

rios com grande número de veículos e obstáculos espalhados pela via, utilizando o simulador NS-3 (*Network Simulator version 3*) [52]. Para isso, utilizou-se um modelo de mobilidade proposto por M. Treiber e D. Helbing [53] e implementado para o NS-3 por Hadi [8]. Entre os parâmetros variados nos cenários adotados estão: o número de pistas, o tipo de veículo e a velocidade máxima desejada para cada tipo de veículo. Os resultados encorajam o uso do sistema proposto [54], mesmo em grandes cenários, onde é possível fazer um monitoramento de tráfego de forma automatizada e eficiente gerando um tráfego de controle muito pequeno na rede.

## 1.4 Contribuições

As principais contribuições desta tese são:

- Criação de uma Arquitetura Descentralizada para o monitoramento de trânsito;
  - cálculo, na unidade de bordo, da velocidade média no trecho em que o veículo percorreu, em tempo de execução;
  - tratamento, na unidade de acostamento, das informações de vários veículos por trecho, em tempo real;
  - definição do tempo de vida útil da informação de acordo com as condições da via;
  - controle do tempo de vida útil da informação em pontos distintos, uma vez que não há garantia de sincronismo entre os relógios;
  - divulgação das condições de trânsito sem necessidade de acesso à Internet;
- Gerência de TCTs para divulgação das condições de trânsito;
- Desenvolvimento do COTraMS, um sistema oportunístico e colaborativo com suporte às arquiteturas propostas nesta tese. Entre as principais características estão:
  - utilização do padrão de rede IEEE 802.11 b/g para localização da unidade de bordo e envio dos dados;
  - definição da movimentação e localização baseada na variação da potência de sinal recebida;
  - processo para inferir e divulgar as condições da via sem depender de interferência humana;
- Realização de experimentos em cenários reais para coleta, processamento e envio de dados;

- Precisão quanto a localização do veículo na via (entre 3 e 8 metros);

Outras contribuições são:

- Criação da arquitetura centralizada para inferir as condições de trânsito dos trechos na via.
  - cálculo da velocidade média no trecho em intervalos de tempo definidos;
  - divulgação das condições de trânsito localmente e via Internet;
- Experimentos de maior escala em cenários mais complexos por meio de simulação. Nestes cenários foram variados parâmetros como: tamanho da pista, número de pistas, número de obstáculos, posição dos obstáculos e porcentagem de carros e caminhões.

## 1.5 Organização

O restante desta tese está organizado da seguinte forma. O Capítulo 2 apresenta as principais tecnologias e os trabalhos relacionados à solução proposta. O Capítulo 3 detalha as arquiteturas de monitoramento centralizado e distribuído, sem considerar nenhuma tecnologia específica. O Capítulo 4 apresenta em detalhes o COTraMS, desenvolvido para suportar o padrão IEEE 802.11 b/g, com os quais foram realizados experimentos em cenários reais. Além destes experimentos, o Capítulo 5 apresenta as simulações no NS-3 que tiveram como objetivo avaliar a proposta em experimentos de maior escala e a análise dos resultados. Finalmente, o Capítulo 6 apresenta as conclusões obtidas e tópicos para futuras investigações.

# Capítulo 2

## Trabalhos Relacionados

Este capítulo apresenta os principais trabalhos relacionados ao problema tratado nesta tese. Após alguns conceitos básicos de redes veiculares, as seções seguintes apresentam trabalhos sobre monitoramento do trânsito, comportamento do tráfego na via, detecção da movimentação e localização do veículo, cálculo e divulgação das condições da via. Questões de energia que envolvem *smartphones* também são apresentadas uma vez que estão diretamente relacionadas à tecnologia a ser utilizada no COTraMS. A autonomia das unidades de acostamento também é um assunto tratado neste capítulo uma vez que permitirá o uso da arquitetura descentralizada em cenários onde a via não conta com rede elétrica. Para facilitar a visualização da estrutura desenvolvida no capítulo, a Figura 2.1 apresenta uma taxonomia dos trabalhos relacionados.

### 2.1 Redes Veiculares

A arquitetura de redes veiculares define a forma como os nós se organizam e se comunicam. Das três arquiteturas principais de redes veiculares existentes: *ad hoc* pura, infraestruturada e híbrida [1], ilustradas na Figura 2.2, a arquitetura infraestruturada (V2I - *Vehicle-to-Infrastructure*), adotada nesta proposta, emprega unidades de acostamento distribuídas ao longo das vias. Essas unidades de acostamento funcionam como pontos de acesso de redes IEEE 802.11 e centralizam o tráfego da rede, servindo como nós intermediários das comunicações. Além de possibilitar a comunicação com a Internet, o modo infraestruturado possibilita um tempo maior de contato entre dois nós quando comparado à arquitetura *ad hoc* pura (V2V - *Vehicle-to-Vehicle*), considerando veículos em direções opostas. Unidades de acostamento também podem servir como referência em sistemas que envolvam serviços de localização. Mesmo quando existe infraestrutura, pesquisadores referem-se às redes veiculares em geral como VANETs (*Vehicular Ad-Hoc Network*) [55]. Optou-se por utilizar a arquitetura V2I também porque a arquitetura *ad hoc* (V2V - *Vehicle-to-*



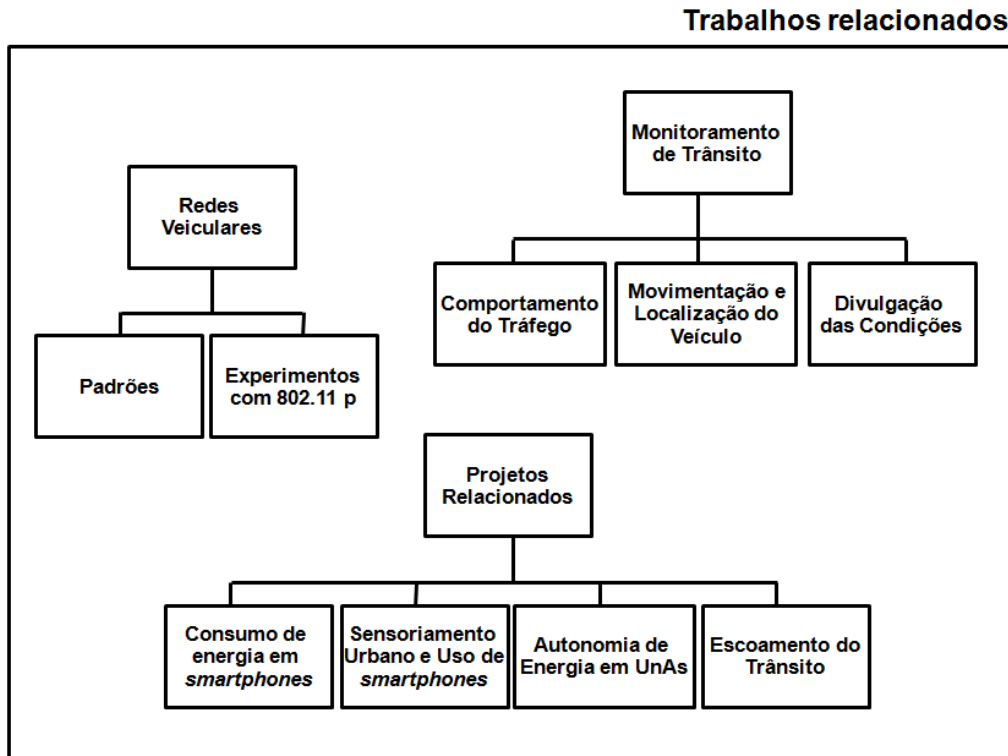


Figura 2.1: Taxonomia dos trabalhos relacionados neste capítulo.

*Vehicle*) é dependente da distribuição e de uma densidade mínima de veículos para se ter conectividade. Na arquitetura V2V, um número grande de saltos entre origem e destino prejudica a integridade e a temporização dos dados [56].

As aplicações de redes veiculares podem ser divididas em três classes: segurança no trânsito, entretenimento e assistência ao motorista [1]. Nas aplicações de assistência ao motorista, foco desta tese, é possível citar vários tipos de aplicações que poderiam fazer uso das arquiteturas aqui propostas, como: monitoramento de trânsito, controle de frotas, acompanhamento do itinerário de transporte público, entre outros [57].

Em redes veiculares, a comunicação entre os nós apresenta desafios importantes, como a alta mobilidade e o tempo de contato entre pares que pode não ser suficiente para iniciar uma conexão e transferir dados. Este problema é minimizado quando os veículos possuem uma trajetória definida de acordo com a via. Rubinstein *et al.* [58] estudam a viabilidade das redes baseadas no padrão IEEE 802.11 a/b/g utilizando equipamentos de prateleira. Os autores medem a transferência de dados durante o contato entre duas unidades de bordo em movimento em direções opostas considerando o tempo desde o recebimento do primeiro pacote até o último. Dentre as velocidades medidas (20, 40 e 60 km/h), o cenário apresentado por Rubinstein *et al.* tem como pior resultado o momento onde os veículos atingem uma velocidade de 60 km/h. Devido ao curto tempo de contato, cerca de 11 segundos, o valor máximo

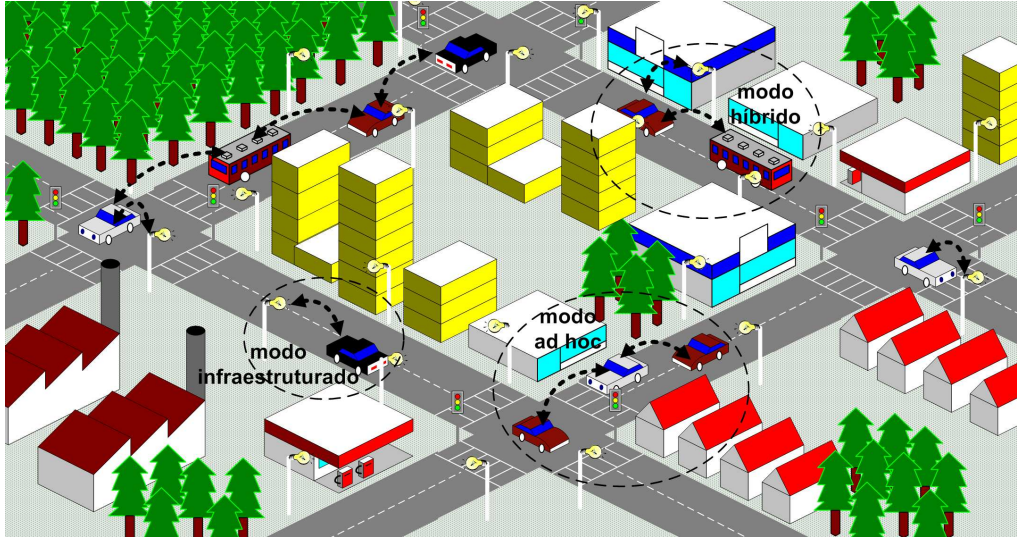


Figura 2.2: Arquiteturas de redes veiculares [1].

transmitido foi cerca de 100 Kbytes. Como o sistema proposto nesta tese faz uso de uma rede infraestruturada, baseado nos resultados apresentados por Rubinstein *et al.*, é razoável assumir que cerca de 100 Kbytes serão transmitidos a 120 km/h, em pelo menos 12 segundos de contato com uma unidade de bordo que apresente um raio de cobertura de 200 m. Vale ressaltar que em [58] vários parâmetros foram previamente definidos, como o endereçamento IP, ESSID (*Extended Service Set Identification*) e canal utilizados, além do tamanho do pacote. Estas configurações fixas diminuem de forma significativa o tempo de associação e conexão entre os nós. O impacto destas configurações fixas ficam evidentes nos experimentos apresentados no Capítulo 5, onde são apresentados os resultados dos experimentos realizados. Outro parâmetro importante para esta tese é a quantidade de informação transmitida durante os experimentos. Na arquitetura descentralizada, onde unidades de bordo e de acostamento trocam informações sobre todos os trechos durante a transmissão, uma TCT com 60 trechos possui apenas 1,1 Kbyte.

Segundo Bychkovsky *et al.* [59], o tempo para fazer uma varredura (*scanning*) das redes sem-fio IEEE 802.11 dentro do alcance é de cerca de 7 segundos, enquanto o tempo de associação a um ponto de acesso é de cerca de 9 segundos. No cenário utilizado por Bychkovsky *et al.*, não há garantia de conexão durante o deslocamento sendo necessário que, a cada ponto de acesso, sejam realizadas as etapas de varredura, associação e atribuição de endereço IP. Segundo Bychkovsky *et al.*, o pior caso para a aquisição DHCP (*Dynamic Host Configuration Protocol*) é considerado quando o veículo começa o processo de requisição, estando no limite entre dois pontos de acesso, o que faz com que alguns quadros de requisição sejam perdidos. Nas arquiteturas propostas nesta tese não é utilizada nenhuma informação desta região crítica. A maior parte do processo acontece próximo às unidades de acostamento,

onde a probabilidade de perda é menor. Nos experimentos apresentados no Capítulo 5, realizados no campus da ilha do Fundão, na UFRJ, o tempo de associação varia de 3 a 9 segundos de acordo com as características do cenário, como o fluxo de veículos e obstáculos.

### 2.1.1 Padrões de Redes Veiculares

Esta seção apresenta os padrões de redes veiculares, com ênfase nos aspectos que diferenciam o padrão IEEE 802.11 p do padrão IEEE 802.11 b/g, utilizado no COTrAMS.

Em 1999, nos Estados Unidos, a FCC (*Federal Communications Commission*) alocou 75 MHz do espectro de frequências, na faixa de 5,9 GHz, para aplicações DSRC (*Dedicated Short Range Communications*), como mostrado na Figura 2.3 [1]. A faixa DSRC é livre, porém é necessário obter licença de uso. Desde 2004 o IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) vem padronizando a comunicação em redes veiculares. O padrão conhecido como IEEE 802.11 p WAVE (*Wireless Access in the Vehicular Environment*) é uma modificação do padrão 802.11 com o objetivo de adicionar suporte a redes locais sem-fio em redes veiculares. O padrão IEEE 802.11 p é baseado no padrão de redes locais IEEE 802.11 a e as principais aplicações estão voltadas para aplicações V2V.

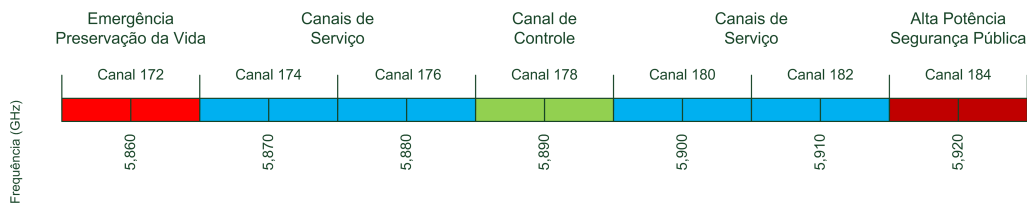


Figura 2.3: Alocação de espectro para aplicações DSRC [1].

A arquitetura WAVE é definida em seis documentos: IEEE P1609.1, IEEE P1609.2, IEEE P1609.3, IEEE P1609.4, IEEE 802.11 e IEEE 802.11p [1]. O padrão IEEE 802.11 p define as camadas físicas e de controle de acesso ao meio (MAC) para redes veiculares. A arquitetura WAVE é composta por uma família de padrões que vai além das camadas MAC e física (Figura 2.4). O IEEE P1609.3 especifica os serviços das camadas de rede e de transporte, incluindo o endereçamento alternativo à camada IP e o roteamento. IEEE P1609.4 define modificações no padrão IEEE 802.11, para a operação em múltiplos canais. Finalmente, o adendo IEEE 802.11 p define as diferenças específicas do controle de acesso ao meio em ambientes de comunicação WAVE com relação ao IEEE 802.11 tradicional [60]. O padrão deve considerar ainda que os veículos estão em altas velocidades e, portanto, as comunicações devem ser executadas por completo em intervalos curtos de tempo.

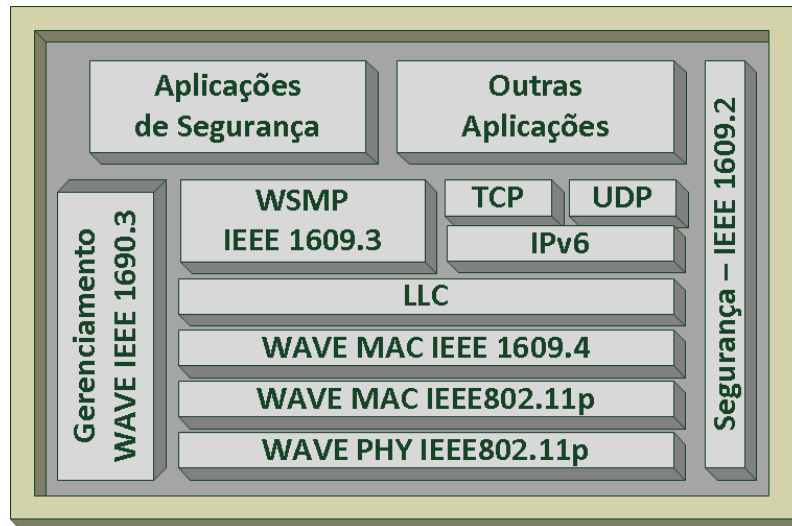


Figura 2.4: A pilha de protocolos WAVE (Adaptado de [2]).

O protocolo WSMP (*WAVE Short Message Protocol*) é uma opção à utilização dos protocolos TCP/UDP e IPv6 em ambientes WAVE. Este serviço de rede alternativo apresenta maior eficiência no ambiente WAVE, uma vez que foi projetado para comunicação em ambientes veiculares, onde a maioria das aplicações exige latência muito baixa e serviço não-orientado a conexão. As mensagens do WSMP podem ser enviadas em qualquer dos canais DSRC, enquanto datagramas IP só podem ser enviados nos canais de serviço (*Service Channels* - SCHs). Além desses tipos de tráfego, quadros de gerenciamento são enviados no canal de controle (*Control Channel* - CCH), utilizando formatos definidos no padrão IEEE 1609.4. O protocolo WSMP permite que as aplicações controlem diretamente características da camada física, como o canal e a potência de transmissão utilizados para enviar mensagens [1]. A aplicação emissora também fornece o endereço MAC do dispositivo de destino, apesar da possibilidade do uso do endereço de difusão. O WSMP substitui os protocolos de transporte e de rede do modelo OSI, provendo um serviço de envio de datagramas à aplicação.

Outro diferencial dos padrões IEEE P1609.4 e IEEE 802.11p está nas modificações da subcamada MAC descrita no padrão IEEE 802.11 para utilizar os múltiplos canais de comunicação da arquitetura WAVE. Os pacotes de dados podem ter níveis de prioridades diferentes de acordo com categorias de acesso definidas no padrão IEEE 802.11 e.

### Diferenças entre IEEE 802.11 e 802.11p

No padrão IEEE 802.11, um conjunto de estações se comunicando entre si através de um ponto de acesso é denominado um conjunto básico de serviço, ou BSS (*Basic*

*Service Set*) [3] (Figura 2.5). O BSS controla o acesso a recursos e serviços do ponto de acesso e possibilita que uma interface de rádio filtre os quadros transmitidos por outras estações que não pertencem ao BSS. Para entrar em um BSS, uma estação deve primeiramente ouvir os quadros de sondas (*beacons*) transmitidos pelo ponto de acesso, e então executar diversos passos incluindo processos de autenticação e associação. Os usuários de uma rede IEEE 802.11 identificam um BSS através de uma SSID (*Service Set Identification*) anunciada nas sondas. Por outro lado, as interfaces de rádio identificam um BSS no nível MAC por meio do BSSID (*BSS Identification*). Cada BSS deve ser identificado por um BSSID único, que em uma rede infraestruturada é frequentemente o endereço MAC do ponto de acesso. No COTraMS, apresentado no Capítulo 4, optou-se por utilizar informações disponíveis nos quadros de sonda (*beacons*) enviados pelas unidades de acostamento a definir que as unidades de bordo deveriam fazer requisições do tipo *probe request*. Para isso foi necessário colocar a interface de rede no modo monitor, permitindo assim obter informações das redes mesmo sem estar associado à unidade de acostamento.

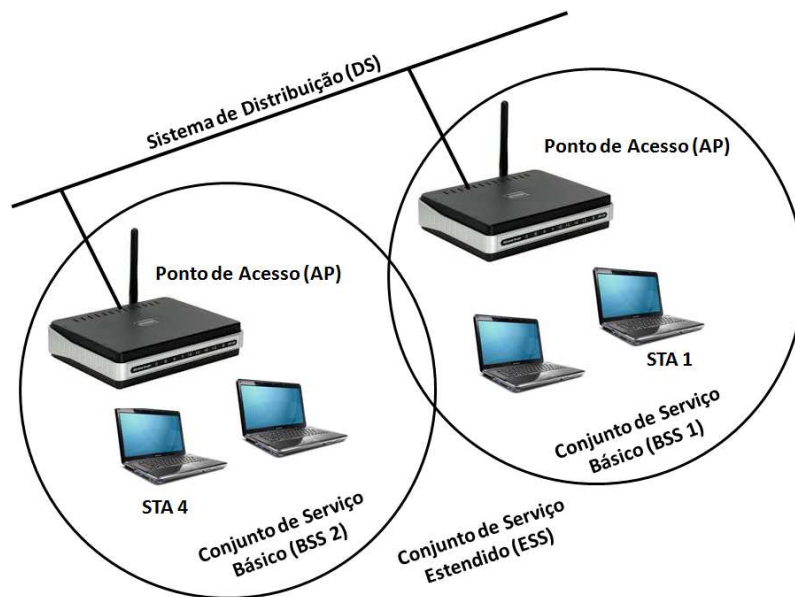


Figura 2.5: Arquitetura IEEE 802.11. Adaptado de [3]. Na Figura, a STA 1, localizada no BSS1, transmite para a STA4, no BSS2. Os dois BSSs contêm APs que estão conectados pelo DS “global”. Quando a STA1 envia uma mensagem, o dado primeiro passa pelo AP do BSS1. O AP encaminha o dado para o DSS, que encaminha o dado para o AP do BSS2. Uma vez dentro do BSS2, o dado é encaminhado para a STA4, o destino final.

A extensão IEEE 802.11p simplifica a entrada de um nó em um BSS (*Basic Service Set*) para atender à dinamicidade das redes veiculares. No padrão 802.11p, uma estação em modo WAVE pode transmitir e receber quadros de dados sem estar associado a um BSS, utilizando como identificador o BSSID coringa [1]. O

padrão IEEE 802.11 p define um novo tipo de BSS, o WAVE BSS, para reduzir o tempo de associação. Uma unidade de bordo ou de acostamento cria uma WBSS simplesmente enviando um quadro de anúncio, que pode ser repetido periodicamente ou não. Esse quadro contém todas as informações necessárias para que uma estação conheça os serviços oferecidos naquele WBSS e decida por se associar ou não. Caso outra unidade decida se associar, ela completa o processo de entrada em um WBSS baseada apenas na recepção de um quadro de anúncio. Desta forma, os processos de associação e autenticação de entrada em um BSS no padrão IEEE 802.11 original foram eliminados, reduzindo a sobrecarga de tempo. No padrão IEEE 802.11 p, o gerenciamento do grupo referente àquele WBSS, assim como a implementação de mecanismos de segurança, é deixado para as camadas superiores.

Outro desafio das redes veiculares é o emprego dos protocolos da camada de transporte desenvolvidos para as redes cabeadas. A adaptação do TCP ao ambiente sem-fio é o principal exemplo. Na tentativa de prover confiabilidade, falhas ocorrem principalmente devido às taxas de erro binárias elevadas, instabilidades do canal e mobilidade dos nós [61]. O resultado é uma queda brusca de desempenho do TCP por não diferenciar congestionamento de outros tipos de erro. Nas redes veiculares há o agravante de se ter tempos de contato curtos. A necessidade de estabelecer uma conexão entre origem e destino antes do TCP iniciar a transferência de dados é crítica já que essa fase pode ser maior que o tempo de contato entre os veículos.

Uma possível solução para problemas da camada de transporte em redes veiculares é o uso do UDP. Uma vez que o UDP não estabelece conexão e não faz controle de congestionamento nem de fluxo, o seu uso tem se tornado uma saída a curto prazo para as redes veiculares, sendo também recomendado no padrão IEEE 1609.3 [62]. No protótipo apresentado no Capítulo 4, utilizou-se o protocolo UDP para envio da informação da unidade de bordo para central de controle de dados, na arquitetura centralizada e da unidade de bordo para unidade de acostamento (e vice-versa) na arquitetura descentralizada.

### **2.1.2 Experimentos utilizando o padrão IEEE 802.11 p**

Paier *et al.* [63] investigam o impacto de parâmetros como o tamanho do pacote, taxa de dados e velocidade do veículo no alcance da comunicação V2I utilizando IEEE 802.11 p em rodovias. O estudo mostra que o aumento da taxa de dados pode notadamente reduzir o alcance da comunicação. O estudo não encontrou nenhum parâmetro que identificasse a influência da velocidade do veículo no alcance da comunicação. O aumento do tamanho do pacote diminuiu a estabilidade do enlace, no entanto, também não se observou influência no alcance.

Um dos primeiros trabalhos V2I em ambientes urbanos, utilizando IEEE 802.11p,

foi apresentado por Dickey *et al.* [64], em 2007. Dickey *et al.* concluem que existe uma alta relação de dependência entre o desempenho da transmissão e parâmetros como tamanho do pacote, intervalo na transmissão dos pacotes e taxa de dados. Gozalvez *et al.* [65] apresentam os resultados de extensos testes que analisaram o impacto de características urbanas, condições de instalação das unidades de acostamento e a qualidade da comunicação V2I utilizando IEEE 802.11 p. As conclusões mostram que características do cenário urbano, como veículos pesados, árvores e elevações no terreno afetam diretamente as comunicações V2I. Gozalvez *et al.* utilizaram duas unidades de acostamento portáteis, com um laptop equipado com um protótipo utilizando IEEE 802.11 p. As unidades de acostamento utilizaram antenas de 11 m de altura, com ganho de 12 dBi. A unidade de bordo utilizou uma antena omnidirecional, localizada no teto do veículo. Um GPS também foi utilizado para a definição da posição do veículo. Unidade de bordo e unidade de acostamento transmitiam, periodicamente, pacotes em *broadcast* no canal de controle do IEEE 802.11 p, no intervalo de frequência 5,9895-5,905 GHz, transmitindo a 6 Mb/s. Além do cabeçalho, faziam parte dos pacotes: data e hora, identificador do pacote, latitude e longitude e velocidade. No cenário onde se mediu a influência do tráfego de veículos na taxa de entrega de pacotes, 100% dos pacotes foram entregues, até a distância de 180 metros entre unidade de bordo e de acostamento, com e sem tráfego de veículos. A partir de 220 metros aproximadamente, no cenário com tráfego de veículos, a perda de pacotes chegou a 30%. No cenário sem tráfego de veículos, os mesmos 30% de perda de pacotes só aconteceram próximo aos 770 metros de distância entre unidade de acostamento e unidade de bordo. A influência dos obstáculos também fica clara no experimento apresentado na Seção 5.2.3, onde o utilizou-se o padrão IEEE 802.11 b/g.

Lin *et al.* [9] medem e analisam parâmetros como perda de pacotes, latência e atraso na propagação na comunicação utilizando o padrão 802.11 p. Foram utilizados aplicativos como `ping` e `iperf` para medir estes parâmetros. Nos cenários foi utilizada uma unidade de acostamento, enviando dados para uma unidade de bordo que se movia enquanto recebia os dados. Como esperado, o aumento da distância entre unidade de bordo e de acostamento resultou em perda de pacotes e aumento da latência. No entanto, segundo Lin *et al.*, a perda de pacotes a uma distância de 100 m é desprezível, com uma taxa de 0,12%, enquanto a uma distância de 150 m passa a ser considerável, com uma taxa de 66%. Com relação a latência, a distância até 100 m apresenta latência inferior a 1 ms. Já a 150 m, a latência sobe para cerca de 9 ms. Apesar da velocidade do veículo não influenciar no alcance da comunicação, como apresentado nesta seção, os resultados apresentados por Lin *et al.* apresentam um aumento tanto na perda de pacotes quanto na latência, de acordo com o aumento na velocidade do veículo, como mostra a Tabela 2.1. Como pode

ser observado na tabela, esse aumento é mais significativo na perda de pacotes e esta característica também foi observada nos experimentos que são apresentados no Capítulo 5.

Tabela 2.1: Resultados dos testes de V2I (Adaptado de [9]).

Teste	Velocidade (km/h)	Perda de pacotes (%)	Latência (ms)
1	20	27	Não avaliada
2	40	29	Não avaliada
3	60	31	Não avaliada
4	80	32	Não avaliada
5	100	33	Não avaliada
6	20	Não avaliada	4,367
7	40	Não avaliada	4,207
8	60	Não avaliada	4,273
9	80	Não avaliada	4,363
10	100	Não avaliada	5,030

As seções a seguir apresentam trabalhos relacionados às etapas necessárias para a detecção das condições da via, assim como projetos de pesquisa na área.

## 2.2 Monitoramento de Trânsito

Sistemas de monitoramento de veículos possuem baixo grau de exigência quanto à precisão na localização do veículo na via. Segundo Loureiro *et al.* [66], a margem de erro de sistemas de localização varia entre 10 e 30 m, margem esta muito superior à discrepância encontrada nos experimentos realizados utilizando os protótipos apresentados no Capítulo 3, que foi de 8 metros. Além disso, pequenas discrepâncias são compensadas pela previsibilidade da movimentação do nó cliente. No cenário proposto nesta tese, as unidades de acostamento estão próximas a via. Desta forma em algum momento a unidade de bordo vai estar próxima à unidade de acostamento, o que possibilita calcular esta distância.

### 2.2.1 Comportamento do Tráfego

Treiber *et al.* [67] apresentam um simulador de trânsito que tem por objetivo investigar o comportamento do fluxo de veículos. Os autores concluem que o fluxo de veículos não depende exclusivamente da estrutura da via, mas também do estilo de condução dos motoristas envolvidos. É possível verificar no simulador disponibilizado pelos autores na Web, que a propagação de um congestionamento ocorre numa velocidade constante, gerando efeito em todas as pistas, mesmo quando o problema



é pontual em apenas uma pista. Isto acontece porque os motoristas optam por trocar de pista, obrigando os outros motoristas que se aproximam a reduzir bruscamente a velocidade. Com base nestas informações, na presente tese, considera-se no cenário analisado que caso o tráfego em uma pista fique lento, os veículos irão provocar congestionamento aos poucos nas outras pistas, como mostram as Figuras 2.6, 2.7, 2.8 e 2.9. A Figura 2.6, apresenta o momento  $t_1$ , com fluxo normal nas duas vias principais e com poucos veículos tendo acesso por meio de uma pista secundária à direita. No momento  $t_2$ , ilustrado na Figura 2.7, um pequeno número de veículos acessando as vias principais por meio da via secundária já é suficiente para gerar pequenos congestionamentos uma vez que a velocidade destes veículos é muito menor que a velocidade dos veículos da via principal. Os veículos lentos ou parados estão em vermelho. Nos momentos  $t_3$  e  $t_4$ , Figuras 2.8 e 2.9, respectivamente, é possível verificar o resultado da redução de velocidade dos veículos das vias principais, gerando um congestionamento que reflete por toda extensão das vias. Os autores também concluem que o término do problema também reflete diretamente em todas as vias quase que imediatamente<sup>1</sup>. Baseado nessas informações, na presente tese, considera-se que um ou mais veículos só poderão apresentar velocidade muito superior aos demais nas seguintes situações: se houver uma pista seletiva ou se for um veículo preferencial, como carro de polícia ou ambulância.

No centro das Figuras 2.6, 2.7, 2.8, 2.9 é possível visualizar 11 parâmetros de configuração, que podem ser alterados em tempo de execução. Os parâmetros são:

- Número de veículos adicionados, por hora, na via principal;
- Número de veículos adicionados, por hora, que acessam a via principal por meio da pista secundária;
- Porcentagem de caminhões em meio aos veículos;
- Fator de cortesia, que define a taxa de cortesia ao permitir que novos veículos sejam adicionados pela via secundária;
- Limiar de mudança de pista;
- Fator de distorção de tempo;
- Limite de velocidade;
- Aceleração;
- Desaceleração;

---

<sup>1</sup>O tempo para que a condição melhore em toda a pista depende ainda de outros fatores como a velocidade de aceleração, critérios de segurança e comportamento dos motoristas, como cordialidade em ultrapassagens.

- Tempo entre a inclusão de cada veículo na via;
- Distância mínima entre os veículos.

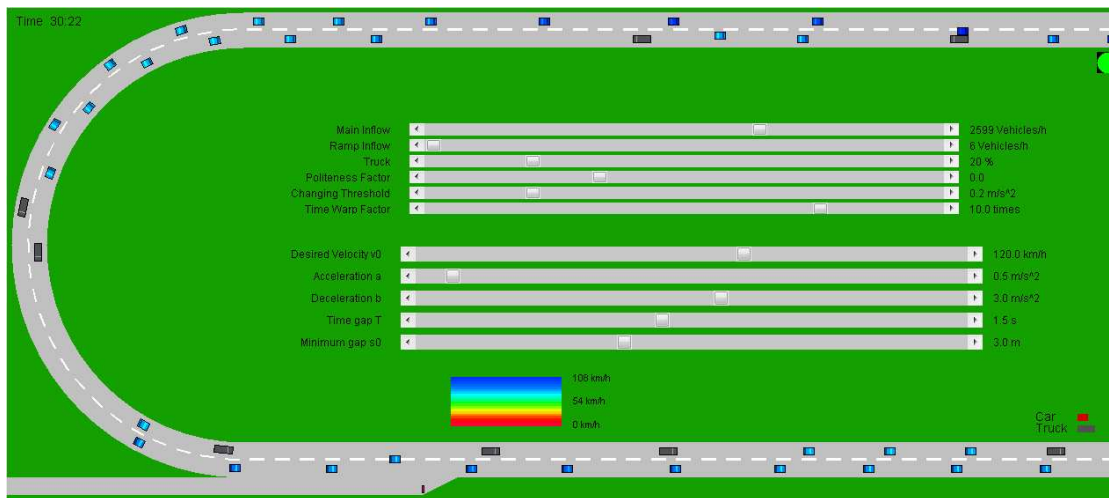


Figura 2.6: Trânsito livre - momento t1 [4].

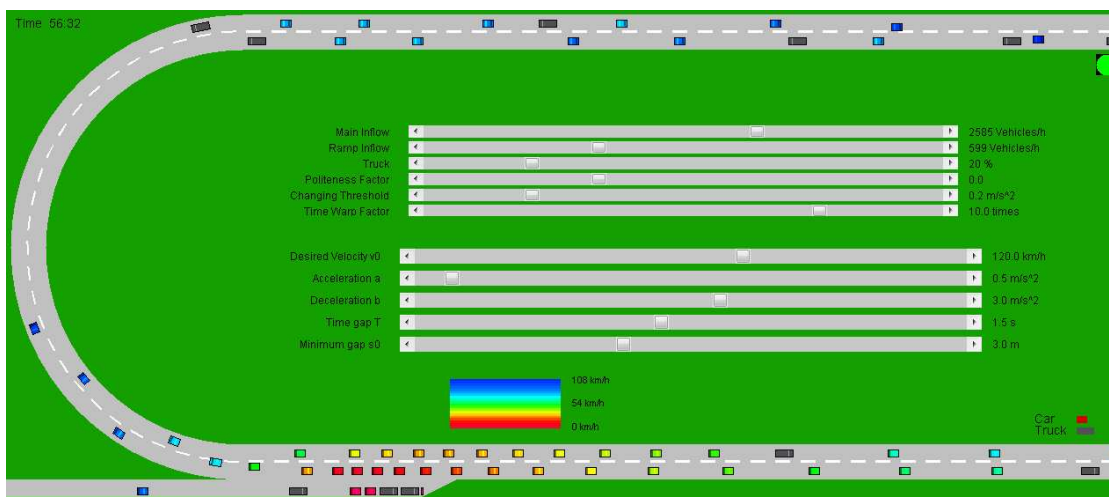


Figura 2.7: Inserção de veículos pela pista da direita - momento t2 [4].

## 2.2.2 Detecção da Movimentação e Localização do Veículo

Trabalhos como os de Yoon *et al.* [30] e de Mohan *et al.* [31] utilizam o GPS para definir a movimentação e localização do veículo na via. A desvantagem de utilização do sistema GPS é a dependência de outra tecnologia para enviar as informações sobre a localização do veículo para uma central de dados, por exemplo. O GPS apresenta, além das áreas de sombra, como túneis, problemas com cenários que contenham viadutos. Dispositivos que utilizam o Sistema de Navegação Global por meio de Satélite (GNSS - *Global Navigation Satellite System*) não fazem distinção entre vias de um viaduto.

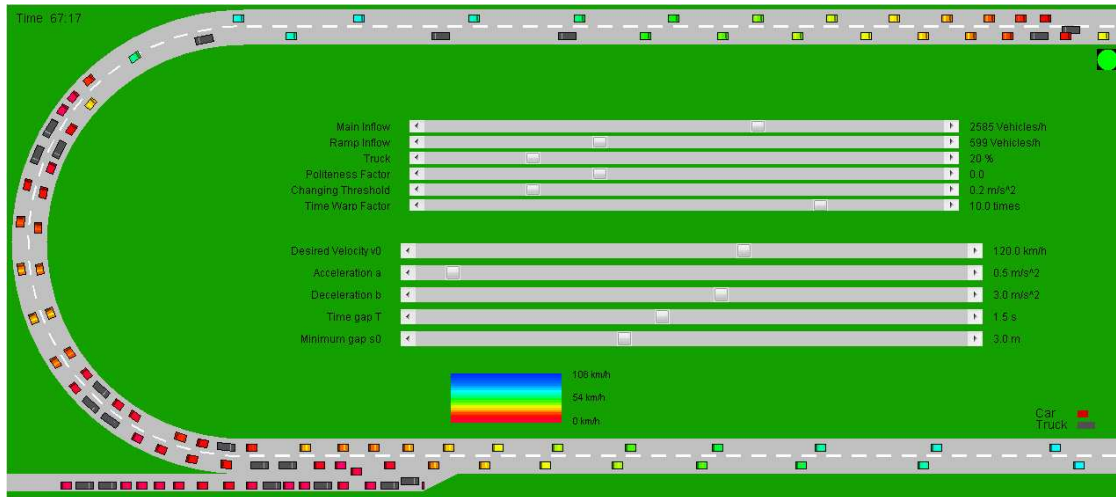


Figura 2.8: Reflexo em todas as pistas - momento t3 [4].



Figura 2.9: Problema se reflete em toda a via - momento t4 [4].

No COTraMS, as vias são identificadas por meio do ESSID (nome da rede). A unidade de bordo possui localmente informações sobre os trechos da via em que o veículo está e também sobre o trecho atual. Desta forma, é possível saber previamente qual o endereço da próxima unidade de acostamento. Desta forma, no COTraMS, as informações sobre outras vias (enviadas que cheguem à unidade de bordo serão ignoradas em trechos como viadutos.

Kwong *et al.* [22] propõem um sistema para estimar, em tempo de execução, o tempo necessário para atravessar um segmento da via com seis interseções. Utilizando sensores magnéticos na via, o sistema mede a capacidade da via baseado especialmente no volume de veículos. Apesar do cenário tratado em San Pablo, Albany, CA, ser de apenas 1.5 km, um diferencial do cenário é contar com semáforos, o que torna o monitoramento mais complexo. O sistema também apresenta uma proposta para identificação do veículo que utiliza assinaturas baseadas em padrões obtidos por sensores magnéticos. Os dados são enviados para uma central por meio de equi-

pamentos sem-fio, conectados aos sensores por fibra óptica. Como apresentado no Capítulo 1, o uso de sensores magnéticos apresenta um alto custo de implantação e manutenção, diferentemente das arquiteturas propostas que apresentam um custo mais de 8 vezes inferior.

## 2.3 Projetos Relacionados

O projeto Dieselnet [38] da Universidade de Massachusetts em Amherst, nos Estados Unidos, consiste em uma rede formada por 40 ônibus da cidade de Amherst, cobrindo uma área de aproximadamente 240km<sup>2</sup>. Os ônibus ligam-se uns aos outros de forma intermitente e são equipados com computadores com recursos limitados conectados a três rádios IEEE 802.11b: um ponto de acesso para prover acesso DHCP aos passageiros e transeuntes, uma interface que constantemente procura outros ônibus e anúncios DHCP e um rádio de longo alcance que permite a comunicação com as estações receptoras das informações coletadas. Além disso, um dispositivo GPS registra periodicamente o horário e a localização de cada ônibus. O software embarcado permite realizar atualizações das aplicações e capturar informações sobre a mobilidade dos ônibus, a conectividade entre AP e ônibus e vazão da rede. Para aumentar a conectividade entre os nós móveis da Dieselnet, foram projetados *throw-boxes* (kits para coleta) que funcionam como roteadores estacionários, armazenando e enviando dados entre os ônibus. Os kits são colocados em prédios ao longo das rotas dos ônibus e utilizam baterias ou energia solar para funcionar.

Propostas de Femminela *et al.* [68] e Drevelle *et al.* [69] buscam melhorar a precisão do GPS em áreas metropolitanas, áreas com grande população, áreas industriais e comerciais. Femminela *et al.* fazem uso de técnicas que combinam os dados obtidos via GPS com dados obtidos via IEEE 802.11. Esses dados terrestres são tratados na forma de um satélite virtual, permitindo assim o cruzamento com dados obtidos via outros satélites. Drevelle *et al.* propõem o iGPS, uma abordagem que agrega dados obtidos por GPS combinados hermeticamente com um modelo preciso da via no formato 3D. Na aplicação proposta nesta tese não é exigido um alto grau de precisão quanto a localização do veículo na via. Pequenas discrepâncias, apresentadas nesta tese, de até 8 metros, são minimizadas uma vez que o deslocamento do veículo segue a trajetória da via. Desta forma, nos protótipos desenvolvidos para teste, não foi necessário o uso de GPS nas unidades de bordo.

No projeto *DTN for Urban Environment* [5], desenvolvido na NUS (*National University of Singapore*), os nós clientes (pedestres e veículos) utilizam o sinal da rede IEEE 802.11 NUSOPEN para enviar sua localização. Quatorze ônibus foram equipados com roteadores LinkSys WRT54GL, ou superiores, para fazer o papel de clientes móveis. O projeto disponibiliza uma interface Web para visualizar a

localização dos ônibus, ilustrada na Figura 2.10. Assim como nesta tese, não há garantias de continuidade de conexão pois os pontos de acesso estão distantes uns dos outros. Apesar de o citado projeto utilizar uma infraestrutura pública já disponível para o envio de dados de localização por parte dos clientes, diferente desta tese, cada um dos pontos de acesso possui uma conexão independente com a Internet, elevando consideravelmente os custos de instalação e manutenção, principalmente quando comparado à arquitetura descentralizada.



Figura 2.10: Interface Web - *DTN for Urban Environment*. É possível visualizar os pontos de ônibus nas vias monitoradas. Os círculos destacam a localização de dois ônibus que participam do projeto (Reproduzido de [5]).

VTrack [36], por sua vez, se propõe a rastrear veículos, estimar tempos de viagem entre dois pontos e identificar gargalos no trânsito. Assim como no COTraMS, o VTrack também não exige que o cliente use GPS, apenas o IEEE 802.11. A proposta do projeto é fazer a localização dos veículos baseada em redes IEEE 802.11, especialmente em áreas sem cobertura de sinal GPS. O objetivo é obter a localização do veículo na via e estimar atrasos no trânsito. Diferente da arquitetura descentralizada, proposta nesta tese, VTrack é dependente de uma central de processamento para inferir as condições de trânsito, baseado nas informações enviadas pelos veículos.

Outros sistemas de monitoramento de trânsito em cidades dos Estados Unidos

são: Caltrans, sistema de monitoramento de trânsito da Califórnia [27], que usa sensores na via; AirSage [70], que obtém informações do veículo via rede celular; Yahoo Maps [34] e Microsoft Live Search Maps [35], que obtém informações utilizando a localização dos usuários conectados às ferramentas de bate-papo [71]. Diferente dos sistemas da Yahoo, Google [32] e Microsoft, esta tese tem como um dos requisitos manter o anonimato do usuário do nó cliente, não dependendo de armazenamento de qualquer informação específica do usuário, apenas do equipamento. Além disso, o monitoramento do equipamento está restrito à via, enquanto estes sistemas monitoram o usuário durante todo o dia.

O Google Maps é uma ferramenta que disponibiliza condições de trânsito em tempo real em cidades do Brasil, Estados Unidos, França, Grã-Bretanha, Japão, entre outros [32]. Para detectar a posição dos usuários que possuem o sistema Android no *smartphone*, três estratégias são utilizadas: uso do GPS, onde a precisão depende de fatores citados anteriormente como características do cenário; uso de redes IEEE 802.11 previamente mapeadas, rede na qual o usuário esteja conectado no momento e baseado na localização da torre de celular na qual o usuário esteja conectado, sendo esta última com baixa precisão uma vez que a área de cobertura é ampla [72]. O Google Maps utiliza cores para indicar as velocidades do tráfego nas vias de alta velocidade. A cor verde indica velocidade maior que 80 km/h, amarelo entre 40 e 80 km/h, vermelho menor que 40 km/h e vermelho e preto para trânsito muito lento. Nas pequenas vias, as cores indicam condições gerais do tráfego: verde significa condições boas, amarelo significa condições médias e vermelho, ou vermelho e preto, significa que o tráfego está ruim. Essa ferramenta também provê informações sobre períodos específicos de tempo, baseado em dados históricos. As condições das vias são baseadas na velocidade em que os usuários do sistema Android (que concordam com a divulgação da sua localização) se deslocam na via. Na arquitetura descentralizada proposta nesta tese, não há a necessidade de estar conectado à Internet para que as condições dos trechos sejam geradas e divulgadas para os veículos na via. O COTraMS disponibiliza também as informações sobre a via na forma de texto (tabela), como mostrado no Capítulo 4, possibilitando a participação e o acesso a usuários com equipamentos com poucos recursos gráficos. No Google Maps, a opção para a visualização das informações sem o mapa é requisitar via API (*Application Programming Interface*), onde os resultados são retornados no formato XML (*Extensible Markup Language*).

Waze [73] é uma aplicação de monitoramento de tráfego online para *smartphones*. As informações sobre a localização e movimentação das unidades de bordo são obtidas via GPS. As condições das vias são disponibilizadas em uma rede social formada por usuários do aplicativo.

Além do IEEE 802.11 b/g, utilizado no COTraMS, as arquiteturas propostas

nesta tese suportam outros tipos de sensores para definição da localização e movimentação das unidades de bordo, como GPS ou sensores do veículo.

A Tabela 2.2 apresenta um quadro comparativo geral entre as principais características dos sistemas de monitoramento apresentados.

Tabela 2.2: Comparação entre as principais características dos sistema de monitoramento. Apenas o COTraMS, na arquitetura descentralizada, não depende de uma central de controle para gerar as condições em cada trecho.

Referência	Sistema de Localização	Sistema de Envio	Consumo	Privacidade	Custo
[30]	GPS	GSM	Alto	Baixa	Médio
[31]	GPS	3G/802.11	Alto	Baixa	Médio
[22]	Sensor	-	-	Alta	Alto
[38]	GPS	802.11	Alto	Média	Médio
[68]	GPS+802.11	-	Alto	-	Médio
[69]	GPS	-	Alto	-	Médio
[5]	GPS	802.11	Alto	Média	Médio
[36]	GPS	802.11	Alto	Média	Médio
[34]	GPS	3G	Alto	Baixa	Médio
[32]	GPS	3G/802.11	Alto	Baixa	Médio
[35]	GPS	3G	Alto	Baixa	Médio
[27]	Câmera	-	-	Média	Alto
[70]	Celular	3G	Baixo	Baixa	Médio
[73]	GPS	3G	Alto	Baixa	Médio
[37]	802.11	802.11	Médio	Alta	Médio
COTraMS	802.11	802.11	Médio	Alta	Médio

### 2.3.1 Consumo de Energia em *Smartphones*

O sistema proposto é colaborativo pois depende da participação de nós móveis, portadores de *smartphones* ou *laptops*. Estes nós podem estar em transportes públicos, por exemplo, onde usuários não têm acesso a outra fonte de energia além da bateria. Neste cenário, o tempo de duração da bateria destes equipamentos passa a ser relevante. Apesar de o consumo de energia não ser o foco desta proposta, este foi um parâmetro importante para o desenvolvimento do COTraMS, apresentado no Capítulo 4.

Caroll *et al.* apresentam um teste comparativo de consumo de energia entre os dispositivos que compõem três modelos de *smartphones* [46]. O consumo dos dispositivos de rede IEEE 802.11 e GPRS (sistema GSM) foi testado a partir da execução de clientes HTTP (*HyperText Transfer Protocol*). Para testar o IEEE 802.11 usou-se um arquivo de 15 MB e para testar o GPRS utilizou-se um arquivo de 50 kB. Com

uma taxa de transferência de 36,8 kB/s, o consumo utilizando o IEEE 802.11 foi de 352,8 mW enquanto utilizando o GPRS, que transmitiu a 1,0 kB/s, o consumo foi de 429 mW, excluindo o gasto com o visor. Acredita-se que os autores utilizaram tamanhos de arquivos diferentes na busca para medir o consumo em um tempo de transmissão similar, dada a taxa de transmissão alcançada. Outro teste foi feito para medir o consumo e a vazão colocando os equipamentos dentro de uma caixa blindada, gerando assim perda na potência do sinal transmitido. O GPRS apresentou um consumo 30% maior, sem alteração na vazão e com queda de 10 dBm na potência do sinal. O dispositivo IEEE 802.11 apresentou uma perda de 2 dBm e nenhuma alteração na vazão nem no consumo de energia. No teste de envio de e-mail, foram recebidos cinco e-mails, sendo um deles com um anexo de 60 kB. O uso do GPRS apresentou um consumo de 610 mW enquanto o IEEE 802.11 apresentou um consumo de 432,3 mW, excluindo o gasto com o visor. O GPS, além do uso do visor, faz uso do processador para atualização dos mapas e posição (coordenadas). O consumo aumenta quando as informações dos mapas são acessadas em uma memória local, como um cartão *flash* que tem um consumo de 2,2 mW para escrita e 21,1 mW para leitura. O consumo de energia dos dispositivos é relevante para a tese uma vez que entre os nós clientes estão equipamentos com período de funcionamento limitado à carga disponível na bateria.

Kalic *et al.* [74] apresentam um estudo de medição do consumo de energia e transferência ao usar Bluetooth, IEEE 802.11 e tecnologias de comunicação 3G em celulares com Android. O artigo apresenta a relação entre o consumo de energia e o tempo decorrido, bem como entre o consumo de energia e a quantidade de dados transferidos. As medições foram realizadas em um aparelho HTC Desire Telefone HD rodando o sistema operacional Android versão 2.3. Os autores desenvolveram uma aplicação para enviar e receber dados continuamente enquanto monitoravam a porcentagem de bateria restante. O aplicativo também registrava a quantidade de dados transferidos, além do tempo decorrido. Numa primeira análise, IEEE 802.11 e 3G tiveram um consumo médio similar, porém a interface 802.11 transferiu um volume muito maior de dados. Enquanto a interface IEEE 802.11 atingiu um volume de 5,91 GB de download e 5,66 GB de upload, a interface 3G transferiu 3,04 GB em download e 1,42 em upload, perdendo inclusive para o *bluetooth*. Como visto, apenas o uso do 3G já foi suficiente para equivaler ao consumo do IEEE 802.11. Porém, em sistemas que usam o GPS, deve-se ainda somar o consumo necessário para definir a localização do veículo.

Perrucci *et al.* [75] e Rice *et al.* [76] também apresentam testes de consumo de energia comparando 3G e IEEE 802.11, com conclusões similares a Kalic *et al.*, onde o consumo de energia é similar mas a taxa de transmissão do IEEE 802.11 é muito superior.



Outro projeto que considera o desafio associado ao consumo de energia e à precisão dos sensores é o VTrack [36]. Segundo os resultados do projeto, o uso do GPS faz com que a autonomia da bateria do *smartphone* seja até três vezes menor se comparado ao uso do IEEE 802.11. Vale ressaltar que o GPS serve apenas para definir a localização do veículo, sendo necessário o uso de uma interface de rede para enviar os dados.

### 2.3.2 Sensoriamento Urbano e Uso de Smartphones

Por depender da unidade de bordo para obter informações sobre a via, algum benefício pode ser oferecido ao usuário que colabora com o sistema. Esse processo colaborativo em troca de benefício social, monetário ou que resulte em melhoria na qualidade de vida é necessário para projetos que considerem o sensoriamento urbano (*urban sensing*) [77, 78]. No cenário em que o COTraMS é aplicado, a estrutura de rede pode ser utilizada para uma série de outras aplicações que beneficiem os usuários como, acesso à Internet na via e no entorno, previsão de chegada de ônibus, serviço de notícias ou definição de pontos de apoio. Além do aproveitamento da rede, o uso de equipamentos como *smartphones* pode auxiliar, por exemplo, na detecção do meio de transporte utilizado, fazendo uso dos sensores disponíveis no equipamento.

Outras propostas na literatura fazem uso de *smartphones* para a coleta de dados [79]. Mohan *et al.* [31] usam diversos tipos de sensores existentes em *smartphones*, como GPS, acelerômetro ou microfone, para detectar freadas bruscas, acelerações, lombadas, buracos e nível de ruído e determinar as condições das estradas e do tráfego. Lin *et al.* [80] também fazem uso dos sensores de *smartphones* para medir o nível de conforto dos passageiros em transportes públicos. Lin *et al.* analisam as informações dos sensores de vários usuários em conjunto de forma a encontrar padrões que permitam definir se os usuários estão dentro do mesmo meio de transporte e até mesmo diferenciar um meio de transporte de outro. Como nas arquiteturas propostas nesta tese não é possível definir se um usuário está em um carro ou em um ônibus, por exemplo, a proposta de Lin *et al.* poderá ser implementada futuramente para a definição do meio de transporte utilizado.

Projetos como o de Herrera *et al.* [81], tem por objetivo aprender os padrões de tráfego com base em dados históricos e desta forma, estimar os fluxos de tráfego e as condições futuras em alguns segmentos de estrada. Os autores utilizam celulares com GPS dentro dos veículos pra definir a trajetória. Para o envio dos dados, utiliza-se rede celular. Um servidor *proxy* rodando um sistema de monitoramento é responsável por receber as informações e gerar as condições da via. Os autores utilizaram técnicas de encriptação de dados. Os dados coletados são usados para estimar a condição da via por meio da velocidade média e do tempo de viagem. A

central gera as condições da via e divulga via Internet. O COTraMS não utiliza GPS e nem a rede celular. O objetivo é minimizar o consumo de bateria e evitar custo para o usuário final. Nesta tese também é proposta uma arquitetura que não depende de uma central de controle para que sejam geradas e divulgadas as condições de trânsito.

Tornell *et al.* desenvolveram uma aplicação para auxílio à segurança do motorista, utilizando a arquitetura V2V com GPS [82]. A aplicação é baseada na disseminação de mensagens de aviso entre as unidades de bordo, que utilizam a interface de rede no padrão IEEE 802.11g. Os autores utilizam dois *smartphones* em veículos diferentes e enviam 200 mensagens de aviso. Ao fim, contam o número de mensagens recebidas. Segundo os autores, a probabilidade de recepção varia de acordo com a distância. Desta forma, a probabilidade de recepção diminui a medida que aumenta a distância. Para os autores, uma distância é ótima quando a probabilidade de recepção é de 40%. Desta forma, os autores definiram uma distância máxima de 100 m. Sanguesa *et al.* [83] também utiliza a arquitetura V2V para estimar a densidade de veículos por meio de disseminação de mensagens. A densidade de unidades de bordo vizinhas é estimada a partir do número de *beacons* recebidos. Para análise, utilizou-se o simulador NS-2, modificado para suportar o padrão IEEE 802.11p. Sanguesa *et al.* analisam a importância da densidade de veículos na distribuição das mensagens. Segundo os autores, em cenários com veículos em movimento, o tempo de recepção das mensagens diminui a medida que aumenta a densidade de veículos. Em um experimento com 300 veículos, 50% dos veículos receberam a mensagem em 20 segundos de simulação, enquanto em um cenário com 500 veículos, para que 50% dos veículos recebessem a mensagem foram necessários 15 segundos. No cenário com 1000 veículos, levou apenas 1 segundo para que 50% dos veículos recebessem as mensagens. Isso acontece porque a propagação por inundação funciona melhor com alta densidade de veículos. No entanto, em cenários congestionados, o sistema requer menos tempo para informar a 90% dos 900 veículos (7 segundos) do que a 90% dos 1000 veículos (9 segundos). Isso acontece devido a excessiva contenção do canal e alto número de colisões. As arquiteturas propostas nesta tese, diferentemente, fazem uso de uma arquitetura infraestruturada, o que evita múltiplos saltos e não é dependente de um número mínimo de veículos para que a informação chegue ao destino.

O projeto Drive-thru Internet [37], desenvolvido pela Universidade de Tecnologia de Helsinque, tem como objetivo prover acesso à Internet a usuários em veículos trafegando dentro de uma cidade, em vias de alta velocidade. Pontos fixos de acesso à Internet, utilizando a tecnologia IEEE 802.11, são espalhados de forma que estejam interconectados provendo tanto serviços locais quanto acesso à Internet. Em função do acesso intermitente obtido pela passagem pelos pontos de acesso (no pro-

jeto Drive-thru), Ott e Kutscher [84] desenvolveram o protocolo PCMP (*Persistent Connection Management Protocol*), que habilita sessões de comunicação de longa duração na presença de conectividade intermitente. Desta forma, as conexões entre as unidades de acostamento e entre unidades de acostamento e de bordo podem ser perdidas sem afetar a persistência da sessão. A sessão pode ser restabelecida no momento em que houver conectividade. O Drive-thru atua nas camadas de aplicação e transporte e não na camada de rede, o que permite suportar a falta de conexão por períodos mais longos. Diferentemente, na arquitetura centralizada proposta nesta tese não é necessária a criação ou modificação de nenhum protocolo entre unidade de bordo e central de controle.

### 2.3.3 Soluções para Autonomia de Energia nas Unidades de Acostamento

Um diferencial da arquitetura descentralizada é a possibilidade de fazer o monitoramento de vias mesmo em áreas remotas, fora de cidades e sem cobertura de celular ou mesmo sem rede de energia. Na arquitetura descentralizada, não há a necessidade de conectar as unidades de acostamento a uma central de controle ou mesmo que haja conexão entre eles. Esta arquitetura torna a estrutura de rede menos complexa e com um custo bem inferior a propostas que dependem de uma conexão entre os elementos fixos. Os parágrafos a seguir apresentam alguns dos trabalhos relacionados considerando a autonomia de energia nas unidades de acostamento.

O SolarMESH [85] é um projeto de uma rede em malha sem-fio IEEE 802.11 desenvolvido, desde 2002, pelo Grupo de Redes sem-fio da Universidade McMaster, no Canadá. O projeto SolarMESH provê um sistema de comunicação sem-fio em ambiente aberto alimentado por energia solar. O objetivo desse projeto é interligar os prédios da universidade por meio de uma rede de comunicação sem-fio em malha e disponibilizar cobertura IEEE 802.11 para o Campus. Os principais destaques são a facilidade na instalação e o baixo custo na implantação do sistema, uma vez que não é necessária a instalação de cabeamento elétrico nem de dados (*Ethernet*), para prover conexão. A solução desenvolvida pelo SolarMESH serviu como referência para o desenvolvimento das unidades de acostamento usadas no projeto ReBUS [6].

O projeto ReMesh [86] foi executado pelo TET (Departamento de Engenharia de Telecomunicações da UFF) e pelo IC (Instituto de Computação da UFF). O ReMesh implantou uma rede de acesso em malha ao redor dos diversos *campi* da UFF, na cidade de Niterói, possibilitando que alunos, funcionários e professores tivessem acesso sem-fio gratuito à Internet na universidade e em sua vizinhança. O projeto ReMesh desenvolveu um protótipo de `kit mesh` que usa energia solar para alimentar roteadores sem-fio e também serviu como base para o desenvolvimento

das unidades de acostamento do Projeto ReBUS, descrito a seguir.

O ReBUS [6] foi um projeto desenvolvido por alunos e professores do GTA (Grupo de Telemática e Automação), da UFRJ e por professores da UFF. O objetivo do ReBus era projetar e implementar um novo serviço de acesso à Internet nas instituições servidas pela RNP (Rede Nacional de Ensino e Pesquisa), em especial as universidades. Para isso foi desenvolvido um protótipo de rede móvel de acesso à Internet através de redes veiculares interconectadas a uma rede em malha sem-fio. Através de dispositivos portáteis equipados com interfaces IEEE 802.11, os usuários podem utilizar recursos como envio de mensagens e recebimento de conteúdo de dentro dos ônibus de circulação interna que frequentemente servem os alunos e professores nos campi universitários. Utilizou-se a estrutura física instalada para o ReBus no Campus do Fundão, na UFRJ, para experimentos desta proposta de tese. Deste projeto foram retiradas as especificações técnicas para a montagem das unidades de acostamento, como descrito no Capítulo 5, a fim de permitir o uso do sistema proposto mesmo em locais onde não existam pontos de energia.

Cada unidade de acostamento do projeto ReBus (Figura 2.11) é composta por um roteador D-Link modelo DIR-320, uma antena externa omnidirecional (2,4 GHz e 12 dBi), um pendrive USB 2.0 de 32 GB, um circuito regulador de tensão, um módulo solar fotovoltaico, um controlador de carga, três baterias de 12V/7 Ah e uma caixa hermética de aço (40 x 30 x 20 cm). Como é possível observar na (Figura 2.12), o roteador é alimentado por um módulo solar fotovoltaico com potência nominal de 43 W, corrente nominal de 2,48 A e tensão nominal de 17,4 V. Três baterias recarregáveis seladas de 12 V/7 Ah são usadas para alimentar o nó fixo. O painel solar é responsável por carregar as baterias durante o dia. Para a conexão entre o painel solar, as baterias e o roteador, é utilizado um controlador de carga de 12 V, especificado para uma energia solar nominal de entrada de 10 A de entrada, carga nominal de até 10 A, com carregamento de bateria recarregável por PWM (*Pulse-Width Modulation*) com desligamento automático de carga LVD (*Low Voltage Directive*) em 11,5 V e religamento em 12,6 V e temperatura de operação entre -40 e +85°C. O controlador tem basicamente três funções: (1) equilibrar as cargas entre o painel (que pode ter tensão de pico de até 16 V) e as baterias (carga nominal máxima 13,4 V), (2) manter a carga nas baterias enquanto o painel gera energia suficiente para que o roteador funcione e (3) evitar que a bateria fique totalmente sem carga cortando a energia da saída do controlador, desligando assim o roteador, quando a bateria atingir uma carga inferior a 11,5 V, aumentando assim a vida útil da bateria.

A unidade de acostamento adaptada para os experimentos na UFRJ é apresentada na Seção 5.7.



Figura 2.11: Unidade de Acostamento do Projeto ReBus.

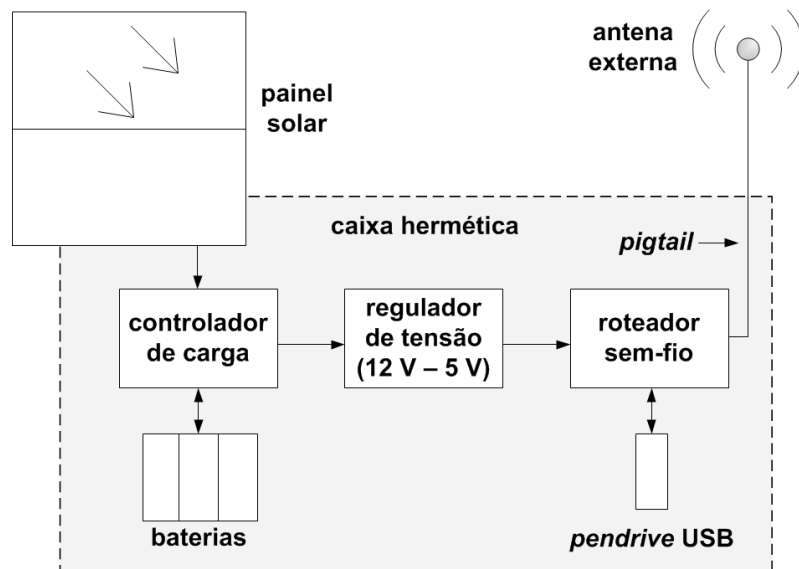


Figura 2.12: Esquemático do nó fixo [6].

### 2.3.4 Escoamento de Trânsito

Jariyasunant *et al.* [87] apresentam um sistema para planejamento de rota que tem por objetivo encontrar o menor caminho entre origem e destino. O sistema se baseia na informação enviada por unidades de bordo que possuem GPS e rodam uma aplicação desenvolvida para Iphone. Para envio das informações o cliente utiliza a rede celular. O sistema possui uma central de controle responsável por definir a rota baseado na posição atual, no destino e nas informações enviadas por ônibus. Diferentemente do sistema proposto nesta tese, que é independente de plataforma, os dados coletados apenas por ônibus podem não retratar a realidade, especialmente

em vias que possuem corredores exclusivos para transportes públicos como ônibus e táxis. Nesta faixa exclusiva, cada vez mais comum nas vias das grandes cidades, esses veículos normalmente atingem uma velocidade muito superior às demais pistas, especialmente em horários específicos como na parte da manhã, final de tarde e véspera de feriados. Outra diferença é que no COTraMS o usuário final não tem nenhum custo para fazer o envio das informações.

O projeto CarTel [26], desenvolvido pelo MIT (*Massachusetts Institute of Technology*), é um sistema projetado para coletar, processar, distribuir e visualizar dados de sensores localizados em nós móveis, como carros. O objetivo é modelar o tráfego de uma área, permitindo definir rotas alternativas caso problemas sejam detectados. Para isso, cada nó possui um computador de bordo, semelhante a um celular, acoplado a um conjunto de sensores. Cada nó recolhe e processa as leituras localmente antes de enviar os dados para uma central, por meio de redes IEEE 802.11, onde os dados são armazenados em um banco de dados para posterior análise e visualização. O CarTel conta com cerca de 50 veículos em circulação, sendo 40 táxis, em Boston - EUA. Assim como no cenário desta proposta de tese, todas as unidades de acostamento utilizam o mesmo ESSID, o que significa que durante a movimentação do veículo só acontece transição entre BSSs do mesmo ESSID. Desta forma, o processo de reassociação entre ponto de acesso e STA (*station*) é transparente para o usuário [3]. No entanto, o projeto CarTel [26] utiliza o GPS para definição da localização do veículo enquanto o COTraMS utiliza dados da própria rede IEEE 802.11.

Este capítulo apresentou os trabalhos e projetos relacionados ao tema proposto nesta tese, monitoramento de trânsito. O Capítulo 3 apresenta maiores detalhes das arquiteturas propostas no COTraMS. Serão apresentados os algoritmos de funcionamento de unidades de acostamento e de bordo, sem considerar uma tecnologia específica. Diferentemente, no Capítulo 4 são apresentados os detalhes do COTraMS voltados para um cenário que utiliza o padrão IEEE 802.11 b/g nas unidades de acostamento e de bordo.

## Capítulo 3

# Arquiteturas para Monitoramento de Trânsito: Centralizada e Distribuída

Este capítulo apresenta em maiores detalhes as arquiteturas propostas para o monitoramento de trânsito: Centralizada e Descentralizada. A arquitetura centralizada é composta por unidades de bordo (UnB), unidades de acostamento (UnA) e uma central de controle. A principal vantagem desta arquitetura está no fato de não ser necessária nenhuma modificação nos elementos que formam a infraestrutura entre a unidade de bordo e a central de controle. A arquitetura descentralizada é composta apenas por unidades de bordo e unidades de acostamento. A arquitetura descentralizada é mais indicada para vias onde não existe infraestrutura de rede elétrica ou cobertura celular, uma vez que não há necessidade de conectar as unidades de acostamento a uma central de controle. Esta característica reduz os custos de implantação e manutenção.

### 3.1 Requisitos Básicos

Os requisitos básicos, em ambas arquiteturas, são: o mapeamento da posição geográfica das unidades de acostamento, uma vez que é necessário conhecer a extensão<sup>1</sup> de cada trecho, e a participação das unidades de bordo, executando a aplicação cliente. À arquitetura centralizada, soma-se a necessidade de uma central de controle, responsável por receber as informações das unidades de bordo, calcular e divulgar as condições de trânsito na via.

Na arquitetura descentralizada, as unidades de acostamento são responsáveis por fazer a atualização e envio das TCTs (Tabelas de Condições dos Trechos) para as

---

<sup>1</sup>O uso do GPS elimina este requisito. No entanto, conhecer previamente a extensão do trecho agiliza o processo já que evita o cálculo em tempo de execução.

unidades de acostamento que entram na área de cobertura.

As duas arquiteturas utilizam o conceito de trecho. Trecho é considerado a região de uma via entre duas unidades de acostamento, como pode ser observado na Figura 3.1.

As seções a seguir detalham o funcionamento das arquiteturas propostas.

## 3.2 Arquitetura Centralizada

Nesta arquitetura, unidades de bordo são responsáveis por detectar o momento em que passam próximo a uma unidade de acostamento e por enviar este momento para a central de controle. A central de controle é responsável por organizar as informações obtidas via unidades de bordo e, após comparar com as informações locais sobre as características de cada trecho, gerar as informações sobre as condições de trânsito. Em seguida, a central divulga, periodicamente, as informações sobre toda a via. A Figura 3.1 apresenta os elementos da arquitetura proposta.

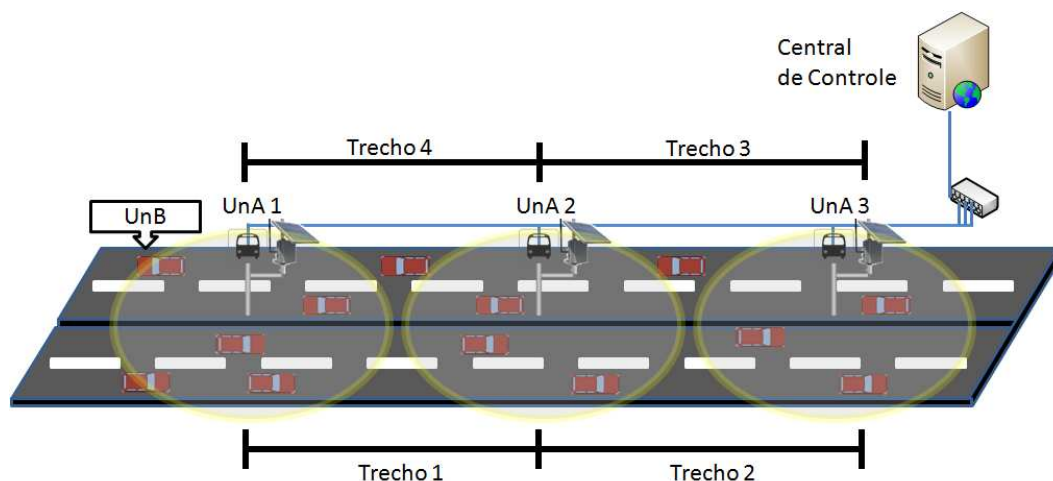


Figura 3.1: Elementos da arquitetura Centralizada: unidades de bordo (UnB), unidades de acostamento (UnA) e central de controle.

### 3.2.1 Algoritmo da Central de Controle

A central de controle é o elemento responsável por calcular as condições do trânsito nos trechos da via. O funcionamento do algoritmo independe da tecnologia adotada para interligar as unidades de bordo à central de controle. Esta ligação está mais relacionada ao funcionamento da rede e ao custo do projeto, que não é o foco desta tese. Caso se queira divulgar as condições de trânsito para elementos localizados fora da via, é necessário conectar a central de controle à Internet.

O primeiro requisito do algoritmo é conhecer a posição das unidades de acostamento para em seguida calcular a extensão de cada trecho, ou seja, a distância entre



as duas unidades de acostamento do trecho (Figura 3.1). Para definir a posição das unidades de acostamento e calcular a distância entre as unidades, utilizou-se a API do Google Maps, que é um serviço gratuito do Google [32]. Nesta ferramenta, define-se as coordenadas geográficas de cada unidade de acostamento, define-se a origem e o destino, para então calcular a distância considerando características da via como curvas e sentido da via. A interface retorna a distância no trecho no formato XML. Este é o primeiro parâmetro de entrada do algoritmo. A definição destes trechos foi necessária tanto para os experimentos na Avenida Brasil quanto nas simulações, ambos apresentados no Capítulo 5. Para cenários com terrenos planos, uma função bastante usada em sistemas de navegação para calcular a distância entre as unidades é a função de Haversine [88].

Outro parâmetro de entrada para o algoritmo é o instante em que a unidade de bordo passa próximo a cada unidade de acostamento. Com base nestes dados, a velocidade média do veículo  $x$  no trecho  $y$  é calculada usando a Equação 3.1:

$$v(V_x, T_y) = \frac{ext(T_y)}{t_x(UnA_y) - t_x(UnA_{y-1})}, \quad (3.1)$$

onde  $ext(T_y)$  é a extensão do trecho  $y$ ,  $t_x(UnA_y)$  é o instante em que a unidade de bordo  $x$  esteve mais próxima à unidade de acostamento  $y$ , e  $t_x(UnA_{y-1})$  é o momento em que a unidade de bordo  $x$  esteve mais próxima da unidade de acostamento anterior.

Quando a central de controle recebe informações de pelo menos duas unidades de bordo em um mesmo trecho da via, por exemplo no trecho 4 da Figura 3.1, a central de controle calcula a média harmônica das velocidades recebidas a fim de inferir uma condição única para o trecho. O uso da média harmônica possibilita ainda minimizar os *outliers*, ou seja, unidades de bordo que apresentam velocidades médias destoantes com relação à maioria das unidades de bordo no trecho, como por exemplo, carros de polícia ou ambulâncias. A Equação 3.2 é usada para fazer o cálculo da média harmônica, dando maior peso às informações mais recentes.

$$MH_T(t) = \frac{2}{\frac{1}{v_i} + \frac{1}{MH_T(t-1)}}, \quad (3.2)$$

onde  $v_i$  é a velocidade da unidade de bordo  $i$ ,  $MH_T(t-1)$  é o valor da média harmônica anterior relativa ao trecho, onde  $v_i > 0$ .

Um exemplo da robustez da média harmônica para o cenário analisado pode ser acompanhado em dois momentos distintos. No primeiro momento, a média harmônica anterior ( $MH_T(t-1)$ ) tem valor igual a 100 km/h e a unidade de bordo com informação mais recente ( $v_i$ ) tem velocidade igual a 20km/h. Neste caso, usando a média simples, a velocidade média no trecho seria de 60km/h. Utilizando a média

harmônica, o valor é de 33 km/h. O valor obtido utilizando a média harmônica demonstra ser o correto uma vez que, como apresentado na Seção 2.2.1, considera-se que veículos lentos prejudicarão todo o tráfego que vem em seguida. Em um segundo momento, numa situação inversa, onde o valor da média harmônica anterior ( $MH_T(t - 1)$ ) tem valor igual a 20 km/h e a unidade de bordo com informação mais recente ( $v_i$ ) tem velocidade igual a 100 km/h, obviamente a média harmônica também apresentará o valor igual a 33 km/h. No entanto, neste cenário, o valor do último veículo não irá alterar tanto o valor da velocidade média no trecho uma vez que considera-se que um veículo só terá velocidade muito superior à maioria se este for um veículo preferencial.

O número de trechos em uma via depende do número de unidades de acostamento e das características da via. Em uma via com dois sentidos, cada sentido é considerado um trecho diferente. Desta forma, como é possível visualizar na Figura 3.1, o trecho de UnA1 para a UnA2 é diferente do trecho de UnA2 para UnA1. O número de trechos é dado pela Equação 3.3:

$$num_T = ((num_{UnA} - 1) * num_D), \quad (3.3)$$

onde  $num_{UnA}$ , e  $num_D$  são, respectivamente, o número de unidades de acostamento e o número de direções na via, que será sempre 1 ou 2. A definição do número de trechos é feita na linha 3 do Algoritmo 1, que define as rotinas de funcionamento da central de controle.

Não há a necessidade de dividir os veículos em categorias, uma vez que, como mostrado em trabalhos anteriores [39], são raros os cenários onde a velocidade de veículos preferenciais é grande o suficiente para alterar a velocidade média inferida pelo sistema proposto, demonstrando a robustez obtida com a média harmônica. Por outro lado, a lentidão de alguns veículos acaba refletindo nas outras pistas, como mostrado na Seção 2.2.1.

Como é possível ver no Algoritmo 1, a condição de cada trecho é atualizada e disponibilizada a cada intervalo de tempo definido, 60 segundos (por exemplo) (linhas 5 e 14 do Algoritmo 1.). O cálculo é baseado nas velocidades médias de cada veículo, utilizando a Equação 3.2. Da linha 6 a 12 do Algoritmo 1, são selecionados todos os registros dos últimos  $t$  segundos, anteriores ao horário atual. Estes registros contêm a identificação da unidade de bordo e a velocidade média no trecho. Os registros são ordenados por tempo com o objetivo de dar mais peso às informações mais recentes. Após filtrar as unidades de bordo de cada trecho, calcula-se a média harmônica (linha 13). Registros anteriores ao intervalo definido são ignorados (linha 19 do Algoritmo 1).

Ainda baseado nas informações enviadas pelos veículos, a central de controle

também é capaz de inferir, em tempo de execução, a localização (com base na posição conhecida da unidade de acostamento) e a direção do veículo (com base nas duas últimas unidades de acostamento).

**Entrada:** Identificação das unidades de bordo ( $UnB$ ) e de acostamento ( $unA$ ) e instante ( $t$ ) em que passa pela unidade de acostamento

**Saída:** Velocidade média em cada trecho.

```

1:  $tempo \leftarrow HoraAtualSistema$ ;
2: //Número de trechos
3:  $num_T = ((num_{UnA} - 1) * num_D)$ ;
4: while true do
5:   if  $registerTempo \geq (tempo - 60)$  then
6:     Selecionar registros (ordenado por tempo);
7:     Filtrar veículos por trecho;
8:      $trecho \leftarrow 1$ ;
9:     while  $trecho \leq num_T$  do
10:       $n \leftarrow numRegistros$ ;
11:       $i \leftarrow 0$ ;
12:      while  $i < numRegistros$  do;
13:         $MH_T(t) = \frac{2}{\frac{1}{v_i} + \frac{1}{MH_T(t-1)}}$ ;
14:        Atualiza condições do trecho da via;
15:         $i \leftarrow i + 1$ ;
16:      end while
17:    end while
18:  else
19:    Ignore registros;
20:  end if
21: end while

```

Algoritmo 1: Pseudo-código da Central de Controle - executado a cada 60 segundos.

### 3.2.2 Algoritmo da Unidade de Bordo

Uma vez que detalhes do algoritmo executado no cliente dependem da tecnologia adotada para definição da posição do veículo na via, de forma geral, a unidade de bordo precisa executar três passos: identificar a unidade de acostamento a seguir a fim de identificar o próximo trecho na via (linha 2 do Algoritmo 2), identificar o instante em que passou pela unidade de acostamento (linhas 7 e 14 do Algoritmo 2) e enviar estas informações para a central de controle logo após passar pela unidade de acostamento (linha 9 do Algoritmo 2). Neste algoritmo, os parâmetros de entrada

são a identificação da unidade de acostamento e o posicionamento da unidade de bordo na via. Os parâmetros de saída são a identificação das unidades de bordo e das unidades de acostamento e o instante em que passou pela unidade de acostamento.

No caso da unidade de bordo não conseguir enviar os dados para a central de controle (linha 12 do Algoritmo 2), os dados são armazenados localmente para envio posterior (linha 16 do Algoritmo 2). Após o envio destes dados que foram armazenados, caso estes registros estejam fora do intervalo de atualização das condições da via, definido na central de controle, estes não serão utilizados para o cálculo da condição do trecho em tempo real. No entanto, estes registros serão utilizados, por exemplo, numa análise histórica da condição do trecho em determinadas épocas do ano ou em horários específicos.

**Entrada:** Identificação da unidade de acostamento ( $UnA$ ) e posicionamento na via.

**Saída:** Identificação das unidades de bordo ( $UnB$ ) e de acostamento e instante ( $t$ ) em que passa pela unidade de acostamento.

```
1: while true do
2:   Procura nos quadros de sonda recebidos por um ESSID conhecido;
3:   if Entrou na área de cobertura da  $UnA$  then
4:     Faz pedido de associação para a  $UnA$ ;
5:     if Associou then
6:       while Associado do
7:         Detecta momento em que passa pela  $UnA$ ;
8:         if Passou pela  $UnA$  then
9:           Envia  $t, UnA, UnB$  para central de controle;
10:        end if
11:       end while
12:     else
13:       Faz pedido de associação para a  $UnA$ ;
14:       Detecta momento em que passa pela  $UnA$ ;
15:       if Passou pela  $UnA$  then
16:         Armazena  $t, UnA, UnB$  para envio posterior;
17:       end if
18:     end if
19:   else
20:     Procura ESSID conhecido;
21:   end if
22: end while
```

Algoritmo 2: Pseudo-código executado pela unidade de bordo.

### 3.3 Arquitetura Descentralizada

Como dito, esta arquitetura dispensa o uso de uma central de controle. Também não é necessário que as unidades de acostamento troquem informações entre elas. No entanto, nesta arquitetura são necessárias alterações nas unidades de acostamento a fim de permitir a troca de informações com as unidades de bordo, em tempo de execução. Como não há uma ligação física entre as unidades de acostamento, os veículos cumprem o papel dos enlaces de comunicação, possibilitando que cada unidade, de acostamento e de bordo, tenha informação sobre toda a via.

A Figura 3.2 apresenta um exemplo da arquitetura onde as unidades de acostamento estão instaladas em pontos de ônibus. Considera-se que unidades de bordo possuem equipamentos executando a aplicação proposta, que a via possui veículos em trânsito nos dois sentidos e que as distâncias entre as unidades de acostamento são previamente conhecidas, ou que a unidade de bordo seja responsável pelo cálculo da distância em tempo real. A conexão das unidades de acostamento a elementos externos permite a divulgação das condições da via para dispositivos externos.

Essa arquitetura não se aplica a vias de apenas um sentido pois, como não há ligação entre as unidades de acostamento do cenário proposto, as unidades de bordo só receberiam informações, desatualizadas, sobre trechos já percorridos.

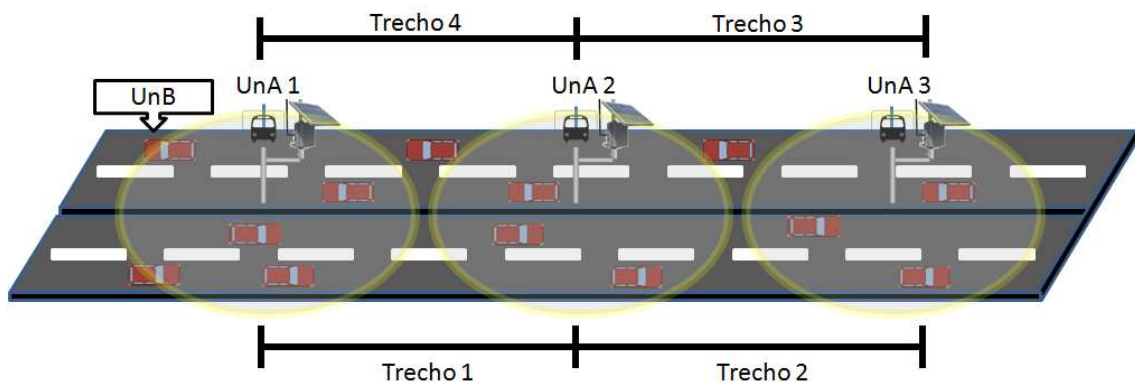


Figura 3.2: Elementos da arquitetura descentralizada: unidades de bordo (UnB) e unidades de acostamento (UnA).

Como o objetivo deste capítulo é apresentar as arquiteturas independentemente da tecnologia adotada na unidade de bordo, para definir a velocidade no trecho em tempo de execução, é possível utilizar sensores embarcados da unidade de bordo, GPS ou outros meios baseados em tecnologias como celular ou IEEE 802.11. Conhecida a distância entre as unidades de acostamento e o tempo gasto para percorrer o trecho, é possível calcular a velocidade média do veículo em tempo de execução. Assim como na arquitetura centralizada, o número de trechos é proporcional à quantidade de unidades de acostamento. O número de trechos é dado pela Equação 3.3,

apresentada na Seção 3.2.1. No entanto, na arquitetura descentralizada, o número de direções será sempre múltiplo de 2.

A Tabela de Condição dos Trechos (TCT), vista na Figura 3.3, é usada na troca de informação entre as unidades de bordo e as unidades de acostamento. É definida uma TCT por via. Nas TCTs, cada linha representa um trecho da via. Cada linha contém as seguintes informações: Trecho, Condição e TTL (*Time To Live*). O campo **Trecho** representa o identificador único do trecho em questão, que será utilizado na comparação entre as linhas das tabelas; a **Condição** representa a velocidade média atual no trecho; e o TTL, dado em segundos, representa o tempo de vida de cada entrada da tabela. O TTL tem basicamente duas funções: definir um tempo de vida útil para a informação e atribuir maior peso para informações mais recentes. Uma vez que a ideia é inferir a condição atual nos trechos, as informações defasadas possuem menor ou nenhum peso (no caso do TTL ser zero). A Seção 3.3.3 apresenta maiores detalhes sobre o uso do TTL.

TCT Local da UnB no instante (t)				TCT recebida pela UnB no instante (t)				TCT Local da UnB no instante (t+1)		
Trecho	Condição (km/h)	TTL (s)		Trecho	Condição (km/h)	TTL (s)		Trecho	Condição (km/h)	TTL (s)
D1	80	20	+	D1	80	20	→	D1	80	19
D2	70	13		D2	68	15		D2	68	14
E3	75	12		E3	60	14		E3	60	13
E4	68	7		E4	65	10		E4	65	9

Figura 3.3: Atualização da TCT local de uma unidade de bordo (UnB). Neste exemplo a unidade de bordo recebeu uma TCT onde três valores de TTL são maiores que da TCT local. Desta forma, as informações locais sobre os trechos D2, E3 e E4 serão atualizadas. Uma TCT completa com 60 trechos possui 1,1 kBytes.

### 3.3.1 Funções da Unidade de Bordo

A cada trecho, a unidade de bordo é responsável por: detectar e se conectar à unidade de acostamento para receber a TCT (linhas 3 a 8 do Algoritmo 3), comparar com a TCT local e atualizar se necessário (linhas 9 a 12 do Algoritmo 3), detectar o momento em que passou pela unidade de acostamento (linha 15 do Algoritmo 3), calcular em tempo de execução a velocidade média dentro do trecho e atualizar a TCT local (linhas 17 e 18 do Algoritmo 3), enviar a TCT à unidade de acostamento mais próxima, ou seja, a unidade de acostamento pela qual a unidade de bordo acabou de passar (linha 19 do Algoritmo 3) e, finalmente, se desconectar.

Como é possível observar das linhas 9 a 12 do Algoritmo 3, o critério para comparar que informação é mais atual é o valor do TTL. As informações recebidas sobre trechos com TTL maior que as existentes na TCT atual são usadas para atualizar a TCT local. A Figura 3.3 ilustra esta comparação entre TCTs, onde

a TCT local de uma unidade de bordo, no instante  $t + 1$ , é atualizada após a comparação das TCTs no instante  $t$ .

Ao receber as informações da unidade de bordo ao final do trecho, a unidade de acostamento atualiza a TCT em, pelo menos, todas as linhas referentes aos trechos anteriores já que os valores de TTL recebidos são maiores. Analisando a Figura 3.2, por exemplo, quando um veículo acaba de passar pelo trecho 1, próximo à unidade de acostamento 2, ele calcula a própria velocidade média no trecho, atualiza a TCT local e envia a TCT (atualizada) para a unidade de acostamento 2. Para esta unidade de acostamento, ao menos as informações sobre os trechos 1 e 4 serão mais atuais. Vale ressaltar que neste caso o veículo não terá percorrido o trecho 4, mas terá a informação uma vez que recebeu a TCT da unidade de acostamento 1.

### 3.3.2 Função da Unidade de Acostamento

Cada unidade de acostamento divulga sua TCT atual ao fim do processo de associação das unidades de bordo. Assim, cada unidade de acostamento divulga para as unidades de bordo que estão dentro da área de cobertura, em ambos os sentidos, uma visão das condições em todos os trechos da via. A opção de associar a divulgação das TCTs ao processo de conexão tem por objetivo diminuir o tráfego na rede comparado, por exemplo, a uma opção de divulgação regular via *broadcast*. Estes passos estão representados nas linhas 3 e 4 do Algoritmo 4.

Quando a unidade de acostamento recebe uma TCT (linha 6 do Algoritmo 4), ela também precisa comparar com a informação local e, se o TTL de cada entrada for maior que o da TCT local, atualizar seus dados (linhas 7 a 11 do Algoritmo 4). No entanto, os veículos podem apresentar velocidades distintas por uma série de fatores como a condição da pista, interferências externas ou precisão do sensor utilizado para inferir a velocidade instantânea. Como são várias unidades de bordo enviando informação simultaneamente, a unidade de acostamento utiliza a média harmônica simples para calcular a condição atual do trecho. Utilizando a Equação 3.2, apresentada na Seção 3.2.1, o sistema atribui um peso maior para as informações mais recentes. Esta etapa está representada nas linhas 13 a 16 do Algoritmo 4.

**Entrada:** RSSI, ESSID e BSSID da Unidade de acostamento ( $UnA$ ).  
**Saída:** Instante em que a Unidade de bordo ( $UnB$ ) passa pela Unidade de acostamento.

```

1:  $num_T = ((num_{UnA} - 1) * num_D)$ ;
2: while true do
3:   if Entrou na área de cobertura da  $UnA$  then
4:     Faz pedido de associação para a  $UnA$ ;
5:     if Associou then
6:       while Associado do
7:         Recebe TCT da unidade de acostamento;
8:          $num_{Linha} \leftarrow 1$ ;
9:         while  $num_{Linha} < num_T$  do //Compara TCT recebida com TCT
local
10:           if  $TTL_{atual_{Linha_x}} < TTL_{recebida_{Linha_x}}$  then
11:              $TTL_{atual_{Linha_x}} \leftarrow TTL_{recebida_{Linha_x}}$ ;
12:              $Condicao_{Atual_{Linha_x}} \leftarrow Condicao_{Recebida_{Linha_x}}$ ;
13:           end if
14:            $num_{Linha} \leftarrow num_{Linha} + 1$ ;
15:         end while
16:         Detecta momento em que passou pela unidade de acostamento;
17:         Guarda o tempo em que passou pela unidade de acostamento;
18:         //Calcula a velocidade média do trecho anterior
19:          $v(V_x, T_y) \leftarrow \frac{ext(T_y)}{t_x(UnA_y) - t_x(UnA_{y-1})}$ ;
20:         Atualiza TCT local;
21:         Envia a TCT atualizada para a  $UnA$  com a qual está associada;
22:       end while
23:     else
24:       Faz pedido de associação para a  $UnA$ ;
25:     end if
26:   else
27:     Procura nos quadros de sonda recebidos por um ESSID conhecido;
28:   end if
29: end while

```

Algoritmo 3: Pseudo-código executado pela unidade de bordo.



**Entrada:** Instante em que a Unidade de bordo ( $UnB$ ) passa pela Unidade de acostamento ( $UnA$ ).

**Saída:** Média harmônica dos trechos.

```

1:  $num_T = ((num_{UnA} - 1) * num_D)$ ;
2: while true do
3:   Recebe pedido de conexão;
4:   Envia, junto com as configurações de rede, a TCT local atual;
5:   Aguarda por TCT atualizada;
6:   Recebe TCT atualizada;
7:    $num_{Linha} \leftarrow 1$ ;
8:   while  $num_{Linha} < num_T$  do //Compara TCT recebida com TCT local;
9:     if  $TTL_{Atual_{Linha_x}} = 0$  then
10:       $TTL_{Atual_{Linha_x}} \leftarrow TTL_{Recebida_{Linha_x}}$ ;
11:       $Condicao_{Atual_{Linha_x}} \leftarrow Condicao_{Recebida_{Linha_x}}$ ;
12:     else
13:       if  $TTL_{Atual_{Linha_x}} < TTL_{Recebida_{Linha_x}}$  then
14:         $MH_T(t) = \frac{2}{\frac{1}{v_i} + \frac{1}{MH_T(t-1)}}$ ;
15:         $TTL_{Atual_{Linha_x}} \leftarrow TTL_{Recebida_{Linha_x}}$ ;
16:         $Condicao_{Atual_{Linha_x}} \leftarrow MH_T(t)$ ;
17:       end if
18:     end if
19:      $num_{Linha} \leftarrow num_{Linha} + 1$ ;
20:   end while
21: end while

```

Algoritmo 4: Pseudo-código executado pela unidade de acostamento.

### Tempo de Convergência

A Figura 3.4 apresenta o tempo necessário para atualização das condições dos trechos em uma via com 60 km. O gráfico retrata o tempo do pior caso, ou seja, considera o tempo para que uma unidade de bordo atualize a informação sobre os trechos de uma extremidade à outra da via. No cenário retratado, cada trecho possui 500 metros. São considerados três cenários com velocidades médias distintas de 90 km/h, 100 km/h e 110 km/h.

### 3.3.3 Cálculo do TTL

Para arquitetura descentralizada não se pode assumir o sincronismo entre os relógios das unidades de bordo e das unidades de acostamento, uma vez que o cenário é parcialmente desconectado. Como solução, definiu-se que cada dispositivo

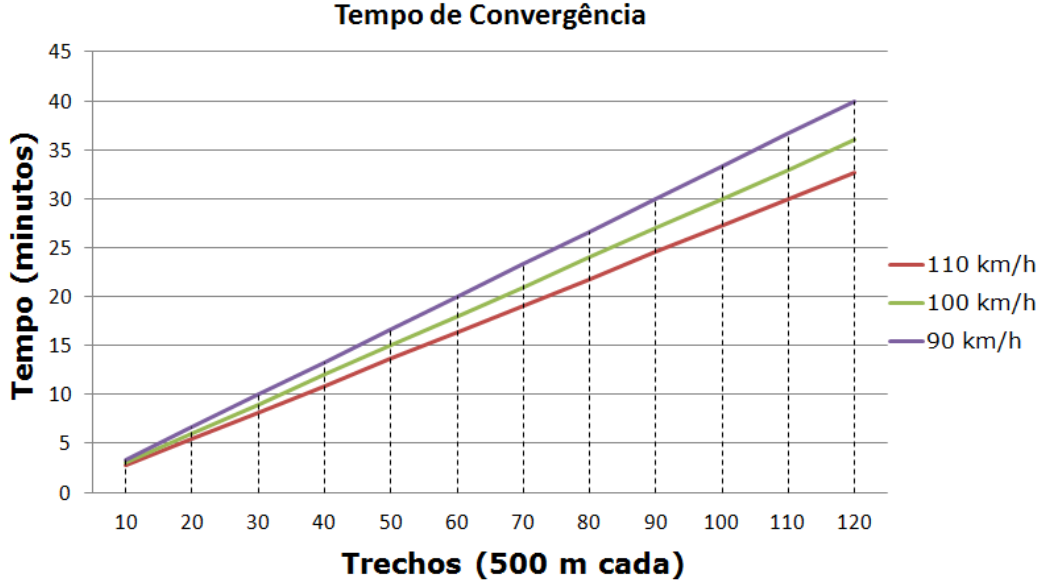


Figura 3.4: Tempo de convergência da condição dos trechos mais extremos em uma via onde cada trecho possui 500 metros.

fica responsável por decrementar o valor do TTL baseado no horário local. Dessa forma, o valor do TTL é decrementado a cada segundo. A falta de sincronismo é minimizada, ficando restrita apenas ao tempo de envio entre um elemento e outro.

O valor máximo do TTL depende de características da via, como a extensão, velocidade máxima permitida, entre outras. Um tempo de TTL muito pequeno pode não ser suficiente para atualizar as condições da via em trechos distantes ou em vias onde o limite de velocidade é baixo. Um tempo de TTL muito grande pode fazer com que as unidades de acostamento tenham uma informação desatualizada sobre trechos distantes. Para que se tenha uma noção de há quanto tempo a condição foi gerada, o valor do TTL deve ser maior que o tempo de defasagem (ambos em segundos), ou seja, maior que o tempo necessário para atualizar as informações sobre o trecho mais distante. Para encontrar o tempo de defasagem ( $t_{Def}$ ) utiliza-se a Equação 3.4:

$$t_{Def} = p(i) * \sum_{i=1}^n t_{T_i}, \quad (3.4)$$

onde  $p(i)$  é uma probabilidade de haver engarrafamento em determinado instante,  $n$  é o número de trechos e  $t_{T_i}$  é o tempo médio para atravessar cada trecho.

O valor de  $p(i)$  pode ser ajustado de acordo com o conhecimento do comportamento do fluxo de veículos na via. Utilizando dados históricos obtidos por meio das arquiteturas propostas nesta tese, é possível identificar padrões de variação da velocidade média em cada período do dia. Isto permite um ajuste mais refinado no

valor de  $p(i)$ . Um exemplo de metodologia para utilização de dados históricos é o trabalho desenvolvido por Swenson et al. [89]. Os autores apresentam um estudo desenvolvido na Flórida, EUA, que aponta um padrão de mudança no tráfego coletados durante um ano. O estudo apresenta dados coletados entre 06:00 e 19:00 e as variações no fluxo de veículos são apresentados em porcentagens e em intervalos de 30 minutos.

Uma mudança na Equação 3.4, colocando o valor de  $p(i)$  dentro do somatório, permite identificar a variação não somente em toda via de forma geral, mas dentro de cada trecho. Esta mudança aumenta a granularidade do monitoramento e otimiza o processo em cenários onde há variação da condição apenas em determinados trechos.

Este capítulo apresentou detalhes das arquiteturas propostas no COTrAMS, centralizada e distribuída. Foram apresentados os algoritmos de funcionamento de unidades de acostamento e de bordo, sem considerar uma tecnologia específica. O capítulo a seguir apresenta o COTrAMS implementado para um cenário que utiliza o padrão IEEE 802.11 b/g nas unidades de acostamento e de bordo.

# Capítulo 4

## Protótipo Baseado no IEEE 802.11 b/g

Este capítulo apresenta o sistema oportunístico e colaborativo para o monitoramento de tráfego, COTraMS (*Collaborative and Opportunistic Traffic Monitoring System*). O COTraMS foi desenvolvido para avaliar as arquiteturas de monitoramento propostas nesta tese, centralizada e descentralizada. No COTraMS, unidades de bordo e unidades de acostamento utilizam o padrão IEEE 802.11 b/g. Entre as motivações de utilizar este padrão está a possibilidade de fazer experimentos em cenários reais como na Avenida Brasil, e no Campus da UFRJ, ambos na cidade do Rio de Janeiro. Estes experimentos são apresentados no Capítulo 5.

### 4.1 Parte Conceitual do COTraMS

O COTraMS faz uso de informações obtidas via unidades de bordo e de acostamento para detectar a movimentação do veículo na via, bem como definir e divulgar as condições de cada trecho. Como a proposta é colaborativa, a unidade de bordo é responsável por receber, processar e transmitir os dados sobre sua movimentação, tendo como destino a central de controle, na arquitetura centralizada, ou a unidade de acostamento, na arquitetura descentralizada.

As unidades de bordo são formadas por equipamentos portáteis que executam a aplicação proposta dentro de veículos que circulam na via. Estes equipamentos podem ser *laptops*, *tablets*, *smartphones* ou qualquer outro equipamento que possua uma interface de rede que suporte o padrão IEEE 802.11 b/g.

Na arquitetura descentralizada, o uso de rotinas para a troca de TCTs requer que as unidades de acostamento utilizem equipamentos específicos que permitam a alteração do *firmware* padrão. Maiores detalhes são apresentados na Seção 4.3.2.

No COTraMS, a movimentação do veículo em uma determinada via é inferida

utilizando a variação da potência do sinal recebido (RSSI). À medida que a unidade de bordo se aproxima ou se afasta da unidade de acostamento, a potência do sinal recebido varia. Esta informação é obtida por meio de quadros de sonda, que estão disponíveis em redes IEEE 802.11 b/g, chamados *beacons*. O *beacon* é um quadro de sonda de gerenciamento, enviado periodicamente pelas unidades de acostamento, por padrão a cada 100 ms, com o objetivo de se anunciar aos clientes em potencial. Entre as informações contidas nos *beacons*, três são utilizadas pelo COTraMS: o ESSID da unidade de acostamento, que neste caso representa o nome da rede e o nome da via; o endereço MAC (*Media Access Control*) da unidade de acostamento (BSSID - *Basic Service Set Identification*); e a potência do sinal recebido. Todas estas informações podem ser visualizadas na Figura 4.1. Estas informações foram obtidas por meio de um *laptop* dentro de um veículo em movimento na Avenida Brasil, na cidade do Rio de Janeiro, executando o aplicativo *tcpdump* [90]. Além dessas informações já estarem disponíveis na rede, outra vantagem de utilizar os *beacons* é o fato de ser possível capturá-los mesmo que a unidade de bordo ainda não esteja associada à unidade de acostamento. O processo de captura de *beacons* não interfere no tráfego normal de funcionamento da rede. Desta forma, mesmo sem estar conectado à rede, o cliente poderá colaborar com informações sobre sua movimentação em momentos futuros, quando estiver conectado. Para obter estas informações sem estar associado à unidade de acostamento, o COTraMS coloca a interface de rede no modo monitor até que se associe.

```

13:58:25.130559 4293080865us tsft 1.0 Mb/s 2412 MHz 11b -91dB signal -96dB noise antenna 0 [bit 14]
BSSID:00:1d:0f:f6:0e:ba DA:ff:ff:ff:ff:ff:ff SA:00:1d:0f:f6:0e:ba Beacon (RenovanetFox) [1.0* 2.0* 5.5*
11.0* 6.0 9.0 12.0 18.0 Mbit] ESS CH: 1[|802.11]

13:58:56.736364 29716963us tsft 1.0 Mb/s 2412 MHz 11b -91dB signal -92dB noise antenna 0 [bit 14]
BSSID:68:bd:ab:f5:20:00 DA:ff:ff:ff:ff:ff:ff SA:68:bd:ab:f5:20:00 Beacon (Avenida Brasil Digital) [1.0*
2.0* 5.5* 6.0 9.0 11.0* 12.0 18.0 Mbit] ESS CH: 1[|802.11]

13:58:57.460302 30452802us tsft 1.0 Mb/s 2412 MHz 11b -94dB signal -85dB noise antenna 0 [bit 14]
BSSID:68:bd:ab:f5:20:00 DA:ff:ff:ff:ff:ff:ff SA:68:bd:ab:f5:20:00 Beacon (Avenida Brasil Digital) [1.0*
2.0* 5.5* 6.0 9.0 11.0* 12.0 18.0 Mbit] ESS CH: 1[|802.11]

13:59:00.496770 3347710us tsft 1.0 Mb/s 2412 MHz 11b -91dB signal -93dB noise antenna 0 [bit 14]
BSSID:68:bd:ab:f5:20:00 DA:ff:ff:ff:ff:ff:ff SA:68:bd:ab:f5:20:00 Beacon (Avenida Brasil Digital) [1.0*
2.0* 5.5* 6.0 9.0 11.0* 12.0 18.0 Mbit] ESS CH: 1[|802.11]

13:59:01.109073 34103735us tsft 1.0 Mb/s 2412 MHz 11b -91dB signal -96dB noise antenna 0 [bit 14]
BSSID:68:bd:ab:f5:20:00 DA:ff:ff:ff:ff:ff:ff SA:68:bd:ab:f5:20:00 Beacon (Avenida Brasil Digital) [1.0*
2.0* 5.5* 6.0 9.0 11.0* 12.0 18.0 Mbit] ESS CH: 1[|802.11]

```

Figura 4.1: Informações contidas no quadro de sonda, obtidas via *tcpdump*, utilizando um *laptop* dentro de um veículo em movimento, na Avenida Brasil.

### 4.1.1 Detecção da Movimentação da Unidade de Bordo - Proposta Inicial

Para fazer a detecção da movimentação da unidade de bordo, baseada na variação da potência do sinal, duas propostas foram desenvolvidas. Inicialmente, o processo era baseado no tempo gasto para percorrer a área de cobertura do sinal de uma unidade de acostamento [51]. Além de detectar a movimentação da unidade de bordo, a proposta inicial possibilitava inferir a velocidade média do veículo em trechos da via, combinando dados da variação do sinal recebido com dados sobre os instantes que alternava entre as zonas existentes.

Para ilustrar o funcionamento da proposta inicial, a Figura 4.2 apresenta um cenário onde as unidades de acostamento distam 400 m uma da outra e com raio de transmissão de cerca de 250 m. Neste cenário há alta probabilidade de continuidade de conexão. A proposta inicial consiste em dividir a área de cobertura de cada unidade de acostamento em três zonas (ilustradas de *A* a *F* (duas unidades de acostamento)). Cada zona equivale a um intervalo de potência de sinal recebido, medido na unidade de bordo. Por exemplo, a área de cobertura da unidade de acostamento *AP\_AvB\_km1* corresponde às zonas *A*, *B* e *C*. A zona *A* pode ser definida, em termos de potência recebida, como correspondente ao intervalo -90dBm e -60 dBm, enquanto a zona *B* corresponde aos intervalos -59 dBm a -20 dBm e -20dBm a -59dBm e a zona *C* ao intervalo -60dBm e -90dBm. Desta forma, à medida que a unidade de bordo se movimenta há uma alteração entre estes intervalos. A cada mudança de zona, a unidade de bordo envia uma informação para a central, registrando o momento da mudança.

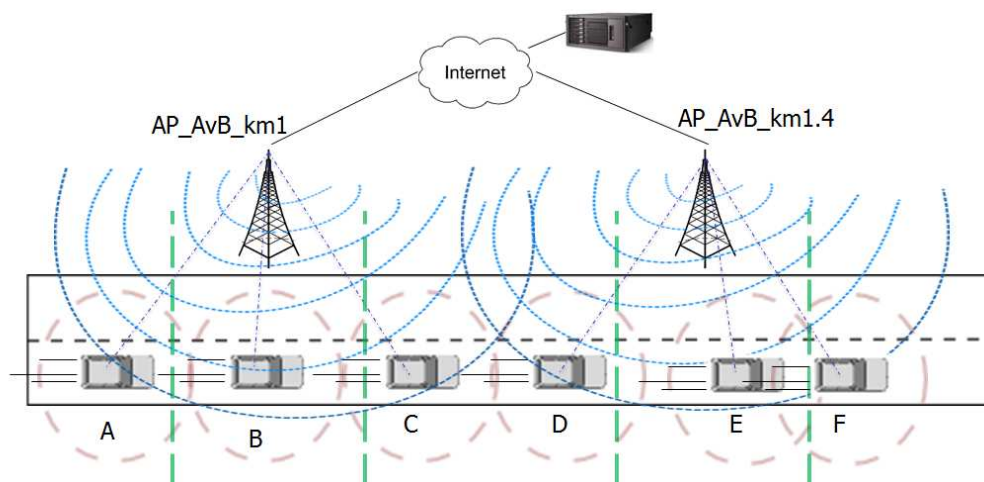


Figura 4.2: Divisão da área de cobertura em zonas.

Outra diferença da proposta inicial é a forma de calcular a velocidade média na zona. Considerando que o alcance do sinal das unidades de acostamento é de 400m (raio = 200m) e que a área de cobertura de cada unidade de acostamento está

dividida em três zonas (cerca de 133 metros cada zona), um veículo gasta cerca de 5 segundos para percorrer cada zona a 90km/h e 15 segundos pra trocar de unidade de acostamento após percorrer toda a área de cobertura (400m). Um veículo vai gastar cerca de 8 segundos para percorrer cada zona a 60 km/h e 24 segundos para trocar de unidade de acostamento. Conhecendo as características da via, é possível definir faixas de tempo que ajudam a inferir quais as condições do trânsito em cada trecho (Tabela 4.1). Neste cenário usado como exemplo, é possível dizer que o trânsito está **ótimo** se o tempo médio para mudar de uma unidade de acostamento para outra for de até 24 segundos, já que representa uma velocidade média de 60 km/h. É possível dizer também que o trânsito está **lento** se o tempo for acima de 1 minuto e 10 segundos.

Tabela 4.1: Faixas de velocidade para definição de condição de trânsito, considerando o alcance da unidade de acostamento de 400m e a extensão de cada zona de 133 m de raio.

Faixas	Tempo por AP	Tempo por zona	Condição
60 a 90 km/h	até 24 segundos	até 8 segundos	ÓTIMO
30 a 59 km/h	até 36 segundos	até 12 segundos	BOM
10 a 39 km/h	até 72 segundos	até 24 segundos	LENTO

Outra característica da versão inicial é que a unidade de bordo possui um *buffer* para armazenar os valores de potência recebidos. Desta forma, a unidade de bordo envia para a central de controle apenas a mediana entre os valores da potência. O objetivo é diminuir o tráfego na rede e eliminar valores discrepantes, causados por alguma interferência ou ruído. A Tabela 4.2 ilustra um *buffer* de dois segundos com três valores de potência discrepantes. Definido o valor da mediana ( $-60dBm$ ), é possível concluir que a unidade de bordo está na zona *A* ou *C* da unidade de bordo AP\_AvB\_km1. A central de controle define em qual zona a unidade de bordo está (*A* ou *C*), baseado em informações anteriores sobre a localização da unidade de bordo.

O tamanho do *buffer* (na unidade de bordo) varia de acordo com as características da via. Para uma via com limite baixo de velocidade, por exemplo, é mais interessante possuir um *buffer* maior já que usando um *buffer* pequeno seriam enviados muitos valores relativos à mesma zona. Quanto maior o *buffer* menor o tráfego gerado na rede, no entanto, maior o tempo entre as atualizações sobre a localização da unidade de bordo.

O Capítulo 5 apresenta experimentos que demonstram que o uso da mediana é uma boa alternativa pois diminui o tráfego de dados na rede sem alterar as características do sinal.

A maior dificuldade da primeira proposta está na definição do tamanho de cada trecho. Esta definição está relacionada à área de cobertura da unidade de acosta-

AP_AvB_km1		
Buffer	Segundo 1	Segundo 2
1	-80 dBm	-90 dBm
2	-62 dBm	-59 dBm
3	-62 dBm	-80 dBm
4	-61 dBm	-59 dBm
5	-90 dBm	-59 dBm
6	-90 dBm	-58 dBm
7	-61 dBm	-56 dBm
8	-60 dBm	-55 dBm
9	-60 dBm	-54 dBm
10	-60 dBm	-52 dBm
Mediana: -60 dBm   Zona A		

Tabela 4.2: Exemplo de *buffer* de 2 segundos.

mento, considerando inclusive valores de potência do sinal recebido de áreas mais afastadas e sujeitas a ruídos e interferências. Apesar de ser possível detectar a movimentação da unidade de bordo, esta proposta não garante boa precisão quanto a localização da unidade de bordo. Este problema impactava diretamente no cálculo da velocidade média no trecho. Como a área de cobertura de uma unidade de acostamento pode variar devido a características dos equipamentos e do cenário, esta proposta exige ainda que se conheça as especificações técnicas, como o raio de cobertura, de cada um dos equipamentos para que seja possível definir a extensão de cada zona.

#### 4.1.2 Detecção da Movimentação da Unidade de Bordo - Proposta Atual

Na proposta atual, optou-se por utilizar apenas o momento em que a unidade de bordo está mais próxima da unidade de acostamento, onde a interferência e a probabilidade de perda de pacotes é menor. Para isso, considera-se o momento em que a potência do sinal recebido é mais forte. Na Figura 4.3, estes momentos estão representados em  $t + 2$ ,  $t + 5$  e  $t + 8$ .

Para definir o instante em que a unidade de bordo passou pela unidade de acostamento, a unidade de bordo guarda dois valores de potência: o maior valor recebido e o valor atual recebido (linhas 1 e 2 do Algoritmo 5). Quando o valor atual de potência recebido é 10 dBm mais fraco que o maior valor, considera-se que a unidade de bordo passou pela unidade de acostamento (linhas 17 a 21 do Algoritmo 5). O valor de 10 dBm foi definido empiricamente baseado em resultados obtidos nos experimentos que são apresentados no Capítulo 5. Experimentos mostram também que



um valor de potência próximo de  $-70$  dBm é suficiente para estimar a localização do veículo com boa precisão. Um sinal recebido com potência de pelo menos  $-60$  dBm representa uma discrepância entre 3 e 8 metros. Esta informação foi obtida pela comparação das coordenadas geográficas da unidade de bordo no momento em que o sinal era mais forte, com as coordenadas da unidade de acostamento, obtida por GPS. Este resultado é considerado satisfatório uma vez que sistemas de monitoramento de trânsito não exigem alto nível de precisão para encontrar o veículo na via [66], onde erros são minimizados por movimentos previsíveis dos nós clientes.

O comportamento da variação da potência do sinal dos quadros de sonda recebidos é apresentado na Seção 5.1.

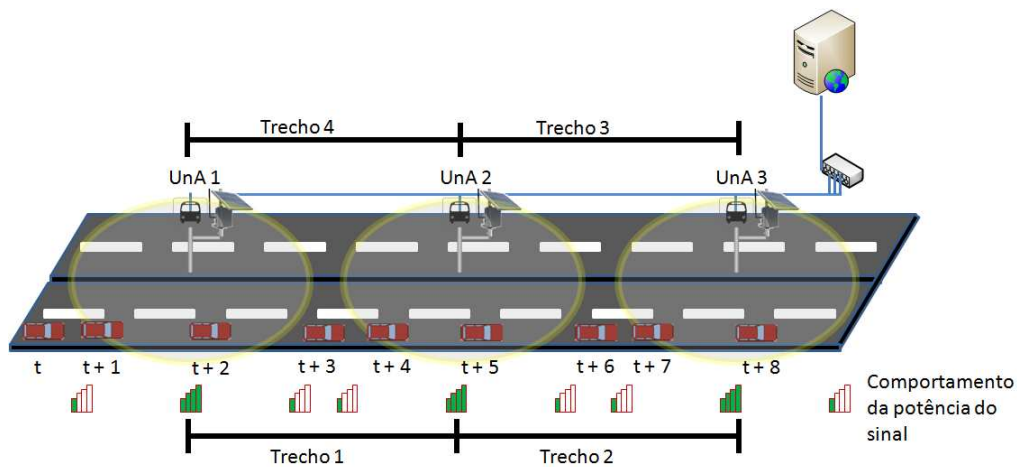


Figura 4.3: Comportamento da potência do sinal dos quadros de sonda.

## 4.2 Arquitetura Centralizada no COTraMS

Esta seção apresenta os detalhes de implementação da arquitetura centralizada no COTraMS, utilizando o padrão de rede IEEE 802.11 b/g. A Figura 4.4 ilustra o processo de comunicação entre unidades de bordo, unidade de acostamento e central de controle. Enquanto a unidade de bordo não estiver associada, ou seja, com a interface de rede em modo monitor, a unidade de bordo procura nos *beacons* recebidos por um ESSID que a aplicação cliente tenha cadastrado localmente, ou seja, por uma informação que indique que a via oferece suporte ao COTraMS. Quando um ESSID conhecido é detectado, a unidade de bordo inicia o processo de associação e configuração da rede IP (DHCP, Figura 4.4). De acordo com o processo de empréstimo do DHCP, uma rejeição do cliente pode acontecer após a etapa DHCP *offer*. Após a etapa DHCP *request*, caso o servidor não renove o empréstimo, acontecerá uma etapa DHCP *ask*, onde o cliente deverá refazer a solicitação. O próximo passo é detectar o momento em que a unidade de bordo está mais próxima da unidade de

acostamento. Para inferir esse momento, como dito, utiliza-se o momento em que o sinal recebido possui o maior valor de potência (linhas 11 e 16 do Algoritmo 5). Uma vez que o valor atual é  $10 \text{ dBm}^1$  mais fraco, o veículo envia um pacote com as informações para a central de controle sobre o momento em que esteve mais próximo da unidade de bordo (linha 17 do Algoritmo 5). A central de controle pode fazer parte da rede local ou estar conectada via Internet.

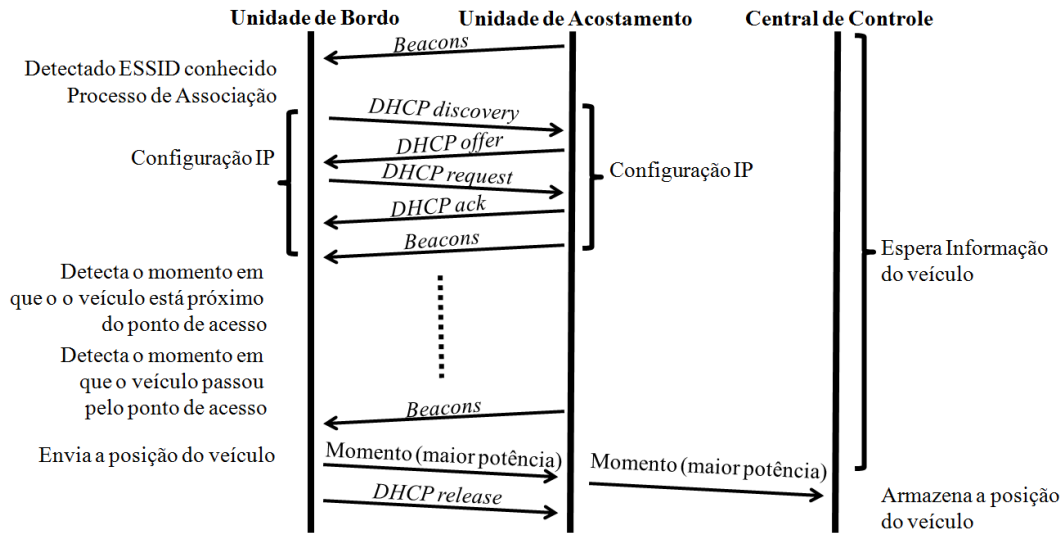


Figura 4.4: Processo de comunicação entre unidade de bordo e de acostamento.

Após passar pela unidade de acostamento, se a unidade de bordo estiver conectada, esta envia os dados para a central de controle (linha 18 do Algoritmo 5). Porém, se a unidade se movimentar pela via sem estar conectada, esta armazena os dados até que se conecte a uma unidade de acostamento. No caso de armazenar os registros localmente por um longo período de tempo (linha 22 a 24 do Algoritmo 5), estes não deverão ser utilizados para inferir as condições da via em tempo real. No entanto, os registros ainda serão enviados para a central pois servirão para gerar dados históricos sobre as condições da via. Estes registros podem ser utilizados para simulações de soluções em cenários críticos, que apresentem horários de pico.

O tráfego de dados gerado na rede pela arquitetura centralizada é pequeno, uma vez que o cliente envia, a cada trecho, apenas um pacote para a central de controle com as seguintes informações: endereço MAC do ponto de acesso e do nó cliente, potência do sinal recebido e instante em que o quadro de sonda foi recebido. Não é necessário ter uma conexão constante. É possível obter dados suficientes mesmo quando as unidades de acostamento estão distantes umas das outras.

Para definir a localização do veículo na via, usa-se a última informação enviada pela unidade de bordo. É possível verificar na central de controle em qual unidade

<sup>1</sup>O valor de potência recebida é negativo porque representa um número positivo muito pequeno, em escala logarítmica. Para o desenvolvimento do Algoritmo 5 utilizou-se o módulo nos valores.

**Entrada:** RSSI, ESSID e BSSID da Unidade de acostamento ( $UnA$ ).  
**Saída:** Instante em que a Unidade de bordo ( $UnB$ ) passa pela Unidade de acostamento.

```

1:  $actualPower \leftarrow 0$ ;
2:  $maxPower \leftarrow 0$ ;
3: Cria um vetor estruturado; //ordenado pelo valor da potência;
4: while true do
5:   Procura ESSID conhecido; //modo monitor
6:   if ESSID é conhecido then
7:      $actualAP \leftarrow MAC_{AP}$ ;
8:     Armazena  $actualPower$  em um vetor ordenado por RSSI;
9:     Tenta conectar;
10:    // Valor alto significa baixa potência
11:    if  $|maxPower| > |receivedPower|$  then
12:       $|maxPower| \leftarrow |receivedPower|$ 
13:      Armazena  $actualPower$  em um vetor;
14:      Ordena os valores da potência de sinal;
15:    else
16:      if  $|receivedPower| - |maxPower| \geq 10$  then
17:        Envia a informação para a central de controle;
18:        Desconecta;
19:         $previousAP \leftarrow actualAP$ ;
20:         $actualAP \leftarrow \{\}$ ;
21:      else
22:        Armazena  $actualPower$  no vetor;
23:        Ordena os valores da potência de sinal;
24:      end if
25:    end if
26:  end if
27: end while

```

Algoritmo 5: Algoritmo da unidade de bordo.

de acostamento a unidade de bordo estava associada. Ao saber qual é a unidade de acostamento, é possível inferir a região onde se localiza a unidade de bordo. Para definir a direção do veículo, é necessário conhecer as duas últimas unidades de acostamento em que a unidade de bordo esteve associada.

Finalmente, para divulgar as condições de trânsito via Internet, dois tipos de interfaces foram disponibilizadas pela central de controle. A primeira permite a visualização das condições em um mapa, usando a API do Google Maps (Figura 4.5). As condições de trânsito podem ser visualizadas em diferentes cores, de acordo com a velocidade média no trecho. A Figura 4.5 ilustra ainda o local onde estão instaladas as unidades de acostamento, utilizadas na definição de cada trecho. Na criação da interface, foi necessário utilizar dois marcadores por unidade de acostamento, uma vez que a API do Google Maps não permite que sejam adicionados marca-

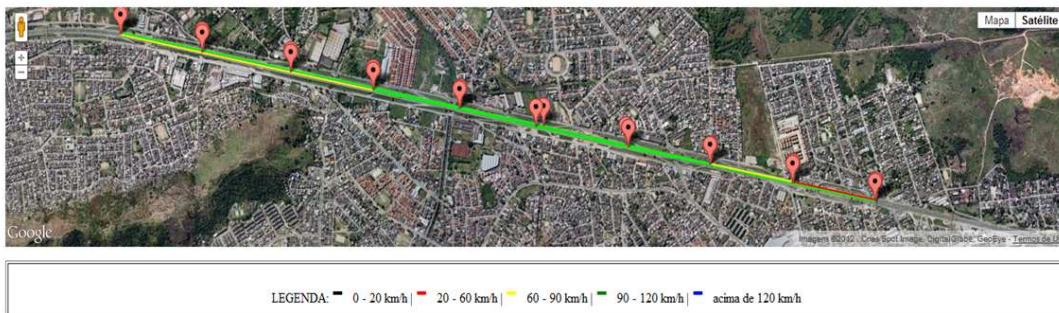
dores fora da pista. Desta forma, utilizar um marcador por trecho resultava em grandes erros no cálculo da extensão (do trecho) uma vez que o sentido da via é levado em consideração. A interface apresenta ainda informações sobre o cenário, como extensão da via, número de trechos e de unidades de acostamento, limite de velocidade, entre outros. Os dados são atualizados a cada 30 segundos. Por utilizar dados gerados por meio de simulações, o sistema toma como base o instante em que a primeira informação foi gerada. Para o funcionamento da interface em tempo real, este instante é substituído pela hora atual. Desta forma, as informações apresentadas dizem respeito aos 30 últimos segundos. Para usuários com equipamentos sem recursos gráficos, as informações são disponibilizadas na forma de tabelas de texto, indicando o trecho, a direção e a condição naquele momento. A Seção 5.2.3 apresenta maiores detalhes dos experimentos executados para testar as interfaces.

**Interface de Saída para Visualização de um Sistema de Monitoramento Centralizado de Trânsito.  
Protótipo para redes IEEE 802.11**

Projeto Final de Curso - CEFET-MG / Campus III - Leopoldina

Equipe: Isabella Muniz, Letícia Oliveira e Mauro Medina

Orientador: José Geraldo Ribeiro Júnior



[=> Clique aqui para visualizar as condições da\(s\) via\(s\) a cada intervalo de 30 segundos <=<](#)

Figura 4.5: Interface para visualização das condições de trânsito na via [7].

## 4.3 Arquitetura Descentralizada no COTraMS

O COTraMS também implementa as rotinas da arquitetura descentralizada, utilizando uma rede IEEE 802.11 b/g. As rotinas necessárias foram implementadas em *Python*. As seções a seguir apresentam detalhes da implementação da unidade de bordo e da unidade de acostamento.

### 4.3.1 Etapas Executadas na Unidade de Bordo

A execução do sistema na unidade de bordo requer seis passos: (1) busca de ESSID's conhecidos nos *beacons* recebidos, associação e conexão com o ponto de acesso; (2) recebimento da TCT pela unidade de bordo; (3) comparação da TCT recebida com a TCT local (na unidade de bordo) e atualização, se necessária; (4) detecção

do momento em que a unidade de bordo passou pela unidade de acostamento, terminando o trecho; (5) cálculo da velocidade média no trecho e (6) envio da TCT da unidade de bordo para a unidade de acostamento. É fundamental que a unidade de bordo envie a velocidade média calculada no trecho para a unidade de acostamento antes que perca o sinal. No COTraMS, o envio é feito imediatamente após detectar que a unidade de bordo passou pela unidade de acostamento, aumentando assim a probabilidade de sucesso no envio. A Figura 4.6 apresenta um diagrama com a execução dos passos para conexão e troca de informação entre unidade de bordo e de acostamento. Para que possa receber os quadros de sonda provenientes dos pontos de acesso, enquanto não estiver conectada, a interface de rede do cliente deve estar em modo monitor.

Como é possível observar na Figura 4.6, o cliente processa todos os quadros *beacon* recebidos a fim de determinar se o ESSID (usado para identificar a via) está cadastrado na aplicação cliente do sistema de monitoramento. Após identificar uma rede conhecida, ou seja, uma via monitorada, a unidade de bordo inicia o processo de endereçamento. Em seguida a unidade de bordo solicita a TCT à unidade de bordo, que envia em seguida. A unidade de bordo coleta os quadros de sonda até detectar que passou pela unidade de acostamento para calcular, na sequência, a velocidade no trecho percorrido, atualizar a TCT local e enviar para a unidade de bordo. Após o envio, a conexão é finalizada.

Para identificar em qual trecho a unidade de bordo se encontra ou definir a direção na via, usa-se a combinação das duas últimas unidades de acostamento, anterior e atual. Essa verificação é feita no arquivo XML local, detalhado na Listagem 1. Utilizando os momentos em que a unidade de bordo passou por cada unidade de acostamento e a extensão do trecho, a unidade de bordo calcula a velocidade média. Considera-se que a aplicação cliente sabe em que via a unidade de bordo está. Na Listagem 1, é possível visualizar que o trecho é composto por duas unidades de acostamento e pela extensão do trecho (linhas 4, 8 e 16). O arquivo armazena ainda as informações sobre cada unidade de acostamento, que são: o ESSID (linhas 7 e 15), os endereços MAC e as coordenadas geográficas (linhas 10, 11, 18 e 19).

Uma vez que o ESSID detectado é conhecido, a unidade de bordo se associa à unidade de acostamento e aguarda o recebimento das condições de trânsito (via TCT) enviadas pela unidade de acostamento. Vale mencionar que a interface do cliente é retirada do modo monitor logo depois da associação. Assim como demonstrado na Seção 3.3.1, o veículo atualiza a TCT local, levando em consideração o TTL em cada trecho. Após esse processo, o cliente volta a analisar os *beacons* a fim de determinar o momento em que se encontra mais próximo da unidade de acostamento seguinte. O algoritmo proposto em [54] considera tal momento como sendo aquele em que se recebe o *beacon* com maior potência de sinal. Mais uma vez, o

veículo detecta que passou pela unidade de acostamento, finalizando o percurso do trecho, quando recebe um *beacon* com potência de sinal 10 dBm mais fraca que a maior potência recebida da mesma unidade de acostamento. Após passar pela unidade de acostamento, a unidade de bordo calcula a velocidade no trecho e atualiza a TCT local com a nova Condição e TTL. A tabela resultante é enviada à unidade de acostamento. Por fim, há a desassociação e a procura pelo próximo ponto na trajetória.

#### Listagem 1. Arquivo para definição do Trecho.

```

1 <root>
2   <path id='ID'>
3     <stretch>trecho</stretch>
4     <distance>extensao</distance>
5     <encodedPath>encodedPath</encodedPath>
6     <from>
7       <ssid>Avenida Brasil Digital</ssid>
8       <macAddress>00:26:5a:a6:13:67</macAddress>
9       <location>
10        <latitude>-22.8649888333</latitude>
11        <longitude>-43.2149178333</longitude>
12      </location>
13    </from>
14    <to>
15      <ssid>ssid</ssid>
16      <macAddress>00:26:5a:a6:13:70</macAddress>
17      <location>
18        <latitude>-22.8638633333</latitude>
19        <longitude>-43.2189613333</longitude>
20      </location>
21    </to>
22  </path>
23 </root>

```

Após o processo de desassociação, para evitar a reassociação à unidade de acostamento anterior, já que a unidade de bordo ainda pode receber *beacons* desta, o endereço MAC passa a identificar a unidade de acostamento anterior. Assim, a unidade de bordo sempre armazena o endereço MAC da unidade de acostamento anterior e o atual (ou o próximo) para que possa também definir o trecho.

### 4.3.2 Unidade de Acostamento

Na unidade de acostamento, há a necessidade de instalar um *firmware* para o funcionamento do algoritmo, como o de código aberto do OpenWRT [91] por exemplo. Como se pode observar no diagrama da Figura 4.6, a unidade de acostamento espera pelo momento em que uma unidade de bordo se associa. Em seguida, a

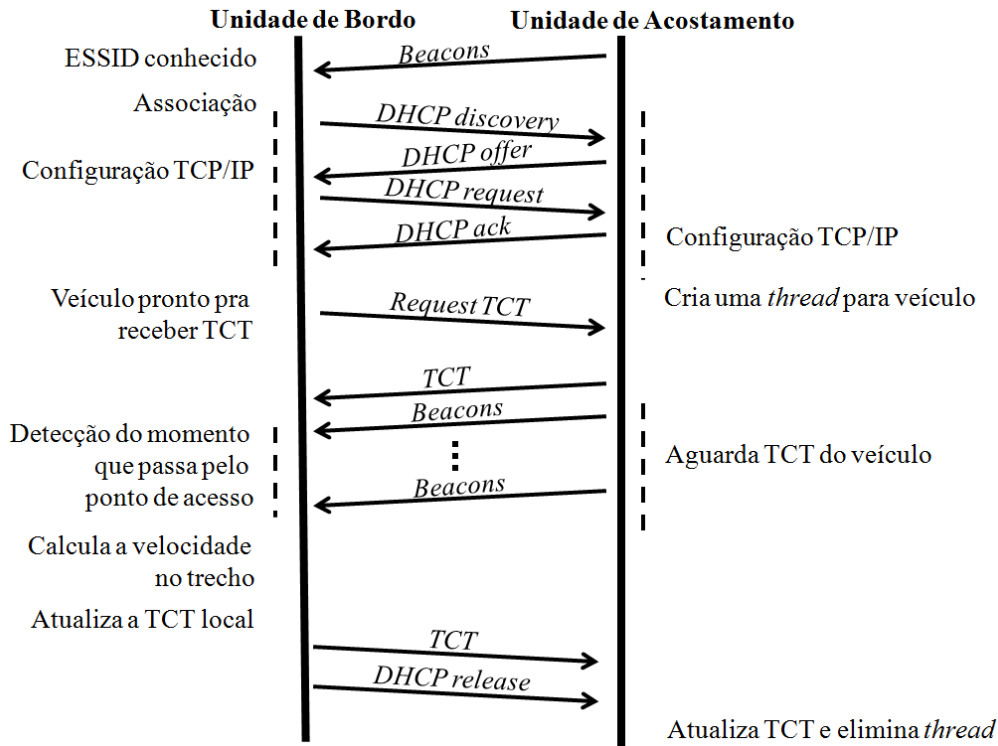


Figura 4.6: Diagrama das etapas de funcionamento do sistema proposto.

unidade de acostamento espera uma confirmação de que a unidade de bordo está pronta para receber a TCT. Ao receber esta confirmação, a unidade de acostamento envia a TCT. Para cada nova unidade de bordo conectada é instanciada uma nova *thread* para tratar a etapa de troca de informações separadamente. Uma vez enviada a TCT, a *thread* aguarda a TCT da unidade de bordo. Ao atualizar a TCT local, caso exista mais de uma conexão simultânea, a unidade de acostamento deve considerar todas as velocidades médias recebidas por ordem de tempo. Em seguida, é realizado o cálculo da média harmônica, baseado na Equação 3.2, apresentada na Seção 3.2.1.

Este capítulo apresentou detalhes das arquiteturas implementadas no COTraMS, centralizada e distribuída, para um cenário que utiliza o padrão IEEE 802.11 b/g nas unidades de acostamento e de bordo. Este protótipo foi utilizado nos experimentos que são apresentados no Capítulo 5.

# Capítulo 5

## Avaliação Experimental

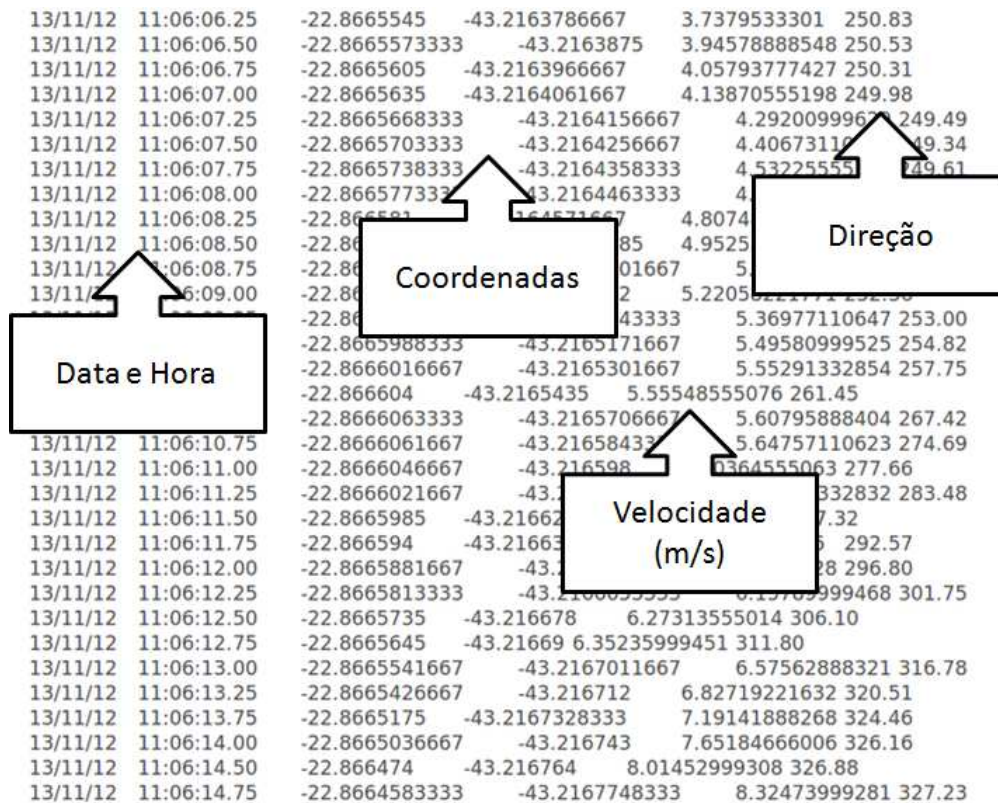
Este capítulo apresenta uma série de experimentos realizados ao longo do desenvolvimento desta tese. Além dos experimentos simulados no NS-3, os outros experimentos contaram com unidades de bordo e unidades de acostamento utilizando rede IEEE 802.11b/g em um cenário real. A Seção 5.1 apresenta os experimentos iniciais, que têm como objetivo demonstrar que é possível detectar a movimentação do veículo e estabelecer a velocidade com a qual ele trafega com base na variação da potência do sinal recebido pelas unidades de acostamento. A Seção 5.2 apresenta os experimentos realizados tanto no cenário real quanto em ambiente simulado, com o objetivo de avaliar a arquitetura centralizada. Finalizando o capítulo, a Seção 5.3 apresenta os experimentos relacionados à arquitetura descentralizada.

### 5.1 Mapeamento das Unidades de Acostamento e Detecção da Movimentação da Unidade de Bordo

O COTramS fez uso de uma estrutura existente na Avenida Brasil, na cidade do Rio de Janeiro, descrita no Capítulo 1. A conexão com os usuários utilizava a frequência 2,4 GHz e o padrão IEEE 802.11 b/g. Segundo o governo do estado do Rio de Janeiro, a largura da banda era de 10 Mb/s para compartilhamento entre os usuários [92]. Todas as unidades de acostamento estavam configuradas no mesmo ESSID, o que significa que durante a movimentação do veículo só acontece transição entre BSS do mesmo ESSID. Desta forma, o processo de reassociação entre ponto de acesso e STA (*station*) é transparente para o usuário, não havendo perda de conexão de acordo com regras de *handoff* definidas no padrão ANSI/IEEE Std 802.11 [3]. Como mencionado no Capítulo 1, a infra-estrutura da Avenida Brasil foi retirada de operação no final de 2011, devido a problemas de vandalismo e depredação.



A etapa inicial deste experimento consistiu em mapear a posição geográfica das unidades de acostamento. Enquanto uma unidade de bordo percorreu a Avenida Brasil, duas rotinas foram executadas em paralelo: a primeira armazenava a hora, a data, a velocidade, a direção e as coordenadas geográficas obtidas via GPS (Figura 5.1) e a segunda armazenava as informações da rede (MAC da unidade de acostamento, MAC da unidade de bordo, potência do sinal recebido, data e hora de recebimento), obtidas via quadros de sonda enviados pela unidade de acostamento (Figura 4.1, Seção 4.1). Para mapeamento utilizou-se um GPS modelo u-blox 5, que é capaz de detectar a posição da unidade de acostamento quatro vezes por segundo. O cliente, responsável por coletar e armazenar os dados, foi executado em um *laptop* Intel Atom N450, com 2GB de RAM e 250GB de disco rígido. Não foi utilizada nenhuma antena externa.



Como em determinados pontos da Avenida Brasil nenhum quadro de sonda da rede com ESSID Avenida Brasil Digital foi recebido, acredita-se que nestes locais havia algum problema físico com as unidades de acostamento. Outra situação detectada durante o mapeamento foi que por algumas vezes foram capturados quadros de sonda de apenas uma unidade de acostamento (mesmo endereço MAC) por cerca de 1,4 km. Isso representa receber quadros da mesma unidade de acostamento por mais de dois minutos estando numa velocidade entre 30 e 50 km/h, como mostra a Figura 5.2.

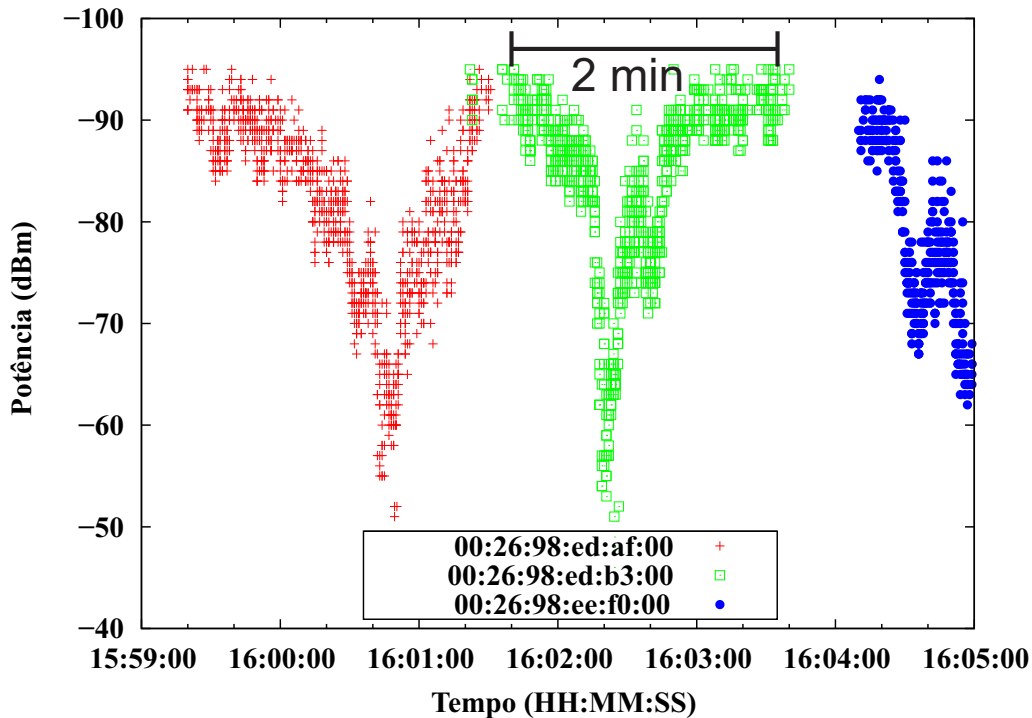


Figura 5.2: Variação da potência do sinal recebido - Captura de *beacons* na faixa de velocidade entre 30 e 50 km/h.

Na Figura 5.3 é possível verificar que a curva do sinal recebido apresentou o comportamento esperado, apresentando picos no momento em que a unidade de bordo estava mais próxima das unidades de acostamento. Como descrito na Seção 4.1.2, quando este pico está próximo de -60 dBm a posição da unidade de bordo apresenta uma discrepância entre 3 e 8 metros quando comparada com a posição da unidade de acostamento. Essa precisão é satisfatória considerando que este dado foi obtido na Avenida Brasil, onde se tem até quatro pistas, com cerca de 3 metros, de cada lado e que a unidade de bordo se localiza ao centro da via.

Como apresentado no Capítulo 4, para economizar recursos de rede, na primeira versão do COTrAMS, a unidade de acostamento enviava, dentro de um intervalo pré-determinado, apenas um valor de potência de sinal para a central de controle, representado pela mediana dos valores daquele intervalo. Desta forma, verificou-se a necessidade de testar se as características do sinal enviado da unidade de bordo

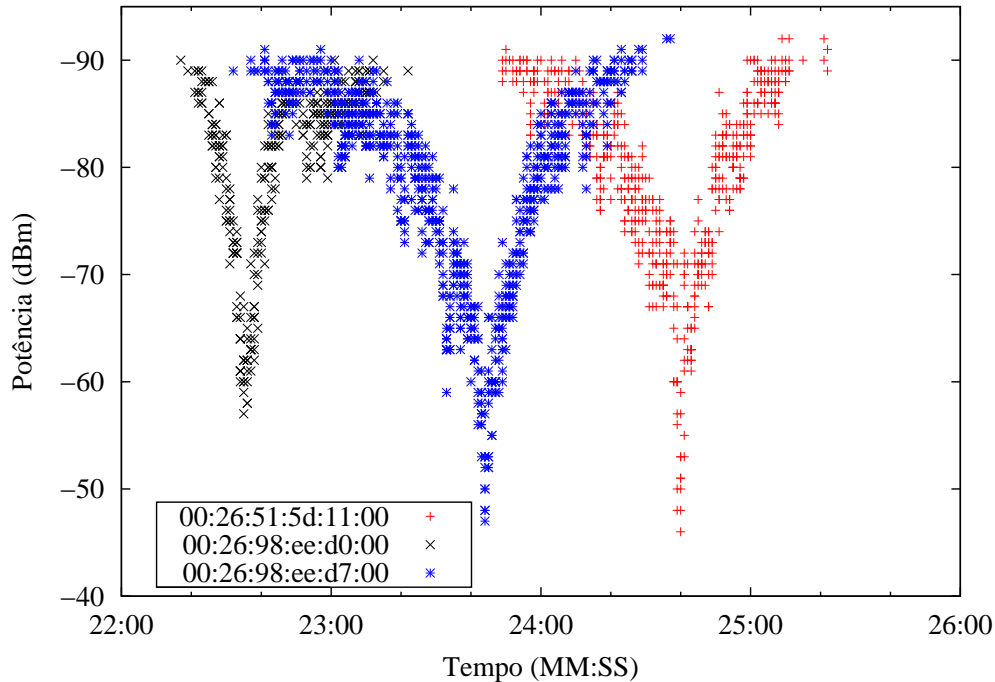
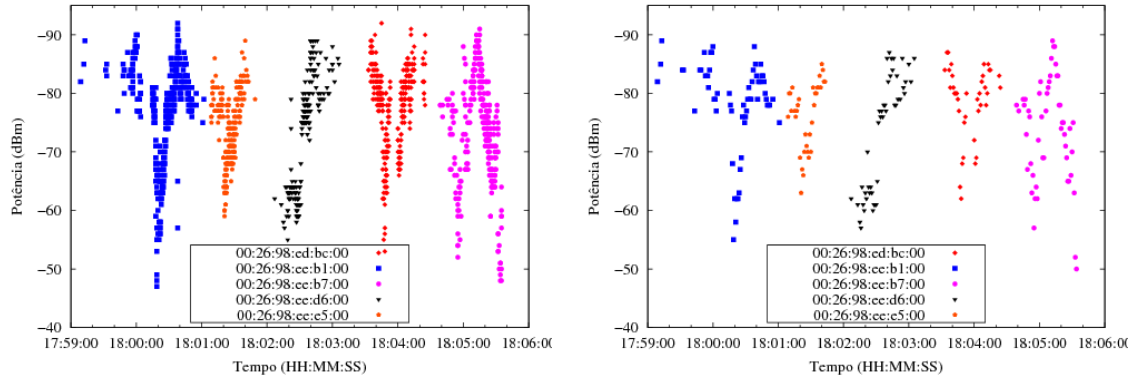


Figura 5.3: Comportamento do valor de Potência do Sinal Recebido pela Unidade de Acostamento.

para a central de controle se mantinham, mesmo com o descarte de 90% das informações recebidas pela unidade de bordo (Figura 5.4). A Figura 5.4(a) apresenta a variação da potência de transmissão recebida pelo nó cliente, com todos os quadros de sonda recebidos. A Figura 5.4(b) apresenta o comportamento do sinal considerando apenas a mediana dos valores obtidos a cada segundo. Como pode ser visto, o uso da mediana se apresenta como uma boa opção uma vez que o comportamento da variação da potência do sinal é mantido, mesmo enviando cerca de oito vezes menos dados para a central de controle. Além de diminuir o tráfego na rede e o processamento da central de gerenciamento de dados, o uso da mediana minimiza o efeito de ruídos no sinal, eliminando valores discrepantes, como apresentado na Seção 4.1.1.

Durante os seis dias de coleta de dados, foram percorridos cerca de 61 quilômetros (dentro de um trecho de 16 quilômetros). Devido ao excesso de veículos na via, a velocidade variou entre 0 e 80km/h durante o percurso. A Figura 5.5 apresenta os valores de potência recebidos pela unidade de bordo em uma das regiões onde a velocidade máxima foi de 50 km/h, enquanto a Figura 5.6 apresenta a velocidade, gerada a partir das medidas obtidas via GPS. É possível perceber que no minuto 14 o veículo enfrentou um engarrafamento. O resultado é que o nó cliente recebeu pacotes da mesma unidade de acostamento (endereço MAC 00:26:98:ef:da:00) por mais tempo. No trecho onde o veículo manteve uma velocidade média entre 40 e 50km/h o resultado foi o esperado, uma vez que foi possível detectar quando



(a) Beacons coletados no intervalo de cada segundo.

(b) Mediana - um valor por segundo.

Figura 5.4: Comparação do comportamento dos quadros de sonda recebidos após o descarte de 90%.

a unidade de bordo se aproximava e quando se distanciava de cada unidade de acostamento.

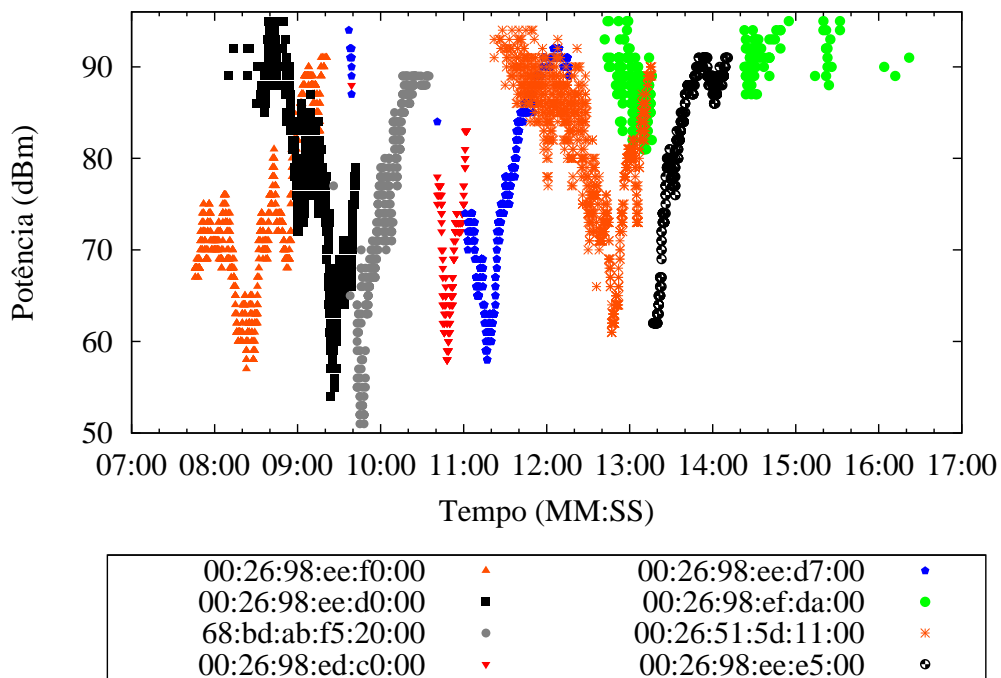


Figura 5.5: Captura de *beacons* - Variação da potência recebida.

Com os resultados obtidos neste primeiro experimento conclui-se que é possível detectar a movimentação de unidades de bordo utilizando apenas os quadros de sonda de gerenciamento de uma rede sem-fio IEEE 802.11b/g. Para os experimentos com o COTraMS utilizou-se uma rede aberta do padrão IEEE 802.11 b/g <sup>1</sup>.

<sup>1</sup>O uso de chaves de encriptação não impede o uso do sistema proposto, uma vez que o uso de protocolos como WPA2-AES gera apenas 0,56% de sobrecarga na vazão [96].

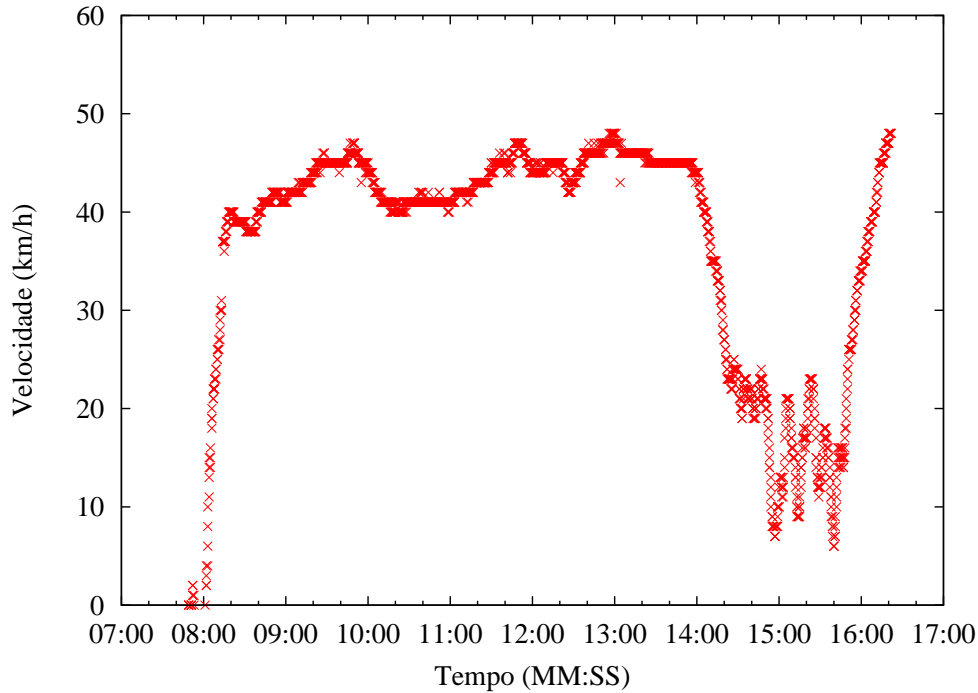


Figura 5.6: Velocidade durante o percurso - dados obtidos via GPS.

## 5.2 Experimentos - Arquitetura Centralizada

Esta seção apresenta experimentos realizados em cenários reais, no Rio de Janeiro, RJ, com o objetivo de avaliar o sistema de monitoramento de trânsito proposto. Na Seção 5.2.1, são apresentados os experimentos que medem o tempo necessário para executar cada etapa da arquitetura implementada no COTraMS. Estes experimentos foram realizados no Campus da Ilha do Fundão, na UFRJ (Universidade Federal do Rio de Janeiro). Na Seção 5.2.2, são apresentados os experimentos utilizando dados coletados na Avenida Brasil, na cidade do Rio de Janeiro. Nos experimentos na UFRJ, utilizou-se um *laptop* Sony Vaio com processador I5-3210m, 6 GB de RAM e disco rígido de 640 GB e interface de rede sem-fio como unidade de bordo. Não foi utilizada nenhuma antena externa. Nos experimentos na Avenida Brasil, utilizou-se um *smartphone* Nokia N900 executando a distribuição Maemo Linux. As unidades de bordo foram utilizadas para coletar os dados e tratá-los a fim de gerar informações sobre a movimentação da unidade de bordo.

Para analisar a precisão do sistema proposto, usou-se em todos os experimentos um GPS modelo `u-blox EVK-5H`, informando a posição da unidade de bordo quatro vezes por segundo. Assim como em outros sistemas existentes na literatura [32, 35], a fim de gerar as condições da via, definiu-se três intervalos de velocidade: de 0 a 39 km/h, o sistema indica que o trânsito está LENTO; de 40 a 79 km/h, o trânsito é considerado BOM, e a partir de 80 km/h, é considerado RÁPIDO [54]. Considera-se que os resultados obtidos via COTraMS apresentam boa precisão quando estão no

mesmo intervalo dos resultados apresentados pelo GPS.

Para avaliar a proposta em um cenário mais complexo, com um número maior de veículos, foram realizadas simulações utilizando o simulador NS-3. Estas simulações são apresentadas na Seção 5.2.3.

### 5.2.1 Conexão entre Unidade de Bordo e uma Unidade de Acostamento

Neste experimento, o objetivo é verificar o tempo gasto na associação à unidade de acostamento e no envio das configurações de rede. Foram utilizadas uma unidade de acostamento e uma unidade de bordo. Para simular uma avenida sem qualquer infraestrutura elétrica, no cenário montado no Campus da Ilha do Fundão, na UFRJ, cada unidade de acostamento foi composta por um kit com autonomia de energia, ilustrado na Figura 5.7. Esse equipamento foi baseado no kit usado pelo projeto ReBUS [6] (Figura 2.11). Cada kit para as unidades de acostamento, usado pelo COTraMS, é composto por um roteador D-Link modelo DIR-320, um pendrive USB 2.0 de 32 GB, um circuito regulador de tensão e uma bateria de 12V/7 Ah. Utilizou-se apenas a antena padrão do roteador em questão.



Figura 5.7: Kit que compõe a Unidade de Acostamento.

Foi avaliada também a eficiência da proposta descrita no Capítulo 3 para detecção do momento em que a unidade de bordo passa pela unidade de acostamento podendo então desconectar. O trecho apresentado na Figura 5.8 possui 900 m de extensão. Uma limitação desse cenário é o limite de velocidade permitido nesta via do campus universitário, de 40 km/h.

A Tabela 5.1 apresenta os resultados do tempo de conexão, definido como o intervalo de tempo desde o momento em que a unidade de bordo recebe o primeiro quadro de sonda do ESSID até o momento em que ela recebe as configurações de rede. Como é possível observar, quanto mais rápido a unidade de bordo estiver, mais tempo ela leva para estabelecer a conexão, uma vez que aumenta a perda de pacotes com o aumento da velocidade [97, 98]. Esta perda acontece, considerando a propagação do sinal na frequência 2,4GHz, onde as transmissões estão sujeitas a



Figura 5.8: Cenário - Experimento 1 - UFRJ.

interferências e desvanecimento [99], além de ser sensível ao efeito Doppler [100]. A perda de pacotes resultou no aumento do tempo para associação. Estando mais lenta, os efeitos da atenuação são menores, permitindo que a conexão seja concluída mais rapidamente.

Por outro lado, os tempos altos apresentados na Tabela 5.1 (4, 7 e 9 segundos) não indicam necessariamente que este seja o tempo mínimo necessário para o processo. Outros trabalhos da literatura demonstram que o tempo é afetado diretamente pelas características do cenário, como apresentado na Seção 2.1.2. Em regiões onde não há obstáculos, como neste trecho, o alcance de um quadro de sonda é maior do que o necessário para haver pareamento entre os dispositivos. Na maioria das interfaces de rede IEEE 802.11 é necessária uma potência de  $-90$  dBm para que um quadro seja corretamente recebido quando for transmitido a  $1$  Mb/s (taxa na qual os *beacons* são enviados). Essa potência é inferior à necessária para receber o mesmo quadro se transmitido a  $54$  Mb/s [99].

Durante os experimentos, foram detectadas cerca de 11 redes IEEE 802.11b/g utilizando os canais 9 e 11 (o canal 9 era utilizado pela unidade de acostamento).

Ao detectar que a unidade de bordo passou pela unidade de acostamento e enviou a TCT, COTraMS força a desconexão. Durante os experimentos, a unidade de bordo sempre desconecta logo após passar pelo ponto de acesso, ou seja, ao receber um sinal com potência  $10$  dBm mais fraca que o pico de potência, mostrando a eficiência da técnica adotada.

Tabela 5.1: Tempo médio de conexão entre unidade de bordo e unidade de acostamento. Segundo Gass et al. [10], o limite técnico para o padrão IEEE 802.11 b é de 120 km/h, em um cenário livre de interferências.

Tempo Médio de Conexão	
Velocidades	Tempo
20 km/h	< 1 seg
25 km/h	4 seg
35 km/h	7 seg
40 km/h	9 seg

## 5.2.2 Experimento na Avenida Brasil

Na Avenida Brasil, foram mapeadas 63 unidades de acostamento, numa área de 23 km, das 163 unidades de acostamento existentes. A Figura 5.9 apresenta o mapeamento destas unidades de acostamento na avenida, realizado com a ferramenta Google Maps, com destaque na região onde foram realizados a maioria dos experimentos. No entanto, apenas 17 unidades de acostamento estavam em funcionamento durante os experimentos. A Figura 5.10 destaca as duas regiões utilizadas nos experimentos apresentados nesta seção. As coordenadas e o endereço MAC de todas as unidades de acostamento estão definidos em um banco de dados na central de controle. A distância entre as unidades de bordo varia de 150 a 1100 m. Para coletar os dados, utilizou-se como cliente um *smartphone* Nokia N900 executando a distribuição Maemo Linux. Os dados obtidos a partir das unidades de acostamento foram armazenados localmente na unidade de bordo para posterior análise e visualização. Novamente foi utilizado um GPS, descrito na Seção 5.2.1, para comparação com os resultados da proposta. O GPS estava conectado a um laptop Intel Atom N450 com 2 GByte de RAM, Linux e uma interface de rede IEEE 802.11b/g interna. Foram coletados os dados: hora, dia, velocidade, direção e coordenadas geográficas (Figura 5.1).

As Figuras 5.11 e 5.12 apresentam o resultado da coleta de dados em uma parte da Avenida Brasil. A Figura 5.11 ilustra o comportamento da potência do sinal recebido via quadros de sonda. As sete unidades de acostamento desta parte da avenida (com 4,2 km) apresentaram um sinal com potência mais forte que  $-60$  dBm, possibilitando um alto nível de precisão na definição da posição do veículo na via, como descrito na Seção 4.1.2. A Figura 5.12 apresenta os resultados comparativos das velocidades médias. O resultado obtido via GPS (a cada 0,25 segundo) é representado pela linha cheia; o asterisco representa a média harmônica das velocidades obtidas pelo GPS em cada trecho e o círculo representa os resultados inferidos utilizando o método proposto na arquitetura centralizada, baseado na Equação 3.1 (Seção 3.2). Nesta parte da via, a distância entre as unidades de acostamento variou entre 250 m



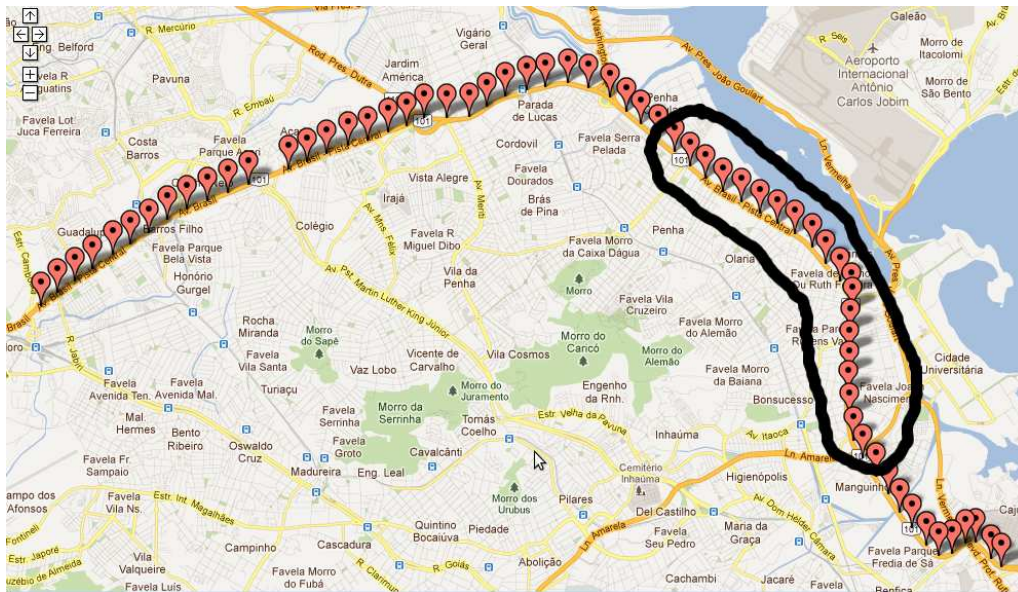
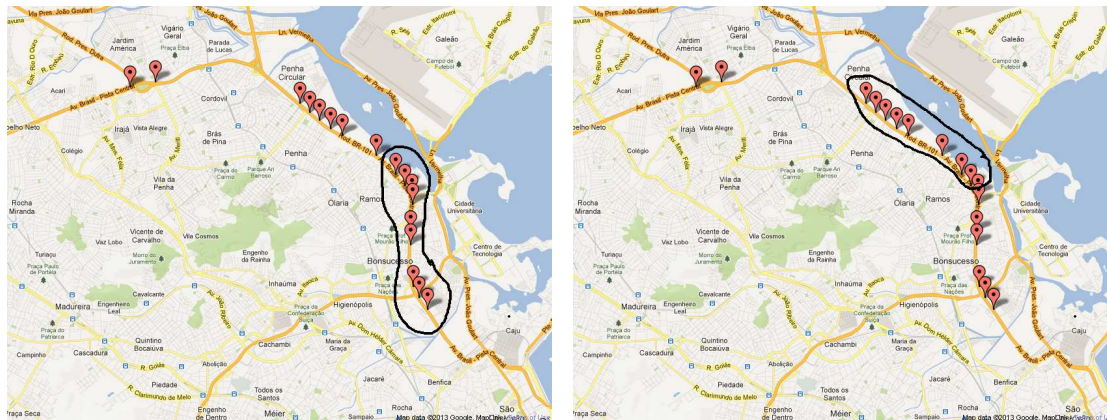


Figura 5.9: Mapeamento de 63 unidades de acostamento na Avenida Brasil.



(a) Região 1 da Avenida Brasil com 4,2 km.

(b) Região 2 da Avenida Brasil com 6,8 km.

Figura 5.10: Regiões da Avenida Brasil onde foram realizados os experimentos.

e 1100 m e não houve grande variação na velocidade média dos veículos. As linhas pontilhadas horizontais no gráfico da Figura 5.12 representam os limites dos intervalos de velocidade definidos na Seção 5.2. É possível observar na Figura 5.12 que os resultados estão muito próximos aos do GPS.

As Figuras 5.13 e 5.14 apresentam os resultados obtidos em outra parte da Avenida Brasil (com 6,8 km). Nessa parte da via houve uma maior variação na velocidade média dos veículos. Esta variação foi causada por engarrafamentos nos intervalos entre 46 e 48 minutos e entre 50 e 51 minutos. Assim como identificado nos resultados das simulações apresentados na Seção 5.2.3, estas variações afetam a precisão do COTrAMS uma vez que o sistema trabalha com a velocidade média no trecho. No entanto, considerando os critérios apresentados na Seção 5.2, onde se definiu três intervalos de velocidade, o método proposto apresentou, novamente,

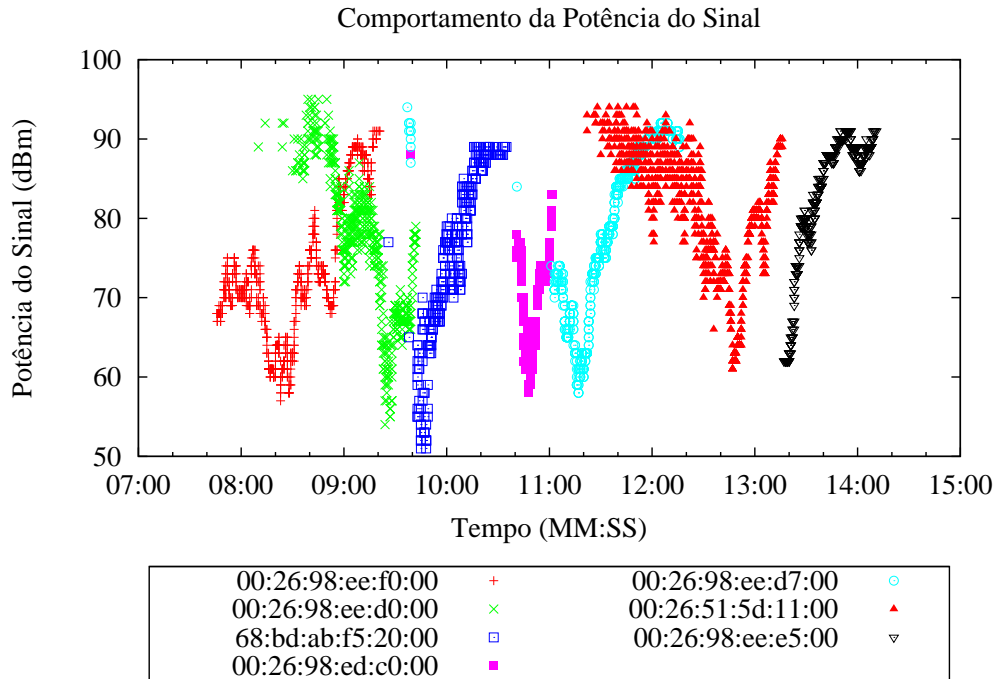


Figura 5.11: Comportamento da potência do sinal recebido - Região com 4,2 km da Avenida Brasil.

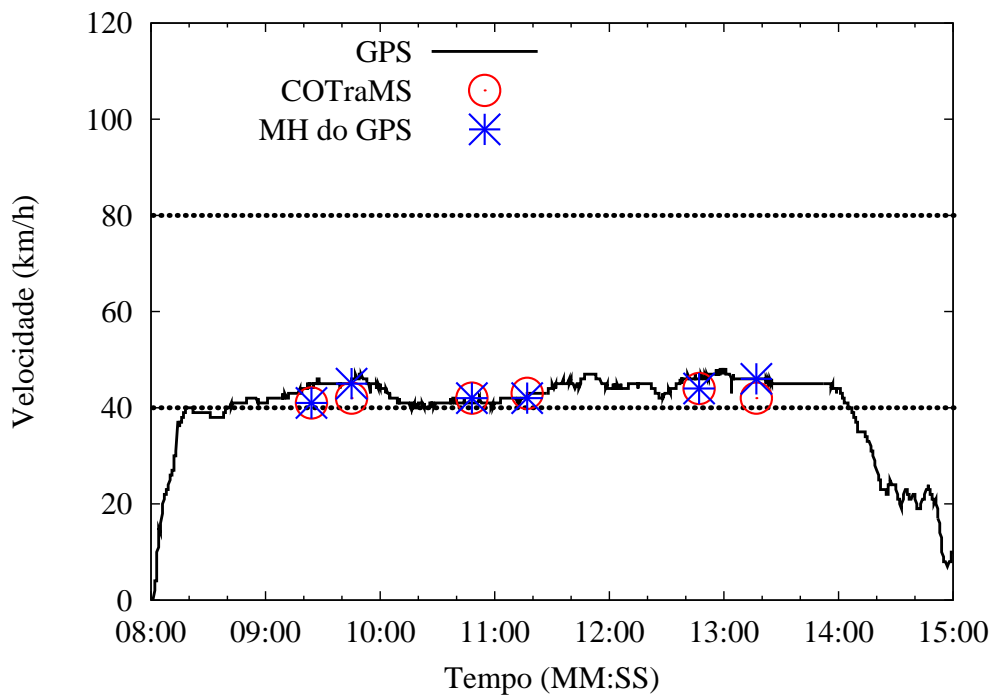


Figura 5.12: Comparação de resultados (velocidade média em cada trecho) - Região com 4,2 km da Avenida Brasil.

um resultado correto em 100% dos casos. Novamente, as linhas pontilhadas horizontais na Figura 5.14 representam os limites dos intervalos de velocidade definidos na Seção 5.2.

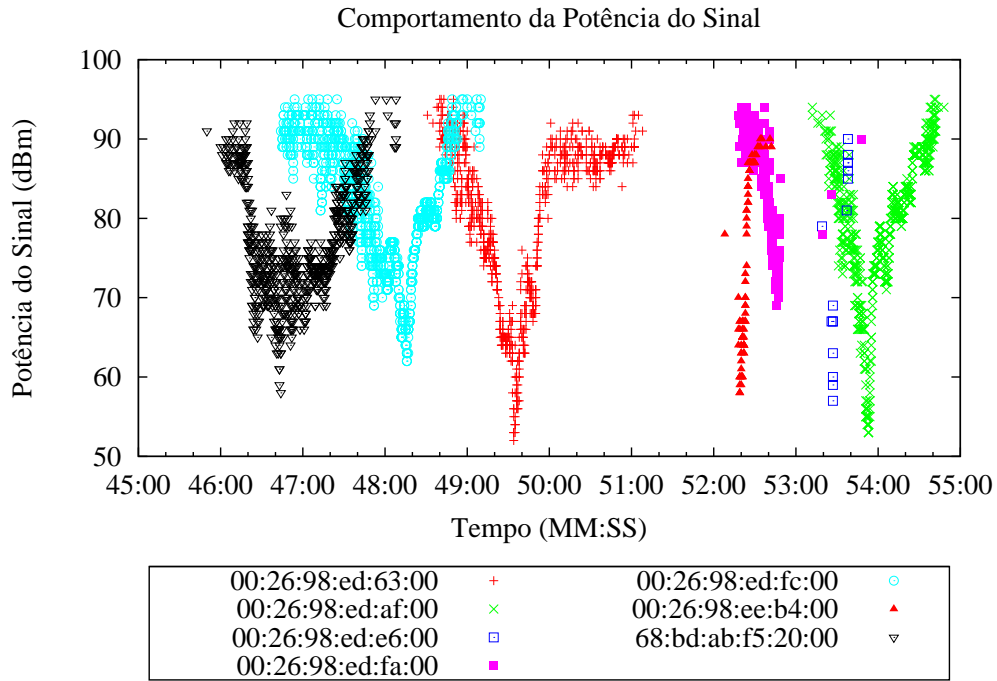


Figura 5.13: Comportamento da potência do sinal recebido - Região com 6,8 km da Avenida Brasil.

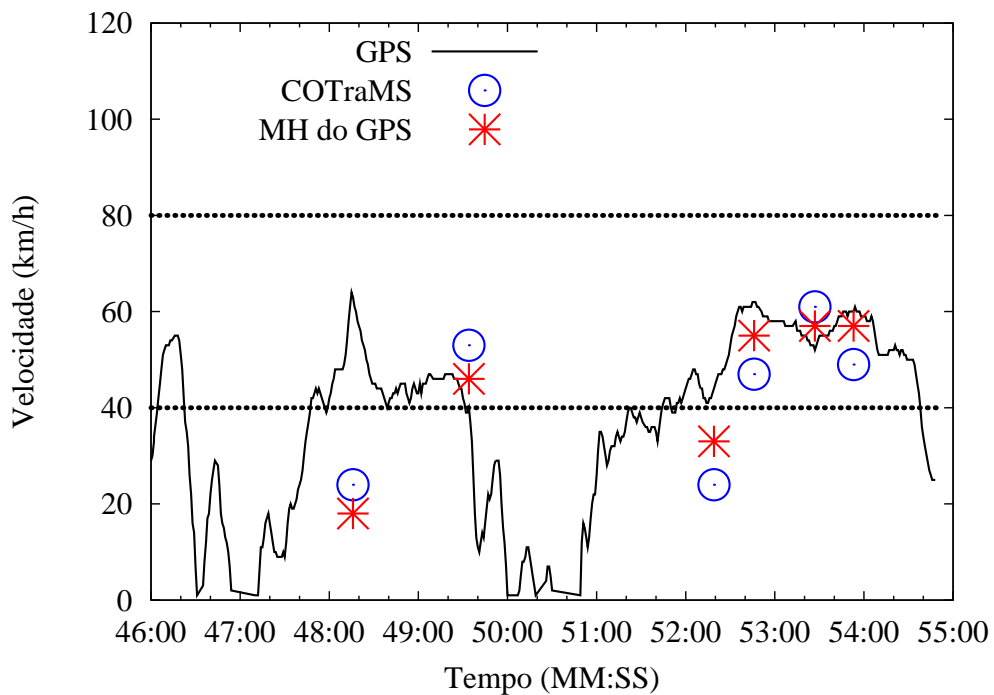


Figura 5.14: Comparação de resultados (velocidade média em cada trecho) - Região com 6,8 km da Avenida Brasil.

### 5.2.3 Experimentos Realizados via Simulação

Nesta seção são apresentadas as simulações executadas com o objetivo de avaliar a arquitetura centralizada em cenários com condições próximas de um cenário real, com um número maior de veículos e variando parâmetros como: tamanho da pista, número de pistas, número de obstáculos, posição dos obstáculos e porcentagem de carros e caminhões. Para as simulações utilizou-se o simulator NS-3. A mobilidade das unidades de bordo foi definida a partir de uma implementação do modelo de motorista inteligente (IDM - *Intelligent Driver Model*) [101] e de um modelo de troca de pista (MOBIL) [102], ambos propostos por Treiber e D. Helbing [53].

#### IDM - *Intelligent Driver Model*

O IDM é um modelo de tráfego de veículos *car-following*, ou seja, a aceleração e desaceleração de cada veículo depende não só da própria velocidade e da velocidade desejada, como também da posição e velocidade do veículo imediatamente à sua frente, na mesma faixa. O parâmetro de saída é a aceleração escolhida ( $dv/dt$ ) para o veículo. O resultado da aceleração é encontrado utilizando a Equação 5.1:

$$\frac{dv}{dt} = a \left[ 1 - \left( \frac{v}{v_0} \right)^\delta - \left( \frac{s * (v, \Delta v)}{s} \right)^2 \right], \quad (5.1)$$

onde  $v$  é a velocidade do próprio veículo,  $\Delta v$  é a velocidade relativa dos veículos (diferença entre velocidades),  $s$  é a distância entre os veículos e,  $s * (v, \Delta v) = s_0 + \max \left[ 0, \left( vT + \frac{v\Delta v}{2\sqrt{ab}} \right) \right]$ .

A aceleração em uma via livre é representada pela Equação 5.2:

$$\left[ 1 - \left( \frac{v}{v_0} \right)^\delta \right], \quad (5.2)$$

onde, a aceleração (em um caminho livre) diminui ao se aproximar da velocidade desejada. A desaceleração é induzida por desaceleração do veículo imediatamente a frente.

Cada veículo, no IDM, tem como parâmetro a velocidade desejada, o tempo mínimo necessário existente entre dois veículos, a aceleração sem tráfego, a desaceleração confortável, se necessário, e uma distância mínima de segurança para o veículo da frente. Esses parâmetros são analisados em tempo de execução para definir a aceleração do veículo. A versão utilizada implementa dois perfis de veículos, um para carro (classe **Sedan**) e outro para caminhões (classe **Truck**).

## MOBIL - Lane Change Model

Este modelo implementa os parâmetros para mudança de faixa para cada veículo. Critérios de segurança e incentivo definem cada mudança de faixa. No que se refere à segurança, a mudança de faixa não deve fazer com que o veículo a ser ultrapassado tenha uma desaceleração brusca, que cause insegurança, representado na Equação 5.3:

$$acc'(B') > -b_{save}, \quad (5.3)$$

onde, a  $b_{save}$  é o critério de segurança.

O critério de incentivo tem por objetivo oferecer uma pista mais livre. Para concretizar o critério de incentivo, o MOBIL primeiro calcula a vantagem da mudança de faixa do veículo, que é a diferença entre a aceleração atual do veículo e a aceleração do veículo depois de mudar de faixa. O objetivo é aumentar a aceleração ou diminuir a desaceleração. O modelo considera também a vantagem para o veículo que está atrás, tanto na faixa atual quanto na nova faixa. O critério de incentivo é calculado pela Equação 5.4:

$$acc'(M') - acc(M) > p[acc'(B) - acc'(B')] + a_{thr} \quad (5.4)$$

onde, a  $a_{thr}$  funciona como um limite adicional para evitar mudanças exageradas de pista.

### Implementação no NS-3

O IDM foi utilizado com o objetivo de simular movimentos reais dos veículos, no que se refere a aceleração, redução de velocidade, troca de pista, entre outros. Este modelo foi implementado no NS-3 por Hadi [8]. Cinco classes principais concentram os diversos componentes implementados. A Figura 5.15 apresenta os principais componentes do IDM, implementados por Hadi:

- **Vehicle** - nó móvel que contém um dispositivo para comunicação sem-fio;
- **Obstacle** - nó que não tem mobilidade (velocidade = aceleração = modelo = mudança de pista = 0);
- **Model** - modelo de mobilidade IDM *car-following*;
- **LaneChange** - modelo de mudança de faixa MOBIL;
- **Highway** - Representa uma rodovia reta, com múltiplas pistas e bi-direcional. Contém os objetos da classe **Vehicle** e **Obstacle**. Usa as propriedades do **Model** e do **LaneChange** para controlar a mobilidade dos veículos.

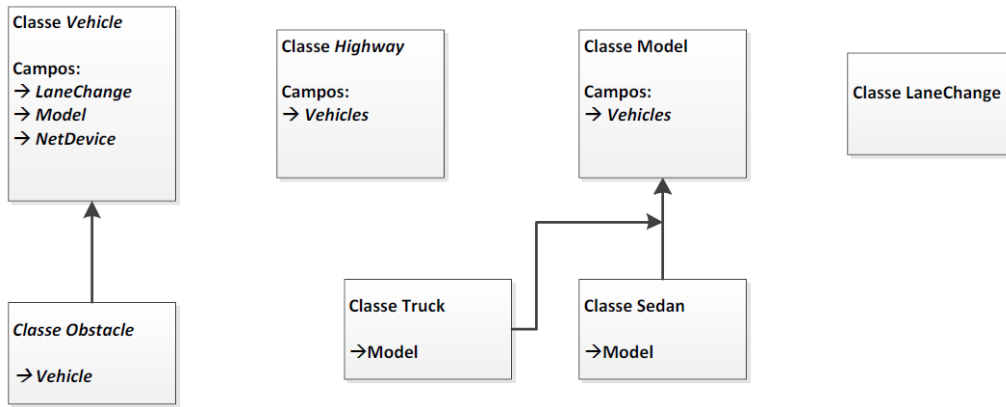


Figura 5.15: Componentes principais do simulador, adaptado de [8].

O objeto **Highway** gerencia o comportamento e a mobilidade dos veículos na via, uma vez que os modelos de mobilidade, neste caso os modelos *car-following*, necessitam conhecer a posição e a mobilidade dos outros veículos. Cada veículo possui a estrutura de um nó sem-fio no NS-3. Desta forma, veículos se movimentam de forma que a mobilidade seja realista e se comunicam na forma de uma VANET. A implementação permite criar cenários de simulação utilizando VANETs em avenidas com unidades de bordo e de acostamento customizados, variando os parâmetros descritos na Tabela 5.2. Além disso, é possível personalizar o comprimento da via, o fluxo de tráfego (unidirecional ou bidirecional), o número de faixas, a largura das faixas, entre outros.

Tabela 5.2: Parâmetros para unidades de bordo e unidade de acostamento.

Parâmetro	UnB*	UnA**	Unidade
Identificador	Sim	Sim	número
Tamanho	Sim	Sim	metros
Largura	Sim	Sim	metros
Número da Faixa	Sim	Sim	$1 > x < n$
Posição (pista)	Sim	Sim	metros
Direção	Sim	Não	Leste ou oeste
Velocidade	Sim	Não	km/h
Aceleração	Sim	Não	km/h
Modelo de mobilidade	Sim	Não	IDM
Troca de Pista	Sim	Não	MOBIL

\* Unidade de Bordo  
 \*\* Unidade de Acostamento

## Vehicle

O veículo é um nó móvel que contém um dispositivo para comunicação sem-fio. Cada veículo possui os seguintes parâmetros: ID (identificação), tamanho, largura, número da faixa onde está no momento, direção (leste ou oeste), posição, velocidade, aceleração, modelo de mobilidade e troca de pista.

A implementação define o objeto *Highway* como responsável pelo gerenciamento da posição, direção e pela faixa que cada veículo ocupa na pista. O usuário pode definir manualmente os parâmetros de aceleração e velocidade para cada veículo, ou estes parâmetros podem ser baseados nas regras geradas pelo referido modelo IDM (*Intelligent Driver Model*) de mobilidade. O veículo se baseia no MOBIL *lane change model* para fazer a troca de pista, quando necessário. O usuário pode ainda inserir manualmente os veículos na via. Na opção de inserção automática, o usuário deve definir a distância mínima para o carro à frente. Por meio de um dispositivo de comunicação sem-fio, cada veículo é capaz de se comunicar com outro (dentro dos limites de alcance do equipamento definido) através dos canais IEEE 802.11a/b/g, no NS-3.

## Obstacle

Com exceção da mobilidade, um obstáculo possui as mesmas características de um veículo. Um obstáculo pode ser usado como uma barreira para fechar uma faixa de rolamento completamente ou apenas parte dela, por exemplo, permitindo apenas a passagem de motos. Para isso é preciso definir em qual faixa e direção o obstáculo estará. Um obstáculo pode também simular uma unidade de acostamento localizada fora da pista.

## Avaliação dos Modelos de Mobilidade

Alguns testes foram executados para avaliar a implementação do modelo de mobilidade no NS-3, bem como do modelo de troca de pista. O primeiro teste tem como objetivo avaliar a movimentação dos veículos. A Figura 5.16 apresenta os momentos em que as unidades de bordo passam pelas unidades de acostamento, considerando apenas um sentido. Cada linha ilustra a movimentação de um veículo. Os pontos destacam o momento em que a unidade de bordo esteve mais próxima da unidade de acostamento. No eixo  $x$  está o tempo, em segundos, e no eixo  $y$  o número de cada unidade de acostamento. A Figura 5.17 apresenta a avaliação da movimentação dos veículos nos dois sentidos.

Em seguida foram criados cenários com o objetivo de avaliar o comportamento dos veículos diante de obstáculos adicionados na pista. A Tabela 5.3 apresenta os parâmetros utilizados na construção de um cenário para avaliação dos modelos de

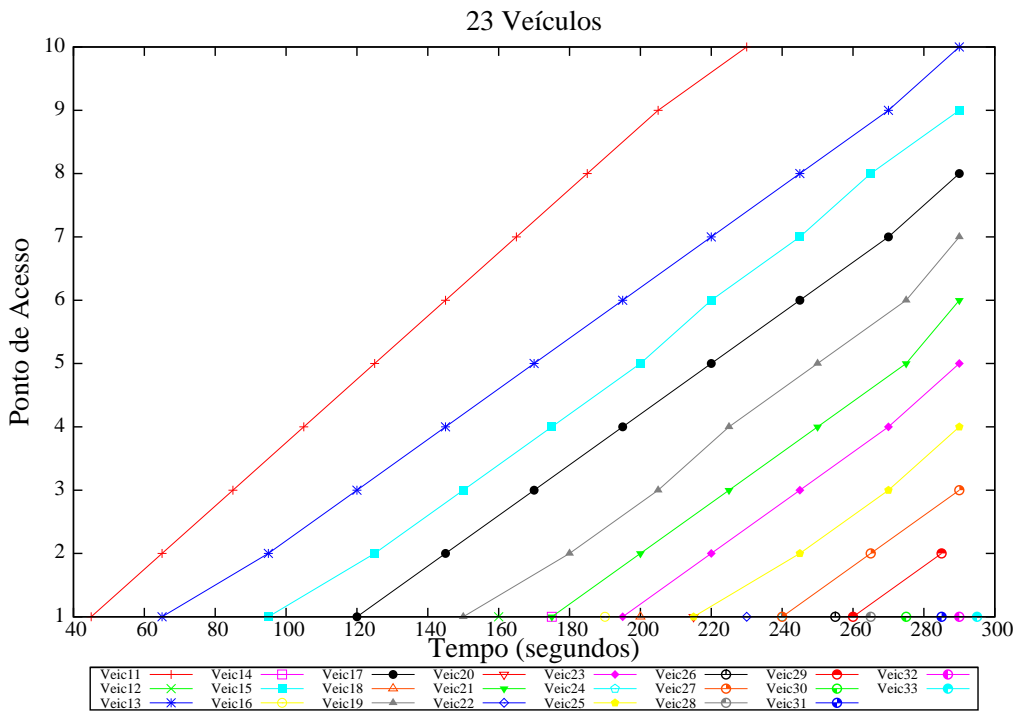


Figura 5.16: Movimentação dos veículos apenas em um sentido da via.

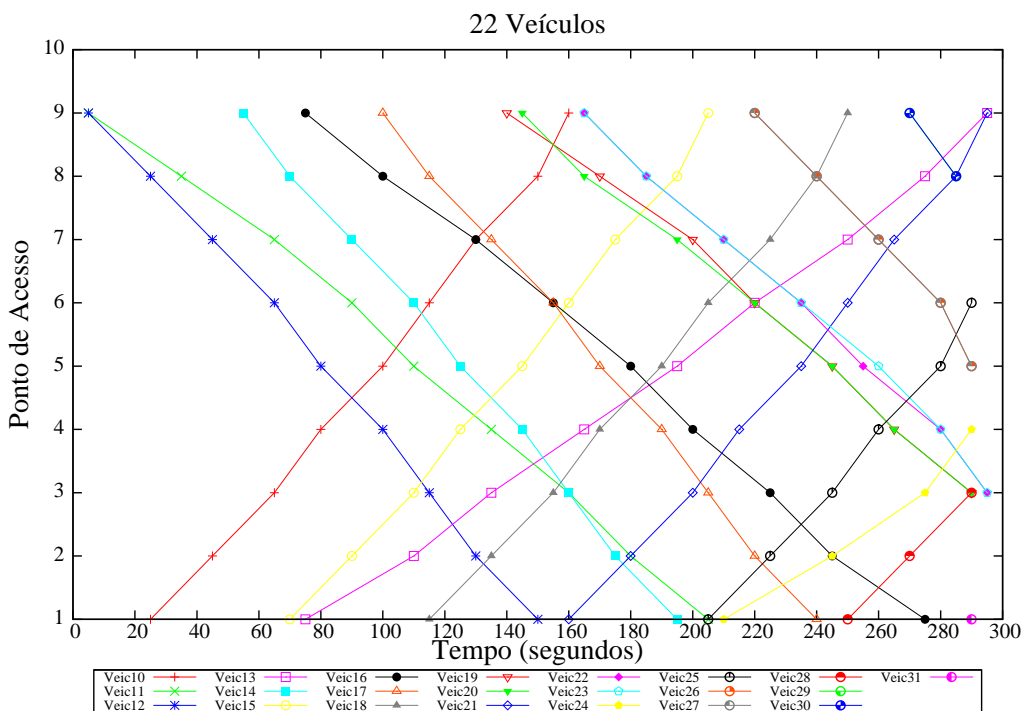


Figura 5.17: Movimentação dos veículos nos dois sentidos da via.

mobilidade. Obstáculos foram adicionados na pista mais à direita com o objetivo de bloquear a pista, obrigando os veículos a trocarem de pista, resultando em variações da velocidade e em pequenos engarrafamentos. A Figura 5.18 ilustra alguns trechos da via, bem como a posição das unidades de bordo e das unidades de acostamento.

A Figura 5.19 apresenta o efeito dos obstáculos no tráfego de veículos. É possível



Tabela 5.3: Parâmetros usados na simulação

Parâmetros	Valores
Extensão da via	5200 m
Largura da pista	4 m
Número de pistas	3
Número de unidades de acostamento	9
Número de trechos	16
Duas direções	Verdadeiro
Mudança de pista	Verdadeiro
Adição automática de novos veículos	Verdadeiro
Distância de Segurança	600 m
Injection mix value	100 m

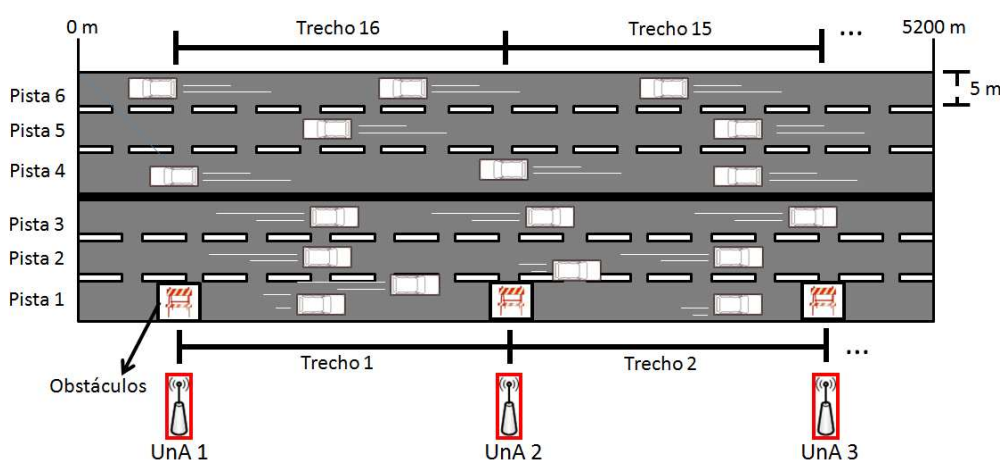


Figura 5.18: Exemplo de uma parte do cenário usado na avaliação da implementação.

visualizar a variação da velocidade de cada veículo na simulação. São identificados basicamente dois perfis, o dos veículos com pista livre, que tendem a alcançar a velocidade desejada de forma constante e rápida e o perfil dos veículos que tentam utilizar as vias com obstáculos, que apresentam uma maior variação na velocidade com as constantes trocas de pista.

Para testar se o obstáculo iria obstruir a passagem do veículo, foi criado um cenário com apenas uma pista. Como é possível visualizar na Figura 5.20, todos os veículos ficaram parados em frente ao primeiro obstáculo.

## Experimentos e Resultados

Os experimentos apresentados a seguir são baseados nos cenários com os parâmetros fixos apresentados na Tabela 5.4. O objetivo é simular um ambiente com características semelhantes a grandes vias do Rio de Janeiro, como a Avenida Brasil e a Avenida Presidente João Goulart (Linha Vermelha). Outros parâmetros foram variados e são descritos no decorrer desta seção.

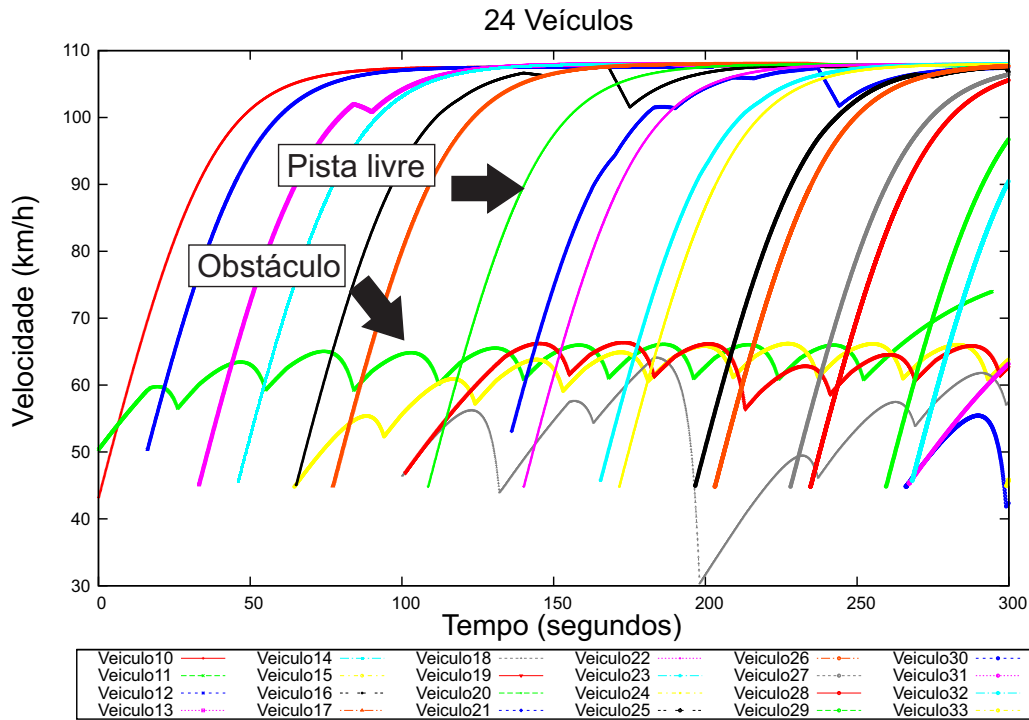


Figura 5.19: Variação da velocidade dos veículos.

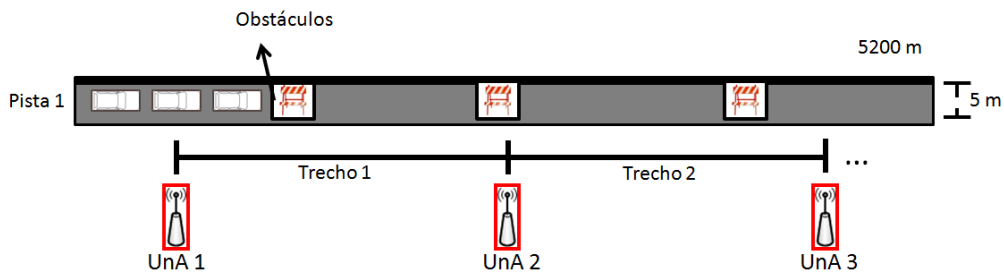


Figura 5.20: Cenário usado para testar bloqueio pelo obstáculo.

Nesta etapa, o objetivo é avaliar o funcionamento e a precisão do COTraMS na central de controle, independente da tecnologia adotada na unidade de bordo, tanto para definir a posição na via quanto para enviar sua localização.

Para comparar os resultados obtidos pelo COTraMS, utilizado na simulação, simulou-se um GPS que indicava a posição do veículo a cada 0,25 segundos. A condição de trânsito gerada em cada trecho pelo GPS é calculada utilizando a média harmônica da velocidade média de todos os veículos no trecho. Novamente, considera-se um resultado com boa precisão quando resultados apresentados pelo método proposto e pelo GPS estão em um mesmo intervalo, definido na Seção 5.2.

Tabela 5.4: Parâmetros Fixos.

Parâmetro	Valor Fixo
Tempo de Simulação	900 segundos
Extensão	18.200 m
Unidades de acostamento	36
Primeira Unidade de Acostamento	500 m
Distância entre Unidades de Acostamento	500 m
Largura da pista	4 m

Além do número de pistas, outro parâmetro variado foi o limite de velocidade máxima dos veículos, onde: (1) carro - 110 km/h e caminhão - 80 km/h; (2) carro - 100 km/h e caminhão 80 km/h; e finalmente (3) carro 90 km/h e caminhão 70 km/h. Estes limites são baseados em cenários reais como as rodovias dos estados do Rio de Janeiro e de Minas Gerais. Baseado nos limites de velocidade usados, a distância mínima, também denominada, distância de segurança, entre veículos é de 70 m, 60 m, e 50 m, respectivamente. Estes limites da distância de segurança tem como base os resultados apresentados por Chen et al. [103], que tomam como base as velocidades, as características dos veículos, a condição do clima e o tempo de reação, para calcular a distância para uma frenagem segura em carros em movimento. Variou-se também o número de pistas livres. Para obrigar os carros a mudarem de pista, foram utilizados obstáculos na pista mais a direita, ou aleatoriamente distribuídos, a cada 500 m. Estes obstáculos são necessários para se tenha uma variação na velocidade dos veículos já que todos os carros e caminhões buscavam alcançar a velocidade máxima desejada para o tipo de veículo quando se tem pista livre a frente. Mesmo tendo os caminhões como veículos mais lentos, o objetivo foi experimentar um cenário mais crítico, com obstáculos na velocidade zero, como acontece em vias como a Avenida Brasil, onde acontecem constantes problemas pontuais, bloqueando uma pista por alguns metros.

Nos cenários com 100% de carros ou 100% de caminhões e duas ou mais pistas, mesmo com obstáculos a cada 500 metros, os resultados obtidos pelo COTraMS estiveram dentro da mesma condição dos resultados obtidos via GPS em todos os cenários, ou seja, apresentou uma taxa de acerto de 100%. Estes resultados foram omitidos, portanto, por serem tão concisos. Cenários 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.

Nos cenários com três pistas, mesmo quando se usa obstáculos, a taxa de acerto

é maior que 90% [54] quando comparado com os resultados obtidos via GPS (Figura 5.21). Em cenários com quatro pistas, a taxa de acerto foi maior que 94% (Figura 5.22). Os gráficos apresentam os resultados referentes aos últimos 60 segundos de simulação. Estes cenário incluem 70% de carros e 30% de caminhões. É possível visualizar na Figura 5.21 que a partir do trecho 18 só existem carros nos últimos trechos. Desta forma, os veículos atingem a velocidade máxima desejada. A mesma situação pode ser visualizada na Figura 5.22, porém a partir do trecho 20.

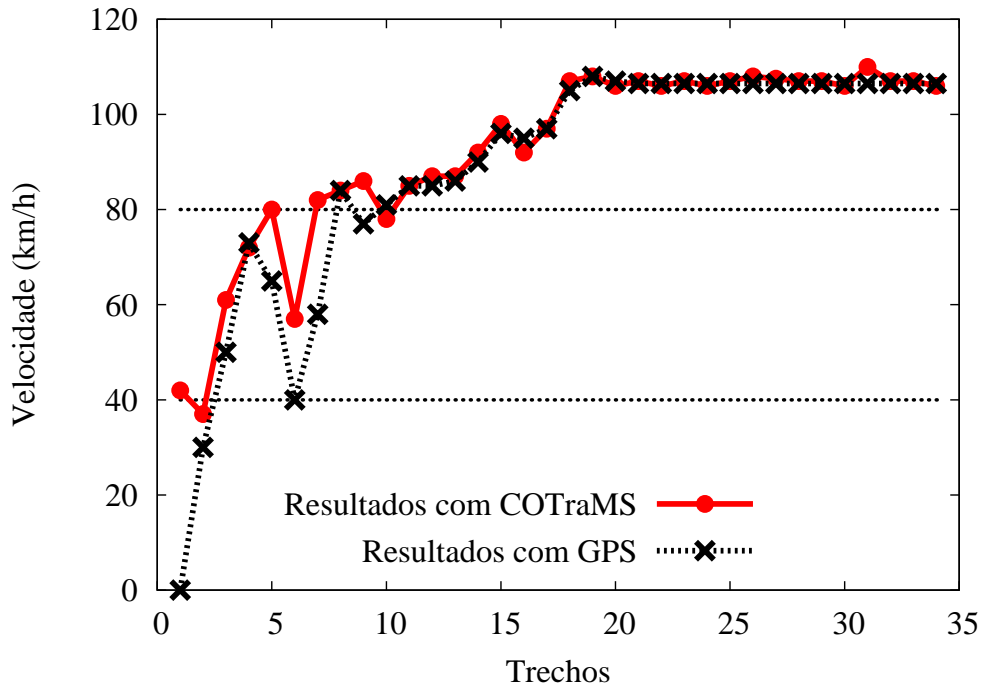


Figura 5.21: Cenário com três pistas (velocidade média em cada trecho) - 90% correto.

Para testar o funcionamento do COTraMS nos piores cenários, utilizou-se rodovias com duas pistas, com ou sem obstáculos. Este é considerado o pior cenário por haver apenas uma pista como opção de desvio de obstáculos que possuem velocidade igual a zero. Desta forma é grande o número de trocas de pista, resultando em constantes desacelerações e reacelerações. Outros parâmetros que influenciam na quantidade de veículos inseridos em cada cenário, são a velocidade média, já que novos veículos só poderão ser inseridos após o veículo a frente atingir determinada distância na pista e o tipo de veículo, já que os caminhões, por exemplo, apresentarão piores tempos de reaceleração e desaceleração no desvio de obstáculos.

A variação dos parâmetros e os resultados podem ser visualizados nas Tabelas 5.5, 5.6, e 5.7. Os resultados correspondem aos últimos 60 segundos de simulação, onde se tem veículos em todos os trechos da via. Uma vez que usamos a média harmônica (Equação 3.2, apresentada na Seção 3.2.1) para definir as condições dos trechos, os resultados continuam com uma taxa de acerto muito próxima mesmo se

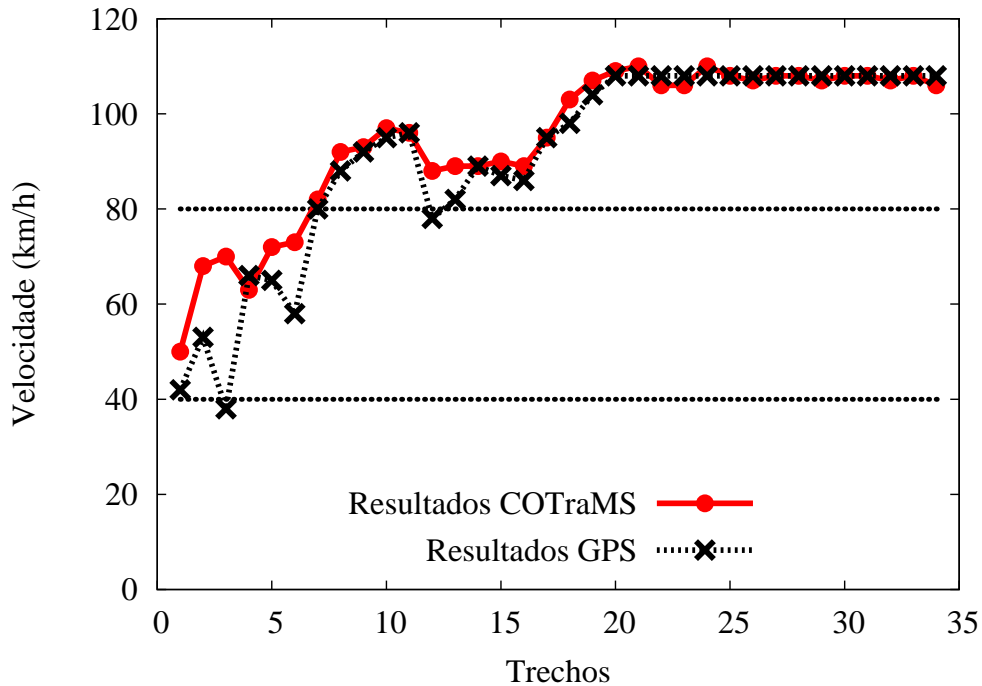


Figura 5.22: Cenário com quatro pistas (velocidade média em cada trecho) - 94% correto.

descartamos aleatoriamente cerca de 20% das informações enviadas pelos veículos. O descarte destes resultados tem como objetivo simular a perda de pacotes entre unidade móvel e central de controle. Para simular esta perda, o descarte aleatório foi executado 1000 vezes em cada cenário.

Os resultados da simulação mostram que o COTraMS funciona muito bem em cenários com um número maior de pistas. A maior dificuldade está em cenários com apenas duas pistas, tendo obstáculos pontuais em uma delas, capazes de gerar muita alteração dentro do trecho monitorado. Essa dificuldade está no fato do COTraMS trabalhar com a velocidade média no trecho. Essa variação é crítica neste cenário (com duas pistas e obstáculos), devido a trocas constantes de pista e um fluxo de veículos muito heterogêneo, com tempo de aceleração e frenagem diferentes, onde ambos resultam em grande variação dentro do trecho. Mesmo neste cenário heterogêneo no que se refere ao tipo de veículo, e crítico no que se refere aos obstáculos, o COTraMS apresentou até 89% de acerto quando comparado com os dados obtidos via GPS.

### 5.3 Experimentos - Arquitetura Descentralizada

Para avaliação das etapas de funcionamento da arquitetura descentralizada, implementadas no COTraMS, utilizou-se um cenário experimental também montado no campus da Ilha do Fundão, na UFRJ. O cenário contou com duas unidades de

Tabela 5.5: Resultados - Carros, 110 km/h e Caminhões, 80 km/h.

Veículos	Carros	Caminhões	Obstáculos	Acerto
166	70%	30%	Não	77%
169	70%	30%	Aleatório	77%
169	70%	30%	Fixo	83%
164	50%	50%	Não	83%
158	50%	50%	Aleatório	80%
160	50%	50%	Fixo	81%
137	20%	80%	Não	93%
134	20%	80%	Aleatório	88%
132	20%	80%	Fixo	88%
134	10%	90%	Não	93%
118	10%	90%	Aleatório	91%
130	10%	90%	Fixo	89%

Tabela 5.6: Resultados - Carros, 100 km/h e Caminhões, 80 km/h.

Veículos	Carros	Caminhões	Obstáculos	Acerto
183	70%	30%	Não	95%
182	70%	30%	Aleatório	69%
182	70%	30%	Fixo	78%
170	50%	50%	Não	90%
178	50%	50%	Aleatório	65%
177	50%	50%	Fixo	75%
149	20%	80%	Não	95%
143	20%	80%	Aleatório	82%
144	20%	80%	Fixo	92%
131	10%	90%	Não	100%
130	10%	90%	Aleatório	97%
131	10%	90%	Fixo	88%

acostamento, resultando em dois trechos: trecho 1, UnidAcost1  $\rightarrow$  UnidAcost2 e trecho 2, UnidAcost1  $\leftarrow$  UnidAcost2. O trecho 1 possui cerca de 535 m de extensão (Figura 5.23), enquanto o trecho 2 possui aproximadamente 640 m (Figura 5.24). O experimento contou também com uma unidade de bordo, composta por um *laptop* Sony Vaio com processador I5-3210m, 6 GB de RAM e disco rígido de 640 GB e interface de rede sem-fio. Para definir a localização do veículo o *laptop* estava conectado a um GPS modelo u-blox 5. Na unidade de bordo mediu-se o tempo de associação, o tempo para receber as configurações IP, o cálculo da velocidade no trecho percorrido, a atualização da TCT local, o tempo para executar as trocas de tabelas e o momento de desconexão. O objetivo foi testar se todo o processo é finalizado enquanto a unidade de bordo ainda está dentro da área de cobertura da

Tabela 5.7: Resultados - Carros, 90 km/h e Caminhões, 70 km/h.

Veículos	Carros	Caminhões	Obstáculos	Acerto
195	70%	30%	Não	100%
192	70%	30%	Aleatório	83%
196	70%	30%	Fixo	86%
185	50%	50%	Não	100%
187	50%	50%	Aleatório	89%
188	50%	50%	Fixo	78%
162	20%	80%	Não	100%
154	20%	80%	Aleatório	82%
152	20%	80%	Fixo	91%
149	10%	90%	Não	100%
145	10%	90%	Aleatório	97%
140	10%	90%	Fixo	91%

unidade de acostamento.

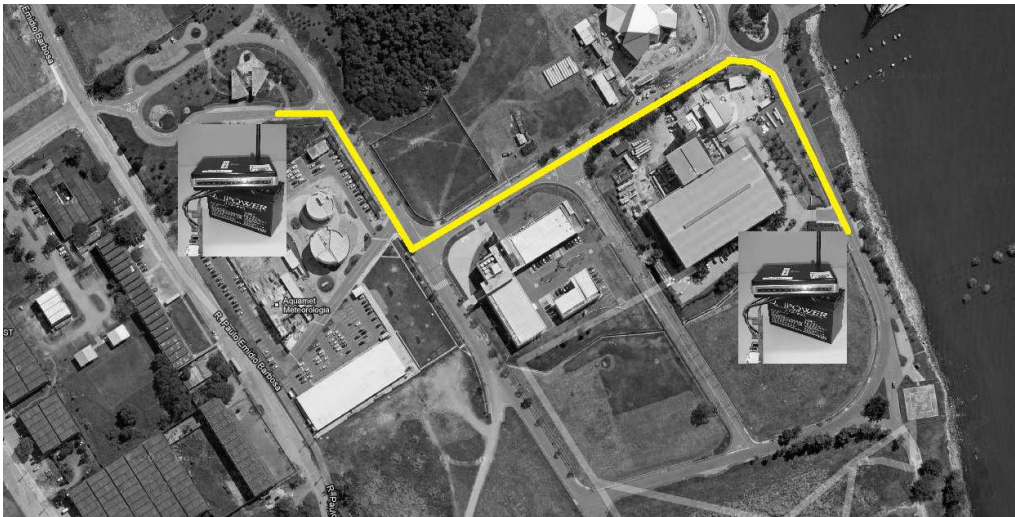


Figura 5.23: Trecho 1 - Experimento 2 - UFRJ.

A Figura 5.25 apresenta quatro momentos em que a unidade de bordo passa pelas unidades de acostamento, executando todo o algoritmo. As linhas em destaque apresentam os momentos em que (1) a unidade de bordo recebeu o primeiro quadro de sonda daquele ESSID, (2) o momento em que o veículo terminou o processo de associação e configuração IP e (3) o momento da desconexão. Os asteriscos representam os *beacons* recebidos. As etapas onde a unidade de bordo calcula a velocidade média no trecho, atualiza a TCT local e envia a TCT para a unidade de acostamento não aparecem na Figura 5.25. Estas três etapas são executadas em menos de 1 segundo antes do processo de desconexão, ou seja, praticamente ao mesmo tempo da linha que representa a desconexão na figura. Como pode ser visto, a desconexão acontece logo após a unidade de bordo receber o sinal com maior

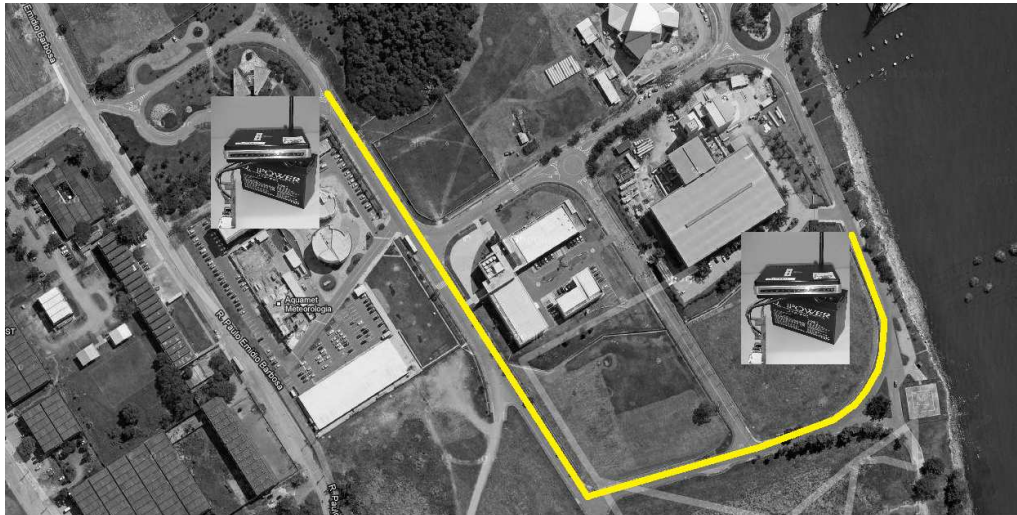


Figura 5.24: Trecho 2 - Experimento 2 - UFRJ.

potência, ou seja, quando a potência do sinal recebido é 10 dBm mais fraca. O processo de desconexão está vinculado ao término das etapas de cálculo da velocidade média no trecho, a atualização da TCT local e envio da TCT para a unidade de acostamento.

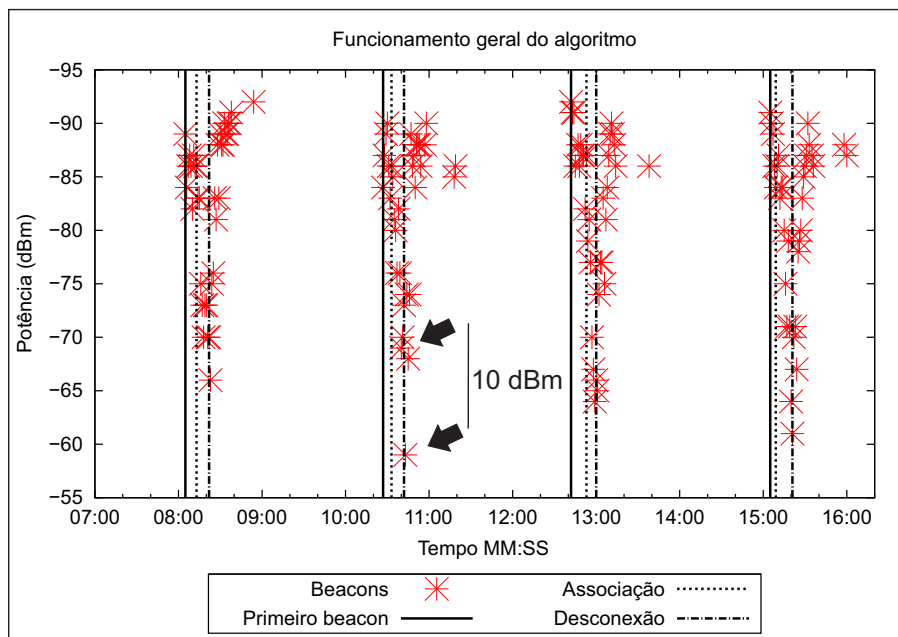


Figura 5.25: Funcionamento do algoritmo.

A Figura 5.26 detalha os processos de rede para que seja possível visualizar o tempo gasto em cada etapa. As rodadas de 1 a 8 representam o momento em que a unidade de bordo passa pela unidade de acostamento, finalizando a passagem pelo trecho. O intervalo de tempo entre o momento em que o veículo detectou um ESSID conhecido e se associou variou entre 4 e 11 segundos. Foram necessários de 3 a 9 segundos para receber as configurações de endereçamento utilizando o DHCP



e solicitar a TCT à unidade de acostamento. O tempo médio para recebimento da tabela com as condições dos trechos foi de 2 segundos. A unidade de bordo detectou que passou pela unidade de acostamento em todas as rodadas com precisão de até 3 metros, no pior caso.

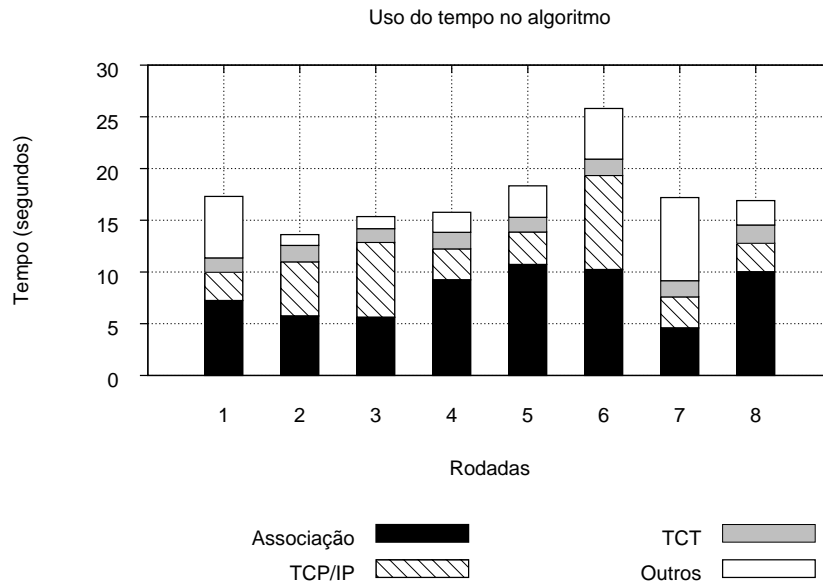


Figura 5.26: Histograma - Tempo detalhado de cada etapa.

Como é possível observar, fazer a associação e receber as configurações de rede são as etapas que necessitam de mais tempo. Apesar deste tempo não se mostrar crítico em cenários com velocidade de até 40km/h, ao ponto de inviabilizar o sistema, pelo menos duas opções podem reduzir o tempo de execução do algoritmo ao utilizar o padrão IEEE 802.11b/g. Na primeira opção, o veículo utiliza um endereço IP pré-definido ao detectar o ESSID conhecido. Utilizando IP fixo, Rubinstein *et al.* [58] transmitiram cerca de 100Kbytes a 120km/h, em pelo menos 12 segundos de contato, em um raio de cobertura de 200 m. Este valor transmitido por Rubinstein *et al.* é pelo menos 90 vezes maior que o necessário para transmitir uma TCT com 60 trechos. Outra opção é definir a primeira unidade de acostamento como a única responsável por distribuir os endereços IP, fazendo com que essa etapa, utilizando DHCP, aconteça somente no momento em que o veículo entra na via. Experimentos utilizando IP fixo na unidade de bordo reduziram o tempo necessário para definir as configurações de rede de 3 a 9 segundos para menos de 1 segundo. Utilizando o padrão IEEE 802.11 p, o COTraMS tende a obter resultados ainda melhores no que se refere a redução do tempo necessário para associação. Definido um WBSS, como descrito na Seção 2.1.1, o tempo de associação é muito reduzido uma vez que um único quadro de anúncio contém toda informação sobre o serviço. A unidade de bordo pode optar em se associar ou não à unidade de acostamento. Mesmo não

estando associada a unidade de bordo consegue receber e enviar dados utilizando um BSSID coringa. Outra vantagem do padrão IEEE 802.11 p está no uso do IPv6, onde as unidades de bordo podem fazer uso de endereços IPs fixos, reduzindo o tempo em outra etapa importante do processo.

A Figura 5.27 apresenta a condição inferida em cada trecho, tanto pelo COTraMS quanto pelo GPS. Para gerar uma condição única utilizando o GPS, foi calculada a média harmônica de todos os valores obtidos no trecho. Novamente, cada rodada representa o momento em que a unidade de bordo conclui um trecho passando pela unidade de acostamento. Considera-se que a condição inferida está correta quando os resultados estão dentro do mesmo intervalo que define as condições do trecho (Seção 5.2). Como pode ser visto, os resultados apresentados pelo COTraMS são muito semelhantes quando comparados aos do GPS.

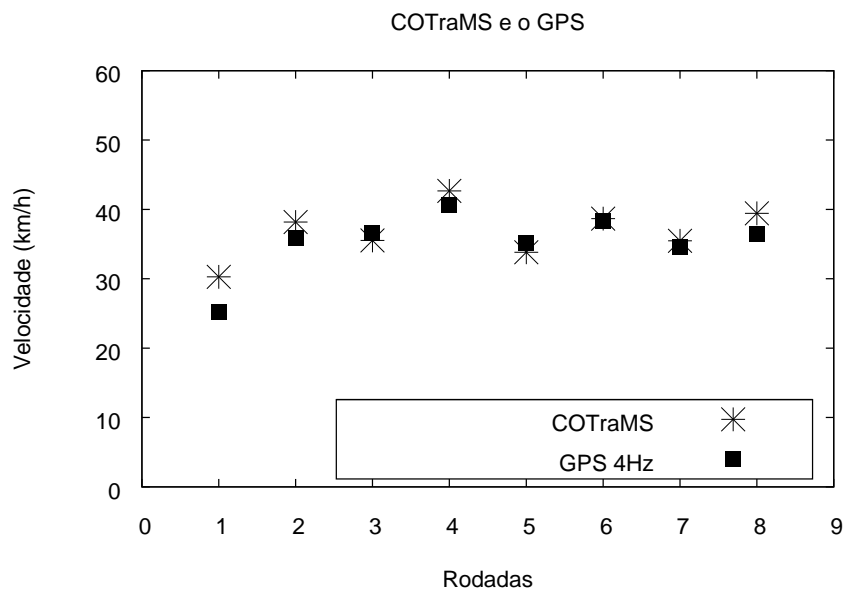


Figura 5.27: Comparação entre a velocidade média obtida via COTraMS com a velocidade média obtida por meio de um GPS.

Este capítulo apresentou uma série de experimentos realizados de 2010 a 2012. Os experimentos, com uma unidade de bordo, foram executados no campus da Ilha do Fundão, da UFRJ, e na Avenida Brasil, ambos na cidade do Rio de Janeiro. Também foram realizadas simulações, utilizando o NS-3, com o objetivo de avaliar o funcionamento do COTraMS em cenários com várias unidades de bordo, possibilitando ainda variações no cenário. De forma geral o COTraMS apresentou uma precisão muito próxima ao GPS, tanto na definição da localização do veículo quanto na definição da condição do trecho, foco desta tese. O Capítulo 6 apresenta as principais conclusões da tese bem como uma indicação de linhas a serem investigadas em trabalhos futuros.

# Capítulo 6

## Conclusões e Trabalhos Futuros

Nesta tese foram propostas duas arquiteturas para monitoramento de trânsito em rodovias, uma centralizada e outra descentralizada. Ambas foram avaliadas em cenários reais, sendo a centralizada avaliada também em ambiente simulado.

A arquitetura centralizada utiliza unidades de bordo com uma lógica de funcionamento mais simplificada. Nesta arquitetura, as unidades de bordo enviam para uma central de controle, o momento em que passaram por determinados pontos de referência da via onde estão localizadas as unidades de acostamento. Todo o processamento para a definição e divulgação das condições da via é responsabilidade da central de controle. Apesar de depender de uma central de controle e da ligação de todas as unidades de bordo a essa central, a arquitetura centralizada não exige nenhuma modificação nos elementos existentes entre a unidade de bordo e central de controle. Desta forma, é possível utilizar equipamentos de prateleira com um custo muito inferior a outras propostas automatizadas e centralizadas como apresentado.

A arquitetura descentralizada apresenta como diferencial o fato de não depender de uma central de controle para inferir e divulgar as condições de trânsito na via. Unidades de bordo e de acostamento trocam informações sobre os trechos por meio de TCTs (Tabelas de Condição dos Trechos). Como nesta arquitetura não existe conexão entre unidades de acostamento, unidades de bordo fazem o papel dos enlaces, atualizando as informações entre as unidades de acostamento. Como não há nenhum elemento centralizador, há a necessidade de se utilizar um mecanismo para manter o sincronismo das TCTs. A opção foi fazer com que cada elemento seja responsável por decrementar o seu próprio TTL, permitindo um controle mesmo que não haja um sincronismo entre os horários dos dispositivos. A principal vantagem desta arquitetura é a capacidade de funcionamento em rodovias sem infraestrutura de energia ou cobertura celular. Para isso também foram apresentadas nesta tese algumas opções para kits de energia capazes de manter unidades de acostamento funcionando mesmo em cenários remotos.

Para que fossem realizados experimentos em cenários reais, foi desenvolvido o

COTraMS. No COTraMS, as unidades de bordo e as unidades de acostamento utilizam redes IEEE 802.11 b/g. A movimentação da unidade de bordo é inferida com base na variação da potência do sinal recebido. Os dados necessários são obtidos via quadros de sonda, já disponíveis na rede IEEE 802.11 para anúncio das unidades de acostamento. Desta forma, a própria rede IEEE 802.11 é utilizada tanto para definição da movimentação do veículo quanto para envio desta informação para uma central de controle. O tráfego gerado na rede é muito pequeno, uma vez que cada unidade de bordo envia apenas um pacote por trecho com informações sobre o deslocamento na via. Não foi implementado nenhum mecanismo de confiabilidade uma vez que mesmo com o descarte aleatório de 20% dos pacotes, simulando possíveis perdas ou falhas, a média entre as 1000 simulações em cada cenário apresentou um resultado muito próximo ao resultado sem o descarte de pacotes. O uso da média harmônica tem forte influência nesse resultado.

O uso de apenas um dispositivo com interface de rede compatível com o padrão IEEE 802.11 resulta em um menor consumo de energia quando comparado a propostas que utilizam algum dispositivo para definição da localização do veículo, como o GPS, além de uma interface de rede para envio dos dados.

Os experimentos em cenários reais e simulados apontaram um alto grau de semelhança aos resultados obtidos via GPS de alta precisão, que fornecia a posição do veículo quatro vezes por segundo. Cenários com mais de 3 pistas na via, mesmo com obstáculos, apresentaram uma taxa de acerto acima de 90%, enquanto com 4 pistas o acerto foi maior que 94%. Cenários com veículos com as mesmas características apresentaram uma taxa de acerto de 100%. A precisão em cenários extremos, com apenas duas pistas e obstáculo (com *velocidade* = 0) em uma delas, está diretamente relacionada às características da via e dos veículos. Mesmo nestes cenários extremos COTraMS obteve até 89% de acerto.

Adicionalmente, em um intervalo de potência de -45 a -90 dBm obtido durante a coleta de quadros de sonda, quando a unidade de bordo recebe sinal com potência próximo de -60 dBm, a localização da unidade de bordo é inferida com discrepância entre 3 e 8 metros. Esta discrepância está bem abaixo do que outros trabalhos da literatura consideram aceitável. Nos experimentos realizados, todas as unidades de acostamento apresentaram, no pior caso, picos de potência próximos a -60 dBm.

Mesmo que pouco utilizada na versão atual do COTraMS, foi possível concluir que o uso da mediana dos valores de potência do sinal recebido, calculado a cada intervalo definido, é suficiente para retratar o comportamento da variação da potência recebida. Este recurso pode ser utilizado com o objetivo de diminuir ainda mais o tráfego na rede e o processamento da central de controle.

## 6.1 Trabalhos Futuros

Para analisar o comportamento da arquitetura descentralizada em períodos mais longos e com um número maior de veículos, pretende-se simular cenários variados no NS-3. Outra característica possível na simulação é substituir o padrão IEEE 802.11 b/g pelo padrão IEEE 802.11 p. Desta forma pretende-se analisar o comportamento da arquitetura na expectativa de reduzir o tempo tanto na associação entre unidade de bordo e unidade de acostamento quanto na etapa de endereçamento da unidade de bordo. Pretende-se ainda, montar um cenário de uso no Campus da Ilha do Fundão, na Universidade Federal do Rio de Janeiro. O cenário terá, a princípio, quatro pontos de acesso (Figura 6.1), sendo todos os pontos compatíveis com o padrão IEEE 802.11 b/g. No cenário citado, não haverá conexão entre os pontos e apenas um dos pontos deverá estar conectado à Internet (Figura 6.2). Todos os pontos possuem autonomia de energia e portanto não estão conectados à rede elétrica.



Figura 6.1: Cenário de uso - Campus da UFRJ.

Na versão atual do COTraMS, independente da arquitetura, se uma unidade de acostamento intermediária falhar, dois trechos deixarão de ser monitorados. Um objetivo futuro é tornar a arquitetura robusta a este tipo de falha. No entanto, especialmente na arquitetura descentralizada, o nível de complexidade e de tratamento aumenta consideravelmente uma vez que as TCTs deverão ser adaptadas em tempo de execução em todos os elementos da rede.

Na arquitetura descentralizada, é preciso gerar ainda critérios para definir os



Figura 6.2: Unidade de acostamento instalada na UFRJ.

parâmetros de calibragem do tempo máximo de vida útil da informação sobre a condição do trecho. Esses parâmetros deverão considerar características específicas da via como: extensão, distância entre os pontos de acesso, velocidade média, variação de fluxo de veículos, entre outros.

Um dos maiores desafios da arquitetura descentralizada é manter as TCTs atualizadas, especialmente em vias com grande extensão. A dificuldade de divulgação também acontece em cenários onde toda a via está congestionada. Para melhorar o desempenho na sincronização das TCTs nestes cenários, pretende-se desenvolver uma arquitetura híbrida, possibilitando conexões V2I e V2V. Desta forma, enquanto as unidades de bordo não estão conectadas a unidades de acostamento, estas divulgam suas TCTs via *broadcast*. Outra possibilidade é por meio da interligação de algumas unidades de acostamento.

Esta tese poderá servir de base para uma série de outras propostas que envolvam os conceitos aqui definidos. Um exemplo é a integração dos resultados com projetos de sinalização inteligente. Desta forma, ao detectar pontos de lentidão, rotas alternativas poderiam ser apontadas para os motoristas, mesmo que estes não usem o sistema proposto. Outra opção é buscar por padrões na base de dados gerada, que

permitam identificar os elementos responsáveis por engarrafamentos. A metodologia utilizada para definição da localização, direção e velocidade pode ainda servir de base, por exemplo, para sistemas de previsão de horário de chegada de ônibus ou controle de frota de veículos.

# Referências Bibliográficas

- [1] ALVES, R. S. A., CAMPBELL, I. V., COUTO, R. S., et al. “Redes Veiculares: Princípios, Aplicações e Desafios”. In: *Minicursos do Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores (SBRC)*, Sociedade Brasileira de Computação, pp. 199–254, maio 2009. Recife, PE, Brasil.
- [2] STANICA, R., CHAPUT, E., BEYLOT, A.-L. “Properties of the MAC layer in safety vehicular ad hoc networks”, *Communications Magazine, IEEE*, v. 50, n. 5, pp. 192–200, 2012. ISSN: 0163-6804.
- [3] “IEEE Standard for Information Technology- Telecommunications and Information Exchange Between Systems-Local and Metropolitan Area Networks-Specific Requirements- Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications”, *ANSI/IEEE Std 802.11, 1999*, pp. i –513, 2003.
- [4] TREIBER, M. “Microsimulation of Road Traffic Flow”, <http://www.traffic-simulation.de/>, 2011. Acessado em maio de 2013.
- [5] ANANDA, A. L., CHEN, B., S, P. V., et al. “DTN for Urban Environment”, <http://mobtorrent.ddns.comp.nus.edu.sg>, 2008. Acessado em maio de 2012.
- [6] RIBEIRO JÚNIOR, J. G., COSTA, L. H. M. K., CAMPISTA, M. E. M., et al. “GT-ReBUS: Redes de Acesso em Ônibus Universitários”, <http://www.gta.ufrj.br/gtrebus>, 2011. Acessado em maio de 2013.
- [7] MEDINA, M., MUNIZ, I., OLIVEIRA, L., et al. “Interface para Visualização das Condições de Trânsito”, <http://200.131.41.141/monitoramento/novo.php>.
- [8] ARBABI, H., WEIGLE, M. C. “Highway Mobility and Vehicular Ad-Hoc Networks in ns-3”. In: *Proceedings of the Winter Simulation Conference*, pp. 2991–3003, Baltimore, MD, dez. 2010.



- [9] LIN, J.-C., LIN, C.-S., LIANG, C.-N., et al. “Wireless communication performance based on IEEE 802.11p R2V field trials”, *Communications Magazine, IEEE*, v. 50, n. 5, pp. 184–191, 2012. ISSN: 0163-6804.
- [10] GASS, R., SCOTT, J., DIOT, C. “Measurements of In-Motion 802.11 Networking”. In: *Mobile Computing Systems and Applications, 2006. WMCSA’06. Proceedings. 7th IEEE Workshop on*, pp. 69–74, 2006.
- [11] DIRECTORATE-GENERAL FO ENERGY AND TRANSPORT. *European Energy and Transport. Trends to 2030*. Relatório técnico, European Commission, 2004. Disponível em: <[http://ec.europa.eu/dgs/energy\\_transport/figures/trends\\_2030/](http://ec.europa.eu/dgs/energy_transport/figures/trends_2030/)>.
- [12] INEA. “Relatório Anual sobre a Qualidade do Ar no Estado do Rio de Janeiro.” [http://www.inea.rj.gov.br/downloads/relatorios/qualidade\\_ar\\_2009.pdf](http://www.inea.rj.gov.br/downloads/relatorios/qualidade_ar_2009.pdf), 2009. Acessado em maio de 2013.
- [13] SPERLING, D., GORDON, D. “Two Billion Cars: Driving Toward Sustainability.” <http://econpapers.repec.org/RePEc:oxp:obooks:9780195376647>, 2009. Acessado em maio de 2013.
- [14] NATIONAL HIGHWAY TRAFFIC SAFETY ADMINISTRATION. “Traffic Safety Facts”, *Disponível em <http://www.nrd.nhtsa.dot.gov>*, 2005. Acessado em maio de 2013.
- [15] GONGJUN, Y., OLARIU, S., POPESCU, D. “NOTICE: An Architecture for the Notification of Traffic Incidents”, *Intelligent Transportation Systems Magazine, IEEE*, v. 4, n. 4, pp. 6–16, 2012. ISSN: 1939-1390.
- [16] LAZARO, O., ROBERT, E., LAN, L., et al. “iTETRIS : An Integrated wireless and traffic platform for real-time road traffic management solutions”. In: *WWRF 21, Meeting of Wireless World Research Forum, October 13-15, 2008, Stockholm, Sweden*, Stockholm, SUÈDE, 10 2008.
- [17] EUROPEAN COMMISSION. “European transport policy for 2010: time to decide”, 2001.
- [18] BANDA, L., MZYECE, M., NOEL, G. “IP Mobility Support: Solutions for Vehicular Networks”, *Vehicular Technology Magazine, IEEE*, v. 7, n. 4, pp. 77–87, 2012. ISSN: 1556-6072.
- [19] HUBAUX, J., CAPKUN, S., LUO, J. “The security and privacy of smart vehicles”, *Security Privacy, IEEE*, v. 2, n. 3, pp. 49–55, Maio-Junho. ISSN: 1540-7993.

- [20] RAYA, M., PAPADIMITRATOS, P., HUBAUX, J.-P. “SECURING VEHICULAR COMMUNICATIONS”, *Wireless Communications, IEEE*, v. 13, n. 5, pp. 8–15, Outubro. ISSN: 1536-1284.
- [21] CHEUNG, S. Y., COLERI, S., DUNDAR, B., et al. *Traffic Measurement and Vehicle Classification with a Single Magnetic Sensor*. Institute of transportation studies, research reports, working papers, proceedings, Institute of Transportation Studies, UC Berkeley, 2004.
- [22] KWONG, K., KAVALER, R., RAJAGOPAL, R., et al. “Arterial Travel Time Estimation Based on Vehicle Re-identification Using Wireless Magnetic Sensors”, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, v. 17, n. 6, pp. 586 – 606, 2009. ISSN: 0968-090X.
- [23] LI, Z., YANG, X., LI, Z. “Application of Cement-Based Piezoelectric Sensors for Monitoring Traffic Flows”, *Journal of Transportation Engineering*, v. 132, n. 7, pp. 565–573, 2006.
- [24] EDELMAYER, A., MIRANDA, M., NEBEHAJ, V. “Cooperative Federated Filtering Approach for Enhanced Position Estimation and Sensor Fault Tolerance in ad-hoc Vehicle Networks”, *Intelligent Transport Systems, IET*, v. 4, n. 1, pp. 82 –92, Março 2010. ISSN: 1751-956X.
- [25] KASSEM, N., KOSBA, A., YOUSSEF, M. “RF-Based Vehicle Detection and Speed Estimation”. In: *Vehicular Technology Conference (VTC Spring), 2012 IEEE 75th*, pp. 1 –5, Maio 2012.
- [26] BYCHKOVSKY, V., CHEN, K., GORACZKO, M., et al. “The CarTel Mobile Sensor Computing System”. In: *Proceedings of the 4th international conference on Embedded networked sensor systems, SenSys’06*, pp. 383–384, New York, NY, USA, 2006. ACM. ISBN: 1-59593-343-3.
- [27] CDT, C. D. T. “CalTrans”, *Disponível em <http://www.dot.ca.gov/>*, 2011. Acessado em maio de 2013.
- [28] FAZENDA, B., ATMOKO, H., GU, F., et al. “Acoustic Based Safety Emergency Vehicle Detection for Intelligent Transport Systems”. In: *ICROSS-ICE International Joint Conference 2009*, pp. 4250–4255, 2009.
- [29] CUCCHIARA, R., PICCARDI, M., MELLO, P. “Image Analysis and Rule-based Reasoning for a Traffic Monitoring System”, *Intelligent Transportation Systems, IEEE Transactions on*, v. 1, n. 2, pp. 119 –130, Junho 2000. ISSN: 1524-9050.

- [30] YOON, J., NOBLE, B., LIU, M. “Surface Street Traffic Estimation”. In: *Proceedings of the 5th international conference on Mobile systems, applications and services*, MobiSys’07, pp. 220–232, New York, NY, USA, 2007. ACM. ISBN: 978-1-59593-614-1.
- [31] MOHAN, P., PADMANABHAN, V. N., RAMJEE, R. “Nericell: Rich Monitoring of Road and Traffic Conditions Using Mobile Smartphones”. In: *Proceedings of the 6th ACM conference on Embedded network sensor systems*, SenSys’08, pp. 323–336, New York, NY, USA, 2008. ACM. ISBN: 978-1-59593-990-6.
- [32] GOOGLE. “Google Maps”, <http://maps.google.com/support>, 2011. Acessado em maio de 2013.
- [33] VALERIO, D., D’ALCONZO, A., RICCIATO, F., et al. “Exploiting Cellular Networks for Road Traffic Estimation: A Survey and a Research Roadmap”. In: *Vehicular Technology Conference, 2009. VTC Spring 2009. IEEE 69th*, pp. 1–5, Abril 2009.
- [34] YAHOO. “Yahoo Maps”, <http://maps.yahoo.com/>, 2011. Acessado em maio de 2013.
- [35] MICROSOFT. “Microsoft Maps”, <http://br.bing.com/maps/>, 2011. Acessado em maio de 2013.
- [36] THIAGARAJAN, A., RAVINDRANATH, L., LACURTS, K., et al. “VTrack: Accurate, Energy-aware Road Traffic Delay Estimation Using Mobile Phones”. In: *Proceedings of the 7th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems*, SenSys’09, pp. 85–98, New York, NY, USA, 2009. ACM. ISBN: 978-1-60558-519-2.
- [37] “Drive-thru Internet”, <http://www.drive-thru-internet.org>. Acessado em maio de 2013.
- [38] GROUP, P. R. “A Mobility Testbed - UMass DOME”, *Disponível em* <http://prisms.cs.umass.edu/dome/>. Acessado em maio de 2013.
- [39] RIBEIRO JÚNIOR, J. G., CAMPISTA, M. E. M., COSTA, L. H. M. K. “Opportunistic System for Collaborative Traffic Monitoring Using Existing IEEE 802.11 Networks”, *Intelligent Vehicular Networking: V2V/V2I Communications and Applications - IEEE International Conference on Communications - ICC 2012*, pp. 7294–7298, Junho 2012.

- [40] FLEMING, B. “New Automotive Electronics Technologies [Automotive Electronics]”, *Vehicular Technology Magazine, IEEE*, v. 7, n. 4, pp. 4–12, Dezembro 2012. ISSN: 1556-6072.
- [41] *Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2011-2016*. Relatório técnico, Cisco, 2011. Acessado em maio de 2013.
- [42] WORK, D., BAYEN, A. “Impacts of the mobile internet on transportation cyberphysical systems: traffic monitoring using smartphones”. In: *National Workshop for Research on High-Confidence Transportation Cyber-Physical Systems: Automotive, Aviation, & Rail*, pp. 18–20, 2008.
- [43] BALASUBRAMANIAN, A., MAHAJAN, R., VENKATARAMANI, A. “Augmenting mobile 3G using WiFi”. In: *Proceedings of the 8th international conference on Mobile systems, applications, and services, MobiSys’10*, pp. 209–222, New York, NY, USA, 2010. ACM. ISBN: 978-1-60558-985-5.
- [44] GOZALVEZ, J. “Wireless Connections Surpass 6 Billion Mark [Mobile Radio]”, *Vehicular Technology Magazine, IEEE*, v. 7, n. 4, pp. 13–17, Dezembro 2012. ISSN: 1556-6072.
- [45] DIMATTEO, S., HUI, P., HAN, B., et al. “Cellular Traffic Offloading through WiFi Networks”. In: *Mobile Adhoc and Sensor Systems (MASS), 2011 IEEE 8th International Conference on*, pp. 192–201, 2011.
- [46] CARROLL, A., HEISER, G. “An Analysis of Power Consumption in a Smartphone”. In: *Proceedings of the 2010 USENIX conference on USENIX annual technical conference, USENIXATC’10*, pp. 21–21, Berkeley, CA, USA, 2010. USENIX Association.
- [47] JÚNIOR, J. G. R., QUINTANILHA, I. M., CAMPISTA, M. E. M., et al. “Sistema para Monitoramento Descentralizado de Trânsito baseado em Redes Veiculares Infraestruturadas”. In: *SBRC 2013 (Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos)*, Março 2013.
- [48] “Dynamic Host Configuration Protocol”, *IETF RFC 2131*, Março 1997.
- [49] UERJEMDIA. “UERJ debate Avenida Brasil Digital”. [http://www.uerj.br/publicacoes/uerj\\_emdia/535/](http://www.uerj.br/publicacoes/uerj_emdia/535/), 2010. Boletim Semanal 24 a 30 de maio de 2010 Ano XIII - No 535 - Acessado em maio de 2013.
- [50] “Projeto Orla Digital”. <http://www.orladigital.coppe.ufrj.br/>, 2008. Acessado em maio de 2013.

- [51] RIBEIRO JÚNIOR, J. G., COSTA, L. H. M. K., CAMPISTA, M. E. M. “Monitoramento Colaborativo de Trânsito utilizando Redes IEEE 802.11 em Cidades Inteligentes”, *XVI Workshop de Gerência e Operação de Redes e Serviços (WGRS 2011)*, Maio 2011.
- [52] NS-3 CONSORTIUM. “Network Simulator - v3”, <http://www.nsnam.org/>, 2008. Acessado em maio de 2013.
- [53] TREIBER, M., HENNECKE, A., HELBING, D. “Congested traffic states in empirical observations and microscopic simulations”, *Phys. Rev. E*, v. 62, pp. 1805–1824, Aug 2000.
- [54] RIBEIRO JÚNIOR, J. G., QUINTANILHA, I. M., CAMPISTA, M. E. M., et al. “Evaluation of an Opportunistic Collaborative Traffic Monitoring System”, *IFIP/IEEE Wireless Days Conference 2012*, pp. 1–6, Novembro 2012.
- [55] FAEZIPOUR, M., NOURANI, M., SAEED, A., et al. “Progress and challenges in intelligent vehicle area networks”, *Commun. ACM*, v. 55, n. 2, pp. 90–100, Fevereiro 2012. ISSN: 0001-0782.
- [56] CHENG, L., PANICHPAPIBOON, S. “Effects of intervehicle spacing distributions on connectivity of VANET: a case study from measured highway traffic”, *Communications Magazine, IEEE*, v. 50, n. 10, pp. 90–97, 2012. ISSN: 0163-6804.
- [57] HARTENSTEIN, H., LABERTEAUX, K. “A tutorial survey on vehicular ad hoc networks”, *Communications Magazine, IEEE*, v. 46, n. 6, pp. 164–171, Junho 2008. ISSN: 0163-6804.
- [58] RUBINSTEIN, M. G., ABDESSLEM, F. B., DE AMORIM, M. D., et al. “Measuring the capacity of in-car to in-car vehicular networks”, *Comm. Mag.*, v. 47, pp. 128–136, Novembro 2009. ISSN: 0163-6804.
- [59] BYCHKOVSKY, V., HULL, B., MIU, A., et al. “A measurement study of vehicular internet access using in situ Wi-Fi networks”. In: *Proceedings of the 12th annual international conference on Mobile computing and networking, MobiCom’06*, pp. 50–61, New York, NY, USA, 2006. ACM. ISBN: 1-59593-286-0.
- [60] JIANG, D., DELGROSSI, L. “IEEE 802.11p: Towards an International Standard for Wireless Access in Vehicular Environments”. In: *Vehicular Technology Conference, 2008. VTC Spring 2008. IEEE*, pp. 2036–2040, Maio de 2008.

- [61] TIAN, Y., XU, K., ANSARI, N. “TCP in wireless environments: problems and solutions”, *Communications Magazine, IEEE*, v. 43, n. 3, pp. S27–S32, Março 2005.
- [62] ALVES, R. S., ABDESSLEM, F. B., CAVALCANTI, S. R., et al. “Uma Análise Experimental da Capacidade de Redes ad hoc Veiculares”. In: *SBrT - Simpósio Brasileiro de Telecomunicações*, p. 8, Setembro 2008.
- [63] PAIER, A., TRESCH, R., ALONSO, A., et al. “Average Downstream Performance of Measured IEEE 802.11p Infrastructure-to-Vehicle Links”. In: *Communications Workshops (ICC), 2010 IEEE International Conference on*, pp. 1–5, 2010.
- [64] DICKEY, S., HUANG, C.-L., GUAN, X. “Field Measurements of Vehicle to Roadside Communication Performance”. In: *Vehicular Technology Conference, 2007. VTC-2007 Fall. 2007 IEEE 66th*, pp. 2179–2183, 2007.
- [65] GOZALVEZ, J., SEPULCRE, M., BAUZA, R. “IEEE 802.11p vehicle to infrastructure communications in urban environments”, *Communications Magazine, IEEE*, v. 50, n. 5, pp. 176–183, 2012. ISSN: 0163-6804.
- [66] BOUKERCHE, A., OLIVEIRA, H. A. B. F., NAKAMURA, E. F., et al. “Vehicular ad hoc Networks: A New Challenge for Localization-Based Systems”, *Comput. Commun.*, v. 31, pp. 2838–2849, Julho 2008. ISSN: 0140-3664.
- [67] TREIBER, M., KESTING, A. “An Open-Source Microscopic Traffic Simulator”, *Intelligent Transportation Systems Magazine, IEEE*, v. 2, n. 3, pp. 6–13, 2010. ISSN: 1939-1390.
- [68] FEMMINELLA, M., REALI, G. “Low Satellite Visibility Areas: Extension of the GPS Capabilities to Deploy Location-Based Services”, *Vehicular Technology Magazine, IEEE*, v. 7, n. 4, pp. 55–65, 2012. ISSN: 1556-6072.
- [69] DREVELLE, V., BONNIFAIT, P. “iGPS: Global Positioning in Urban Canyons with Road Surface Maps”, *Intelligent Transportation Systems Magazine, IEEE*, v. 4, n. 3, pp. 6–18. ISSN: 1939-1390.
- [70] SMITH, C., WATTS, N. “AIRSAGE”, *Disponível em <http://www.airsage.com/>*, 2011. Acessado em maio de 2013.
- [71] MICROSOFT. “Microsoft Introduces New Version of Windows Live Local”. 2011. Acessado em maio de 2013.

- [72] GOOGLE. “The Bright Side of Sitting in Traffic: Crowdsourcing Road Congestion Data”, <http://googleblog.blogspot.com/2009/08/bright-side-of-sitting-in-traffic.html>, 2011. Acessado em maio de 2013.
- [73] “Waze”, <http://www.waze.com>. Acessado em junho de 2013.
- [74] KALIC, G., BOJIC, I., KUSEK, M. “Energy consumption in android phones when using wireless communication technologies”. In: *MIPRO, 2012 Proceedings of the 35th International Convention*, pp. 754–759, 2012.
- [75] PERRUCCI, G. P., FITZEK, F. H. P., WIDMER, J. “Survey on Energy Consumption Entities on the Smartphone Platform”. In: *Vehicular Technology Conference (VTC Spring), 2011 IEEE 73rd*, pp. 1–6, 2011.
- [76] RICE, A., HAY, S. “Measuring mobile phone energy consumption for 802.11 wireless networking”, *Pervasive Mob. Comput.*, v. 6, n. 6, pp. 593–606, Dezembro 2010. ISSN: 1574-1192.
- [77] BURKE, J., ESTRIN, D., HANSEN, M., et al. “Participatory sensing”. In: *In: Workshop on World-Sensor-Web (WSW’06): Mobile Device Centric Sensor Networks and Applications*, pp. 117–134, 2006.
- [78] CAMPBELL, A. T., EISENMAN, S. B., LANE, N. D., et al. “People-centric urban sensing”. In: *Proceedings of the 2nd Annual International Workshop on Wireless Internet, WICON’06, New York, NY, USA, 2006*. ACM. ISBN: 1-59593-510-X.
- [79] THIAGARAJAN, A., BIAGIONI, J., GERLICH, T., et al. “Cooperative transit tracking using smart-phones”. In: *Proceedings of the 8th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems, SenSys’10*, pp. 85–98, New York, NY, USA, 2010. ACM. ISBN: 978-1-4503-0344-6.
- [80] LIN, C.-Y., CHEN, L.-J., CHEN, Y.-Y., et al. “A Comfort Measuring System for Public Transportation Systems Using Participatory Phone Sensing”. In: *Proceedings of PhoneSense 2010*, Novembro 2010.
- [81] HERRERA, J. C., WORK, D. B., HERRING, R., et al. “Evaluation of traffic data obtained via GPS-enabled mobile phones: The Mobile Century field experiment”, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, v. 18, n. 4, pp. 568 – 583, 2010. ISSN: 0968-090X.
- [82] TORNELL, S., CALAFATE, C., CANO, J.-C., et al. “Implementing and testing a driving safety application for smartphones based on the eMDR protocol”. In: *Wireless Days (WD), 2012 IFIP*, pp. 1–3, 2012.

- [83] SANGUESA, J. A., FOGUE, M., GARRIDO, P., et al. “Real-time density estimation in urban environments by using vehicular communications”. In: *Wireless Days (WD), 2012 IFIP*, pp. 1–6, nov. 2012.
- [84] OTT, J., KUTSCHER, D. “A disconnection-tolerant transport for drive-thru Internet environments”. In: *INFOCOM 2005. 24th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings IEEE*, v. 3, pp. 1849–1862 vol. 3, 2005.
- [85] GROUP, W. N. “SolarMESH”, <http://owl.eng.mcmaster.ca/~todd/Solar-MESH/>, 2011. Acessado em maio de 2013.
- [86] DE ALBUQUERQUE, C. V. N., SAADE, D. C. M., MAGALHÃES, L. C. S. “Projeto ReMesh - Rede Mesh de Acesso Universitário Faixa Larga Sem Fio”, <http://mesh.ic.uff.br/>, 2010. Acessado em Março de 2012.
- [87] JARIYASUNANT, J., WORK, D. B., KERKEZ, B., et al. “Mobile Transit Trip Planning with Real-Time Data”, *UC Berkeley: University of California Transportation Center*, 2011.
- [88] NORDIN, N. A. M., ZAHARUDIN, Z. A., MAASAR, M. A., et al. “Finding Shortest Path of the Ambulance Routing: Interface of A\* Algorithm Using C# Programming”. In: *Humanities, Science and Engineering Research (SHUSER), 2012 IEEE Symposium on*, pp. 1569–1573, Junho 2012.
- [89] BURRIS, M. W., KONURU, K. K., SWENSON, C. R. “Long-run changes in driver behavior due to variable tolls”. v. 1864, pp. 78–85. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, Janeiro 2004.
- [90] tcpdump. “TCPDUMP.org Frequently Asked Questions”. <http://www.tcpdump.org/faq.html>.
- [91] OPENWRT. “OpenWRT - Wireless Freedom”. <http://www.openwrt.org/>, 2011. Acessado em maio de 2013.
- [92] REDE RIO. “Topologia da Rede Rio de computadores”, *Disponível em* <http://www.rederio.br/mapa>, 2011.
- [93] GOOGLE. “Google Street View”, <http://www.google.com/streetview>, 2013. Acessado em maio de 2013.
- [94] ISSAC, B., JACOB, S., MOHAMMED, L. “The Art of War Driving and Security Threats - A Malaysian Case Study”. In: *Networks, 2005. Jointly*



held with the 2005 IEEE 7th Malaysia International Conference on Communication., 2005 13th IEEE International Conference on, v. 1, p. 6, Novembro 2005.

- [95] CHENG, Y.-C., CHAWATHE, Y., LAMARCA, A., et al. “Accuracy characterization for metropolitan-scale Wi-Fi localization”. In: *Proceedings of the 3rd International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services*, MobiSys’05, pp. 233–245, New York, NY, USA, 2005. ACM. ISBN: 1-931971-31-5.
- [96] TRIPATHI, A., DAMANI, O. “Relative encryption overhead in 802.11g network”. In: *Telecommunications, 2008. IST 2008. International Symposium on*, pp. 420–423, 2008.
- [97] RAYANCHU, S., MISHRA, A., AGRAWAL, D., et al. “Diagnosing Wireless Packet Losses in 802.11: Separating Collision from Weak Signal”. In: *INFOCOM 2008. The 27th Conference on Computer Communications. IEEE*, pp. 735–743, 2008.
- [98] REÑÉ, S., GAÑÁN, C., CAUBET, J., et al. “Analysis of Video Streaming Performance in Vehicular Networks”. The First International Conference on Advanced Communications and Computation, INFOCOMP, 10/2011 2011. ISBN: 978-1-61208-161-8. Barcelona, Espanha.
- [99] VILELA, U. C., CARDOSO, K. V., DE REZENDE, J. F. “Redes 802.11 em Centros Urbanos: Varredura, Estatísticas e Aplicações”, in *VI Workshop em Desempenho de Sistemas Computacionais e de Comunicação - WPerformance’2007 (XXVII SBC)*. Rio de Janeiro, pp. 703–718, Junho 2007.
- [100] JANSONS, J., IPATOV, A., PÄTERSONS, E. “Estimation of Doppler Shift for IEEE 802.11g Standard”, *Third Baltic Conference: Advanced Topics in Telecommunication*, pp. 73–82, Agosto 2009. Tartu, Estonia.
- [101] TREIBER, M. “Longitudinal Traffic model: The IDM”. <http://www.vwi.tu-dresden.de/~treiber/MicroApplet/IDM.html>, 2010. Acessado em maio de 2013.
- [102] TREIBER, M. “The Lane-change Model MOBIL”. <http://www.vwi.tu-dresden.de/~treiber/MicroApplet/MOBIL.html>, 2010. Acessado em maio de 2013.
- [103] CHEN, Y.-L., WANG, C.-A. “Vehicle Safety Distance Warning System: A Novel Algorithm for Vehicle Safety Distance Calculating Between Mo-

ving Cars”. In: *Vehicular Technology Conference, 2007. VTC2007-Spring. IEEE 65th*, pp. 2570 –2574, Abril 2007.