

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E  
INFORMÁTICA INDUSTRIAL

JOILSON ALVES JUNIOR

**ESTRATÉGIAS PARA AUMENTAR A CONECTIVIDADE E O  
DESEMPENHO DAS VANETs: INFRAESTRUTURA BASEADA NO  
TRANSPORTE COLETIVO E PROTOCOLOS**

TESE DE DOUTORADO

CURITIBA

2016

**JOILSON ALVES JUNIOR**

**ESTRATÉGIAS PARA AUMENTAR A CONECTIVIDADE E O  
DESEMPENHO DAS VANETs: INFRAESTRUTURA BASEADA NO  
TRANSPORTE COLETIVO E PROTOCOLOS**

Tese de Doutorado apresentado ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial da Universidade Tecnológica Federal do Paraná como requisito parcial para obtenção do grau de “Doutor em Ciências” – Área de Concentração: Telecomunicações e redes.

Orientador: Prof. Dr. Emilio Carlos Gomes Wille

**CURITIBA**

**2016**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

---

A474e  
2016      Alves Junior, Joilson  
            Estratégias para aumentar a conectividade e o desempenho  
            das VANETs : infraestrutura baseada no transporte coletivo e  
            protocolos / Joilson Alves Junior.-- 2016.  
            118 f. : il. ; 30 cm.

            Texto em português, com resumo em inglês  
            Disponível também via World Wide Web  
            Tese (Doutorado) - Universidade Tecnológica Federal do Pa-  
            raná. Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e In-  
            formática Industrial, Curitiba, 2016  
            Bibliografia: f. 98-102

            1. Redes veiculares ad hoc (Redes de computadores). 2.  
            Transporte urbano – Curitiba (PR). 3. Análise de redes (Planeja-  
            mento). 4. Redes ad hoc (Redes de computadores). 5. Protocolo  
            de aplicação sem fio (Protocolo de rede de computador). 6. En-  
            genharia elétrica – Teses. I. Wille, Emílio Carlos Gomes. II. Uni-  
            versidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-  
            graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial. III. Tí-  
            tulo.

---

CDD: Ed. 22 -- 621.3

Biblioteca Central da UTFPR, Câmpus Curitiba

Título da Tese Nº. \_\_\_\_\_

# **Estratégias para Aumentar a Conectividade e o Desempenho das VANETs: Infraestrutura Baseada no Transporte Coletivo e Protocolos.**

por

**Joilson Alves Junior**

**Orientador:** Prof. Dr. Emilio Carlos Gomes Wille (UTFPR)

Esta tese foi apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de DOUTOR EM CIÊNCIAS – Área de Concentração: Telecomunicações e Redes, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial – CPGEI – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, às 14h do dia 01 de dezembro de 2016. O trabalho foi aprovado pela Banca Examinadora, composta pelos doutores:

---

Prof. Dr. Emilio Carlos Gomes Wille  
(Presidente – UTFPR)

---

Prof. Dr. Anilton Salles Garcia  
(UFES)

---

Prof. Dr. Elias P. Duarte Jr  
(UFPR)

---

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Keiko Verônica Ono Fonseca  
(UTFPR)

---

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Ana Cristina B. Kochem Vendramin  
(UTFPR)

Visto da Coordenação:

---

Prof. Jean Carlos Cardozo da Silva, Dr.  
(Coordenador do CPGEI)

## RESUMO

Junior, Alves Joilson. ESTRATÉGIAS PARA AUMENTAR A CONECTIVIDADE E O DESEMPENHO DAS VANETS: INFRAESTRUTURA BASEADA NO TRANSPORTE COLETIVO E PROTOCOLOS. 118 f. Tese de Doutorado – Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2016.

As Redes Ad Hoc Veiculares (*Veicular Ad Hoc Networks* (VANETs)) são redes móveis que possuem como propósito a comunicação entre veículos para fornecer segurança e entretenimento a seus ocupantes. A comunicação pode ocorrer de três modos: *Vehicle-to-Vehicle* (V2V), *Vehicle-to-Infrastructure* (V2I) e híbrida (V2V e V2I ao mesmo tempo). As redes V2I e híbridas apresentam elevados custos de construção e manutenção, pois necessitam ser estabelecidas em locais que possuam infraestrutura fixa, o que as tornam impraticáveis na maioria das vezes. As redes V2V, por sua vez, apresentam baixos custos de construção, pois podem ser estabelecidas em qualquer ambiente urbano, entretanto dependem do fluxo de veículos nestes ambientes para manter a conectividade e o bom desempenho. Em ambientes urbanos existem basicamente veículos particulares, veículos de transporte pesado, e veículos de transporte coletivo (ônibus). Entre estes, os veículos de transporte coletivo apresentam um comportamento de tráfego diferenciado em relação aos demais veículos. Em particular, na cidade de Curitiba, os ônibus pertencentes às linhas expressas trafegam por canaletas exclusivas, segundo um escalonamento relativamente regular, em um trajeto linear praticamente sem obstáculos. Estas características sugerem que um sistema que faz uso destes ônibus para a criação de uma infraestrutura de comunicação apresentará um desempenho superior quando comparado a um sistema que não faz distinção entre veículos. Assim sendo, este trabalho propõe a utilização dos ônibus do transporte coletivo urbano para formar uma rede de transporte de dados (*backbone*) ad hoc móvel (BMVA), a qual irá prover conectividade e aumentar o desempenho da rede sem utilizar infraestrutura fixa. Novos protocolos de roteamento capazes de explorar a conectividade intrínseca fornecida pelo BMVA também são propostos. Estes protocolos foram desenvolvidos tomando-se por base os protocolos AODV, AOMDV e DSDV. Análises estatísticas com dados reais, bem como experimentos de simulação, comprovam que o BMVA e os novos protocolos podem criar uma infraestrutura de comunicação móvel e promover o aumento de métricas de desempenho, como a taxa de entrega e a vazão dos pacotes de dados.

**Palavras-chave:** VANETs, Conectividade, Ônibus, Transporte público, Protocolos, Roteamento, rede de transporte de dados (*backbone*) móvel.

## ABSTRACT

Junior, Alves Joilson. . 118 f. Tese de Doutorado – Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2016.

Vehicular Ad Hoc Networks (VANETs) are mobile networks which have as a purpose the communication between vehicles in order to provide safety and entertainment to their users. The communication may occur in three ways: Vehicle-to-Vehicle (V2V), Vehicle-to-Infrastructure (V2I) and hybrid (V2V and V2I at the same time). V2I and hybrid networks have, usually, high costs of implementation and maintenance, for they need to be implemented in places with a fixed infrastructure, which will be impracticable most of the times. V2V networks, on the other hand, have low cost of implementation, for they may be implemented in any urban environment. However, V2V networks would depend on the vehicles flow in order to keep connectivity and a good performance. In urban environments there are basically private vehicles, cargo vehicles and public transport vehicles (buses). Of these, the public transport vehicles present a distinct behavior in regard to other vehicles. Specifically, in the city of Curitiba, the buses from express lines travel in exclusive lanes, following a relatively regular schedule, in a linear route with practically no obstacles. These characteristics suggest that a system using those buses for the deployment of a communication infrastructure would present a superior performance if compared to a system which makes no distinction between vehicles. Thus, this work proposes the utilization of public transport urban buses for the implementation of an mobile backbone (BMVA), which will provide connectivity and improve the network performance without using a fixed infrastructure. New routing protocols, capable of exploring the intrinsic connectivity provided by BMVA are also proposed. These protocols were developed from AODV, AOMDV and DSDV protocols. Statistical analyses with real data and simulation experiments, confirm that BMVA and the new protocols can create a mobile communication infrastructure and increase the performance metrics such as delivery rate and throughput.

**Keywords:** VANETs, Connectivity, Bus, Public transport, Protocols, Routing, Mobile Backbone

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1	– Arquiteturas de comunicação. ....	20
FIGURA 2	– Banda do espectro e canais do DSRC .....	21
FIGURA 3	– Normas do DSRC .....	22
FIGURA 4	– Criando caminhos disjuntos .....	29
FIGURA 5	– Funcionamento do DSDV .....	30
FIGURA 6	– Cálculo do custo de caminhos entre os nós A e D no protocolo MaxProp. ....	32
FIGURA 7	– Funcionamento do protocolo GPSR. ....	34
FIGURA 8	– Topologia da rede de transporte de dados. ....	45
FIGURA 9	– Rede de transporte de dados considerando ou desconsiderando o sentido dos movimentos dos ônibus. ....	46
FIGURA 10	– Histograma normalizado para a distância inter-veicular com uma linha na faixa de horário das 16h31m às 19h30m. ....	49
FIGURA 11	– Superposição de linhas de ônibus. ....	49
FIGURA 12	– Número de linhas necessárias para obter um determinado grau de conectividade de acordo com o raio de transmissão do sistema sem fio. ....	51
FIGURA 13	– Histograma normalizado para a distância inter-veicular para a faixa de horário (1). ....	53
FIGURA 14	– Histograma normalizado para a distância inter-veicular para a faixa de horário (2). ....	53
FIGURA 15	– Histograma normalizado para a distância inter-veicular para a faixa de horário (3). ....	54
FIGURA 16	– Histograma normalizado para a distância inter-veicular para a faixa de horário (4). ....	54
FIGURA 17	– Fluxograma do processo de descobrimento de rotas do P-AODV. ....	57
FIGURA 18	– Criando caminhos que priorizem o BMVA .....	58
FIGURA 19	– Topologia do cenário de simulação. ....	61
FIGURA 20	– Cenário 1 - Taxa de entrega versus a variação do número de veículos. ..	63
FIGURA 21	– Cenário 1 - Vazão versus a variação do número de veículos. ....	64
FIGURA 22	– Cenário 1 - Sobrecarga de roteamento versus a variação do número de veículos. ....	64
FIGURA 23	– Cenário 2 - Taxa de entrega versus a variação do raio de alcance do sistema sem fio com 20 veículos. ....	65
FIGURA 24	– Cenário 2 - Vazão versus a variação do raio de alcance do sistema sem fio com 20 veículos. ....	65
FIGURA 25	– Cenário 2 - Sobrecarga de roteamento versus a variação do raio de alcance do sistema sem fio com 20 veículos. ....	66
FIGURA 26	– Cenário 2 - Taxa de entrega versus a variação do raio de alcance do sistema sem fio com 40 veículos. ....	66
FIGURA 27	– Cenário 2 - Vazão versus a variação do raio de alcance do sistema sem fio com 40 veículos. ....	66
FIGURA 28	– Cenário 2 - Sobrecarga de roteamento versus a variação do raio de alcance do sistema sem fio com 40 veículos. ....	67

FIGURA 29	– Fluxograma do processo de descobrimento de rotas do P-AOMDV. ....	70
FIGURA 30	– Cenário 1 - Taxa de entrega dos pacotes de dados. ....	74
FIGURA 31	– Cenário 1 - Taxa de perda de pacotes de dados. ....	74
FIGURA 32	– Cenário 1 - Taxa de rota ativa. ....	75
FIGURA 33	– Cenário 1 - Taxa de quebra de rotas. ....	76
FIGURA 34	– Cenário 2 - Taxa de entrega dos pacotes de dados. ....	76
FIGURA 35	– Cenário 2 - Taxa de perda de pacotes de dados. ....	76
FIGURA 36	– Cenário 2 - Taxa de rota ativa. ....	77
FIGURA 37	– Cenário 2 - Taxa de quebra de rotas. ....	77
FIGURA 38	– Recebimento de uma mensagem de atualização com o mesmo número de sequência. ....	79
FIGURA 39	– Fluxograma do processo de manutenção de rotas do P-DSDV. ....	81
FIGURA 40	– Cenários topológicos existentes. ....	82
FIGURA 41	– Exemplo da aplicação do processo de atualização de rotas executado pelo protocolo P-DSDV. ....	83
FIGURA 42	– Cenário 1 - Taxa de entrega dos pacotes. ....	87
FIGURA 43	– Cenário 1 - Vazão dos dados. ....	87
FIGURA 44	– Cenário 1 - Sobrecarga do protocolo de roteamento. ....	87
FIGURA 45	– Cenário 2 - Taxa de entrega dos pacotes. ....	88
FIGURA 46	– Cenário 2 - Vazão dos dados. ....	88
FIGURA 47	– Cenário 2 - Sobrecarga do protocolo de roteamento. ....	89
FIGURA 48	– Cenário 3 - Taxa de entrega dos pacotes. ....	90
FIGURA 49	– Cenário 3 - Vazão dos dados. ....	90
FIGURA 50	– Cenário 3 - Sobrecarga do protocolo de roteamento. ....	90
FIGURA 51	– Topologia do protocolo proposto. ....	96
FIGURA 52	– Histograma normalizado para a distância inter-veicular com uma linha, considerando o sentido dos movimentos dos ônibus, na faixa de horário das 16h31m às 19h30m. ....	105
FIGURA 53	– Histograma normalizado para a distância inter-veicular com três linhas, considerando o sentido dos movimentos dos ônibus, na faixa de horário das 16h31m às 19h30m. ....	105
FIGURA 54	– Histograma normalizado para a distância inter-veicular com cinco linhas, considerando o sentido dos movimentos dos ônibus, na faixa de horário das 16h31m às 19h30m. ....	105
FIGURA 55	– Histograma normalizado para a distância inter-veicular com sete linhas, considerando o sentido dos movimentos dos ônibus, na faixa de horário das 16h31m às 19h30m. ....	106
FIGURA 56	– Histograma normalizado para a distância inter-veicular com uma única linha, desconsiderando o sentido dos movimentos dos ônibus, na faixa de horário das 16h31m às 19h30m. ....	107
FIGURA 57	– Histograma normalizado para a distância inter-veicular com três linhas, desconsiderando o sentido dos movimentos dos ônibus, na faixa de horário das 16h31m às 19h30m. ....	107
FIGURA 58	– Histograma normalizado para a distância inter-veicular com cinco linhas, desconsiderando o sentido dos movimentos dos ônibus, na faixa de horário das 16h31m às 19h30m. ....	107
FIGURA 59	– Histograma normalizado para a distância inter-veicular com sete linhas, desconsiderando o sentido dos movimentos dos ônibus, na faixa de horário	

	das 16h31m às 19h30m. ....	108
FIGURA 60	– Histograma normalizado para a distância inter-veicular com três linhas, desconsiderando o sentido dos movimentos dos ônibus, na faixa de horário das 05h30m às 08h30m. ....	108
FIGURA 61	– Histograma normalizado para a distância inter-veicular com três linhas, desconsiderando o sentido dos movimentos dos ônibus, na faixa de horário das 08h31m às 16h30m. ....	109
FIGURA 62	– Histograma normalizado para a distância inter-veicular com três linhas, desconsiderando o sentido dos movimentos dos ônibus, na faixa de horário das 16h31m às 19h30m. ....	109
FIGURA 63	– Histograma normalizado para a distância inter-veicular com três linhas, desconsiderando o sentido dos movimentos dos ônibus, na faixa de horário das 19h31m às 23h59m. ....	109
FIGURA 64	– Autocorrelação da distância inter-veicular. ....	111
FIGURA 65	– Análise QQ-Plot ( $Y$ é o quantil amostral e $X$ é o quantil segundo uma distribuição de Weibull). ....	115
FIGURA 66	– Taxa de entrega versus a variação do número de veículos em uma rede de 2000mX1000m e 4000mX500m. ....	118
FIGURA 67	– Vazão versus a variação do número de veículos em uma rede de 2000mX1000m e 4000mX500m. ....	118

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1	– Tabela de roteamento do protocolo AOMDV. ....	28
TABELA 2	– Tabela de roteamento do protocolo DSDV. ....	29
TABELA 3	– Normalização de encontros. ....	32
TABELA 4	– Tabela Comparativa Entre Protocolos de Roteamento. ....	35
TABELA 5	– Tabela Comparativa Entre os Trabalhos Relacionados. ....	42
TABELA 6	– Resultados do <i>chi-square</i> teste, considerando quatro distribuições de probabilidade. ....	48
TABELA 7	– Parâmetros utilizados para simulação. ....	52
TABELA 8	– Resultado da Média, Variância e o Grau de conectividade. ....	55
TABELA 9	– Parâmetros de simulação utilizando simulador de rede. ....	62
TABELA 10	– Estrutura da mensagem de RREP proposta para o P-AOMDV. ....	69
TABELA 11	– Estrutura da tabela de roteamento do AOMDV e do P-AOMDV. ....	69
TABELA 12	– Informações da tabela de rotas de um nó do P-AOMDV. ....	71
TABELA 13	– Parâmetros de simulação utilizando simulador de rede. ....	73
TABELA 14	– Estrutura da tabela de roteamento do DSDV e do P-DSDV. ....	79
TABELA 15	– Exemplo da aplicação da Equação 10. ....	83
TABELA 16	– Parâmetros de simulação utilizando simulador de rede. ....	85
TABELA 17	– Número de ônibus que atuam em cada uma das faixas horárias. ....	104
TABELA 18	– Resultado da Média, Variância e o Grau de conectividade considerando o sentido dos movimentos dos ônibus. ....	110
TABELA 19	– Resultado da Média, Variância e o Grau de conectividade desconsiderando o sentido dos movimentos dos ônibus. ....	111
TABELA 20	– Valores de $\alpha$ , $\beta$ e <i>P-value</i> considerado o sentido dos movimentos dos ônibus. ....	112
TABELA 21	– Valores de $\alpha$ , $\beta$ e <i>P-value</i> desconsiderando o sentido dos movimentos dos ônibus. ....	113
TABELA 22	– Parâmetros de simulação utilizando simulador de rede. ....	117

## LISTA DE SIGLAS

(VANET)	Vehicular Ad Hoc Network
(BMVA)	<i>Backbone</i> Ad Hoc Móvel
(RIT)	Rede Integrada de Transportes
(MANETs)	Mobile Ad Hoc Networks
(V2V)	Vehicle-to-Vehicle
(V2I)	Vehicle-to-Infrastructure
(APs)	Pontos de Acesso
(GPS)	Sistema de Posicionamento Global
(DSRC)	Dedicated Short Range Communications
(IEEE)	Institute of Electrical and Electronics Engineers
(WAVE)	Wireless Access in Vehicular Environments
(MAC)	Media Access Control
(DSDV)	Destination Sequenced Distance Vector
(AODV)	Ad-hoc On-demand Distance Vector
(AOMDV)	Ad hoc On-demand Multipath Distance Vector Routing
(GPSR)	Greedy Perimeter Stateless Routing
(GSR)	Geographic Source Routing
(A-STAR)	Anchor-Based Street and Traffic Aware Routing
(CAR)	Connectivity-Aware Routing
(SKVR)	Scalable Knowledge-Based Routing
(VADD)	Assisted Data Delivery
(UMB)	Urban Multi-hop Broadcast protocol
(ODAM)	Optimized Dissemination of Alarm Messages
(RREQ)	Route Request
(RREP)	Route Reply
(RERR)	Route Error
(RTS)	Request-To-Send
(CTS)	Clear-To-Send
(SUMO)	Simulation of Urban Mobility
(TraNS)	Traffic and Network Simulation Environment
(IDM-IM)	Intelligent Driver Model with Intersection Management
(IDM-LC)	Intelligent Driver Model with Lane Changes
(MOVE)	Mobility Model Generator for Vehicular Networks
(OLSR)	Optimized Link State Routing Protocol
(URBS)	Companhia de Urbanização da Cidade de Curitiba
(P-AODV)	Priority Ad Hoc On-Demand Distance Vector
(NS)	Network Simulator
(P-AOMDV)	Priority Ad Hoc On-Demand Multipath Distance Vector
(ID)	Identificador Único
(TEP)	Taxa de Entrega dos Pacotes
(TRA)	Taxa de Rota Ativa

(TQR)	Taxa de Quebra de Rotas
(TPP)	Taxa de Perda de Pacotes de Dados
(P-DSDV)	Priority Destination-Sequenced Distance Vector Routing Protocol
(VDD)	Vazão dos Dados
(SPR)	Sobrecarga do Protocolo de Roteamento
(MLE)	Maximum Likelihood Estimation
(UDP)	User Datagram Protocol
(CBR)	Constant Bit Rate

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b>	<b>12</b>
1.1 MOTIVAÇÃO	14
1.2 OBJETIVOS	15
1.2.1 Objetivo geral	15
1.2.2 Objetivos específicos	15
1.3 METODOLOGIA	16
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO	17
<b>2 REDES AD HOC VEICULARES</b>	<b>18</b>
2.1 APLICAÇÕES	18
2.2 COMUNICAÇÃO	19
2.2.1 Arquiteturas de comunicação	19
2.2.2 Modos de comunicação	20
2.3 CAMADA FÍSICA E ACESSO AO MEIO	21
2.4 CAMADA DE REDE - ROTEAMENTO DE PACOTES	22
2.4.1 Protocolos topológicos	22
2.4.2 Protocolos geográficos	23
2.4.3 Protocolos oportunistas	24
2.4.4 Protocolos de disseminação	24
2.5 DESCRIÇÃO DE ALGUNS PROTOCOLOS DE ROTEAMENTO	25
2.5.1 Ad-hoc On-demand Distance Vector (AODV)	25
2.5.1.1 Descoberta de rota	25
2.5.1.2 Manutenção das rotas	26
2.5.2 Ad hoc On-demand Multipath Distance Vector Routing (AOMDV)	26
2.5.2.1 Descoberta de rota	26
2.5.2.2 Manutenção de rota	27
2.5.2.3 Liberdade de laço	27
2.5.2.4 Caminhos disjuntos	27
2.5.3 Destination-Sequenced Distance-Vector Routing (DSDV)	29
2.5.4 Urban Multihop Broadcast Protocol (UMB)	31
2.5.5 Routing for Vehicle-Based Disruption-Tolerant Networks (MaxProb)	31
2.5.6 Greedy Perimeter Stateless Routing (GPSR)	33
2.5.7 Tabela comparativa entre os protocolos	34
2.6 MODELOS DE MOBILIDADE	35
2.6.1 Aplicações geradoras de cenários de mobilidade	37
<b>3 TRABALHOS RELACIONADOS</b>	<b>38</b>
3.1 TABELA COMPARATIVA ENTRE OS TRABALHOS RELACIONADOS	42
<b>4 REDE DE TRANSPORTE DE DADOS AD HOC MÓVEL (BMVA)</b>	<b>44</b>
4.1 REDE DE TRANSPORTE COLETIVO URBANO	44
4.2 REDE DE TRANSPORTE DE DADOS PROPOSTA	45
4.3 A CONECTIVIDADE DA REDE	46
4.3.1 Caracterização da distância inter-veicular	47

4.3.2	Superposição de linhas .....	49
4.4	VALIDAÇÃO DO BMVA UTILIZANDO UM SIMULADOR DE MOVIMENTOS	51
4.4.1	Ambiente de simulação .....	52
4.4.2	Resultados de simulação .....	52
<b>5</b>	<b>O PROTOCOLO P-AODV .....</b>	<b>56</b>
5.1	PROCESSO DE DESCOBRIMENTO DE ROTAS DO P-AODV .....	56
5.2	AVALIAÇÃO DO P-AODV UTILIZANDO SIMULADOR DE REDE .....	60
5.2.1	Ambiente de simulação .....	60
5.2.2	Métricas .....	61
5.2.3	Resultados de simulação .....	62
<b>6</b>	<b>O PROTOCOLO P-AOMDV .....</b>	<b>68</b>
6.1	PROCESSO DE DESCOBRIMENTO DE ROTAS DO P-AOMDV .....	68
6.2	AVALIAÇÃO DO P-AOMDV UTILIZANDO SIMULADOR DE REDE .....	71
6.2.1	Ambiente de simulação .....	71
6.2.2	Métricas .....	72
6.2.3	Resultados de simulação .....	73
<b>7</b>	<b>O PROTOCOLO P-DSDV .....</b>	<b>78</b>
7.1	PROCESSO DE MANUTENÇÃO/ATUALIZAÇÃO DAS ROTAS DO P-DSDV ...	79
7.2	ANÁLISE DA MÉTRICA $M_R(Z)$ .....	81
7.3	AVALIAÇÃO DO P-DSDV UTILIZANDO SIMULADOR DE REDE .....	83
7.3.1	Ambiente de simulação .....	84
7.3.2	Métricas .....	85
7.3.3	Resultados de simulação .....	86
<b>8</b>	<b>CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>92</b>
8.1	ARTIGOS PUBLICADOS E SUBMETIDOS .....	94
8.1.1	Artigos publicados .....	94
8.1.2	Artigo submetido .....	95
8.2	SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS .....	95
8.2.1	P-AOMDV Estendido .....	95
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>98</b>
	<b>Apêndice A – ESTUDOS EXPERIMENTAIS .....</b>	<b>103</b>
A.1	ANÁLISE CONSIDERANDO O SENTIDO DO MOVIMENTO DOS ÔNIBUS ...	104
A.2	ANÁLISE DESCONSIDERANDO O SENTIDO DO MOVIMENTO DOS ÔNIBUS	106
A.3	ANÁLISE CONSIDERANDO A FAIXA DE HORÁRIO .....	108
	<b>Apêndice B – ESTUDO ANALÍTICO .....</b>	<b>110</b>
B.1	MÉDIA, VARIÂNCIA E GRAU DE CONECTIVIDADE .....	110
B.2	AUTOCORRELAÇÃO .....	111
B.3	AJUSTE DE CURVAS .....	112
	<b>Apêndice C – ANÁLISE QQ-PLOT .....</b>	<b>114</b>
	<b>Apêndice D – AVALIAÇÃO DO BMVA UTILIZANDO SIMULADOR DE REDE ..</b>	<b>116</b>
D.1	AMBIENTE DE SIMULAÇÃO .....	116
D.2	MÉTRICAS .....	116
D.3	RESULTADOS DE SIMULAÇÃO .....	117

## 1 INTRODUÇÃO

Os automóveis são o meio de transporte mais utilizado por milhões de pessoas em todo o mundo. Com a crescente utilização deste mecanismo de transporte, ocorre a necessidade de possibilitar a comunicação entre os veículos, com o intuito de fornecer segurança e entretenimento aos seus ocupantes (BARBA et al., 2012).

A excessiva utilização dos automóveis tem contribuído para a existência de situações de saturação do tráfego, situações de perigo e aumentado a probabilidade de ocorrência de acidentes. Estes fatos têm motivado a construção de aplicações que ajudem o condutor dos veículos nas tomadas de decisões e proporcionem segurança a todos os ocupantes. Além disso, estas aplicações podem ajudar o condutor na escolha do trajeto, de modo a evitar congestionamentos, aumentar o rendimento do veículo e contribuir para redução da poluição ambiental. Na área do entretenimento, a construção de um sistema de comunicação entre os veículos pode trazer muitas vantagens para os ocupantes, permitindo a partilha de músicas, vídeos ou até mesmo a interação entre os ocupantes de veículos diferentes e a interação com pontos de informações presentes nas estradas.

Uma solução capaz de proporcionar a comunicação entre os veículos é a criação de uma rede ad hoc veicular (*Vehicular Ad Hoc Network* (VANET)) (MAOWAD; SHAABAN, 2012). Redes ad hoc caracterizam-se por serem construídas em qualquer lugar, pois independem da existência de infraestrutura fixa (normalmente criada através de pontos de acesso ou estações base) (BANGNAN; SVEN, 2003). Os nós de tais redes são, em sua maioria, móveis, pequenos, portáteis e se comunicam uns com os outros através de sinais de radiofrequência.

Como o alcance dos sinais de rádio é limitado, cada nó só pode se comunicar diretamente com outros nós que estiverem dentro do raio de alcance de seus sinais. Contudo, pode existir a necessidade de um nó transmitir informações para outros nós que estão além do seu raio de alcance. Para isso, os nós devem cooperar entre si, agindo como roteadores e repassando as informações do nó origem ao nó destino (TALOOKI; ZIARATI, 2006). Quando é possível rotear as informações de um nó de origem para um nó de destino, pode-se afirmar que a rede

está conectada, ou seja, cada nó da rede possui algum vizinho dentro do raio de alcance de seus sinais para se comunicar. Assim, pode-se definir a conectividade em redes ad hoc como a capacidade da troca de dados entre dois nós da rede.

As VANETs podem ser caracterizadas como um caso particular das redes ad hoc móveis, diferenciadas geralmente pelo fato da comunicação ser estabelecida entre veículos, a mobilidade na rede ser maior e estarem limitadas pela orientação das estradas (MAHAJAN et al., 2007). Além disso, como as VANETs podem ser estabelecidas em diversas regiões dos ambientes urbanos e em diferentes dias e horários, elas dependem do fluxo de veículos nestas regiões para manter a conectividade ao longo do tempo. Por esta razão, a rede pode ser totalmente conectada quando o fluxo de veículos é alto, e com pouca conectividade ou nula quando o fluxo de veículos é baixo ou desequilibrado.

Em ambientes urbanos existem basicamente veículos particulares, veículos de transporte pesado, e veículos de transporte coletivo (ônibus). Entre estes, os veículos de transporte coletivo apresentam um comportamento de tráfego diferenciado em relação aos demais veículos. Em particular, na cidade de Curitiba, os ônibus pertencentes às linhas expressas trafegam por canaletas exclusivas, segundo um escalonamento relativamente regular, em um trajeto linear praticamente sem obstáculos. Estas características sugerem que um sistema que faz uso destes ônibus para a criação de uma infraestrutura de comunicação apresentará um desempenho superior quando comparado a um sistema que não faz distinção entre veículos.

Portanto, este trabalho propõe a construção de uma rede de transporte de dados (*backbone*) ad hoc móvel (BMVA) cujo objetivo é fornecer infraestrutura e prover excelente conectividade, garantindo a entrega fim-a-fim das mensagens em uma determinada região. O BMVA é formado pelos ônibus do transporte coletivo urbano que circulam por vias expressas e exclusivas nas grandes cidades.

Para que o *backbone* cumpra seu objetivo e forneça conectividade para a rede, os ônibus que o compõe devem permanecer conectados durante o maior tempo possível. Portanto, neste trabalho, primeiramente investiga-se a conectividade dos ônibus no próprio BMVA, ou seja, verifica-se se os ônibus permanecem a uma distância de transmissão garantida uns dos outros na maior parte do tempo. O estudo da conectividade no BMVA é conduzido por análises estatísticas aplicadas em dados reais dos registros de mobilidade do transporte urbano da cidade de Curitiba - Paraná, além de avaliações através de simulações e modelos analíticos. A distância de transmissão garantida entre os ônibus é determinada, entre outros fatores, pela quantidade de linhas de ônibus que circulam em uma determinada via. Uma linha isolada pode não possuir o grau de conectividade mínimo requerido para o funcionamento da rede, por isso deve-se

considerar também o uso de linhas superpostas. A superposição ocorre quando várias linhas de ônibus operam sobre uma mesma via ao mesmo tempo.

Como nas VANETs o grau de mobilidade dos veículos é elevado e a conectividade é variável no tempo, a topologia da rede pode mudar imprevisivelmente, tornando as rotas estabelecidas inicialmente obsoletas, necessitando serem recalculadas e reestabelecidas (TALOOKI; ZIARATI, 2006). Desta forma, o roteamento precisa usar protocolos distribuídos que calculem rotas eficientes e que priorizem a manutenção da rede mesmo em casos de pouca conectividade. Outra ação deste trabalho é propor um conjunto de protocolos de roteamento capazes de explorar a conectividade fornecida pelo BMVA. Com estes protocolos pretende-se utilizar o BMVA com maior frequência possível, expandindo a conectividade e o desempenho da rede. O conjunto é formado por protocolos clássicos modificados, abrangendo os mais importantes modos de operação de protocolos para redes sem infraestrutura fixa. Análises estatísticas e experimentos de simulação comprovam que o BMVA e os novos protocolos podem prover conectividade e aumentar o desempenho da rede.

## 1.1 MOTIVAÇÃO

Os principais problemas das VANETs estão relacionados à falta de conectividade entre os veículos. O padrão altamente dinâmico de condução provoca rápidas mudanças na topologia da rede, resultando em frequentes desconexões. Além disso, o comportamento da rede pode ser totalmente diferente em aspectos topológicos, topologia totalmente conectada quando o tráfego de veículos é alto e topologia com pouca conectividade ou nula quando o tráfego de veículos é baixo (LIU et al., 2011; WISITPONGPHAN et al., 2007). Desta forma, prover conectividade entre os veículos é um grande desafio.

Atualmente, muitos trabalhos utilizam estudos teóricos para mostrar que a utilização de infraestrutura fixa pode prover conectividade e viabilizar a utilização das VANETs (XU et al., 2011; LIU et al., 2011; BARBA et al., 2012). No entanto, o custo da infraestrutura para construção e manutenção destas redes é muito elevado, o que as torna impraticáveis na maioria das vezes (LIU et al., 2011). Além disso, a infraestrutura estática é pouco adaptável e escalar, requerendo uma equipe de pessoas para manutenção e rotinas de segurança para evitar roubos e depredações, especialmente em grandes cidades.

Ainda, a utilização de infraestrutura fixa torna as redes híbridas, contendo uma parte ad hoc e outra subsidiada por infraestrutura. Por isso, um desafio ainda maior consiste em manter as VANETs conectadas sem utilizar nenhum tipo de infraestrutura fixa. Por estas razões, este

trabalho propõe a construção de um *backbone* ad hoc móvel, diminuindo os custos financeiros e proporcionando conectividade nas VANETs de uma forma totalmente móvel e independente, fazendo uso de componentes (ônibus expressos) já existentes naturalmente nas cidades.

O *backbone* será utilizado como apoio para troca eficiente de mensagens entre os veículos em ambientes com conectividade instável, sendo desta forma importante a construção de protocolos de roteamento capazes de explorar a conectividade fornecida pelo *backbone*. Deste modo, este estudo também tem como alvo a construção de um conjunto de protocolos de roteamento, abrangendo os principais modos de operação para arquiteturas independentes de infraestrutura fixa. Com a utilização do BMVA e dos novos protocolos, pretende-se mostrar o aumento ou redução de diversas métricas, entre elas destacam-se (ALVES; ALBINI, 2012): aumento na taxa de entrega, aumento da vazão dos pacotes de dados, redução da sobrecarga de roteamento.

A construção de um *backbone* móvel que preserve a independência de infraestrutura e de protocolos que trabalham melhor em redes com pouca conectividade são ações inéditas, que podem contribuir significativamente para a comunidade acadêmica.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 OBJETIVO GERAL

Este trabalho propõe a construção de uma rede de transporte (*backbone*) ad hoc móvel (BMVA) cujo objetivo é fornecer infraestrutura e prover elevado grau de conectividade, garantindo a entrega fim-a-fim das mensagens em uma determinada região. O BMVA é formado pelos ônibus que circulam por vias expressas e exclusivas nas grandes cidades.

O outro foco deste estudo visa o desenvolvimento de protocolos de roteamento capazes de minimizar a falta de conectividade entre os veículos urbanos e aumentar o desempenho da rede. Para isso, estes protocolos terão que tomar decisões de roteamento considerando o BMVA no momento em que os nós estão constituindo as rotas.

### 1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar estudos experimentais: análises estatísticas aplicadas em dados reais dos registros de mobilidade do transporte urbano da cidade de Curitiba para verificar a viabilidade do BMVA quanto à conectividade dos ônibus;
- Criar modelos analíticos para generalizar a análise da conectividade;

- Realizar estudos de simulação: criar simulações dos movimentos dos ônibus que retratem a realidade observada nos estudos experimentais quanto à conectividade no BMVA;
- Realizar a avaliação do BMVA utilizando um simulador de rede;
- Construir/adaptar protocolos que considerem o BMVA no momento em que os nós estão descobrindo as rotas;
- Realizar a avaliação dos novos protocolos que atuam no BMVA utilizando um simulador de rede.

### 1.3 METODOLOGIA

O cenário utilizado para a coleta dos dados e construção do *backbone* móvel foi as vias exclusivas utilizadas pelos ônibus expressos que fazem parte da rede integrada de transportes (RIT) da cidade de Curitiba. São 81 quilômetros de vias exclusivas e 185 ônibus expressos. A companhia de urbanização da cidade de Curitiba (URBS) (URBS, 2015) forneceu acesso às informações necessárias (posição geográfica de todos os ônibus) para a investigação da conectividade do BMVA (análises estatísticas, modelos analíticos e simulações).

A validação e desenvolvimento dos estudos experimentais e dos protocolos foi realizada por meio do simulador NS (*Network Simulator*) versão 2.35 (NS2, 2015) e do gerador de tráfego veicular VanetMobiSim (VANETMOBISIM, 2015). O NS-2 é um simulador de eventos discretos utilizado em pesquisas sobre redes de comunicação. Ele suporta os protocolos de rede mais populares, tanto para redes cabeadas quanto para as sem fio. Foi desenvolvido na linguagem orientada a objetos C++, de forma modular. O uso desta linguagem confere velocidade e praticidade na implementação de protocolos e modificação de classes. A interface com o usuário, configurações, estabelecimento de parâmetros, manipulação de objetos e classes é feita em modo texto, através da linguagem interpretada OTcl, que também é orientada a objetos.

O VanetMobiSim é um software utilizado para gerar movimentos veiculares que procurem representar fielmente a realidade. Os dados gerados por esta ferramenta podem ser utilizados em simuladores de redes como o NS-2. O VanetMobiSim é baseado em JAVA e utiliza códigos XML em modo texto como interface com o usuário. Para definir os modelos de mobilidades para as simulações, esta ferramenta trabalha com macro e micro-mobilidade. A macro mobilidade está relacionada à topologia e estrutura das estradas (se o trânsito é uni ou bidirecional, se a via possui pista única ou dupla), limites de velocidades e presença de semáforos. A micro-mobilidade inclui todos os aspectos relacionados com a velocidade individual de cada veículo e o modelo de aceleração.

## 1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está dividido em oito capítulos e quatro apêndices. O capítulo 2 apresenta as principais características das VANETs. O capítulo 3 apresenta os trabalhos relacionados. O capítulo 4 apresenta a rede de transporte de dados ad hoc móvel proposta, o modelo analítico para a distância inter-veicular e a validação do BMVA utilizando um simulador de movimentos. O capítulo 5 apresenta o protocolo *Priority Ad Hoc On-Demand Distance Vector* (P-AODV). O capítulo 6 apresenta o protocolo *Priority Ad Hoc On-Demand Multipath Distance Vector* (P-AOMDV). O capítulo 7 apresenta o protocolo *Priority Destination-Sequenced Distance Vector Routing Protocol* (P-DSDV). O capítulo 8 apresenta a conclusão e os trabalhos futuros. Os apêndices A, B, C e D apresentam os estudos experimentais, as análises estatísticas, análise QQ-Plot e a avaliação do BMVA utilizando um simulador de rede.

## 2 REDES AD HOC VEICULARES

A possibilidade da comunicação entre dispositivos em ambientes móveis tem motivado um grande interesse na exploração das redes ad hoc auto-organizadas e autogerenciadas, usualmente conhecidas por *Mobile Ad Hoc Networks* (MANETs) (BANGNAN; SVEN, 2003). A adaptação do seu uso exclusivamente para ambientes rodoviários deu origem a uma nova área de estudo, as *Vehicular Ad Hoc Networks* (VANETs) (MAOWAD; SHAABAN, 2012). As VANETs são redes móveis onde a comunicação é estabelecida entre veículos, cujo principal objetivo é melhorar as condições de circulação do tráfego rodoviário, proporcionando conforto e segurança aos passageiros.

Cada veículo participante da rede deve possuir um dispositivo sem fio apto a se comunicar através de sinais de rádio com os outros dispositivos presentes nos demais veículos, além de ser capaz de atuar como um roteador que recebe uma mensagem e reenvia em direção ao destino. Dentre as principais características das VANETs, as seguintes merecem destaque (MAOWAD; SHAABAN, 2012; MAHAJAN et al., 2007; BLUM et al., 2003): topologia altamente dinâmica da rede, tráfego escasso ou desequilibrado, frequentes desconexões, mobilidade restrita (veículos circulam em malhas viárias), inexistência de restrições de energia, influência do ambiente (prédios, árvores e outros obstáculos influenciam no funcionamento da rede).

### 2.1 APLICAÇÕES

Nas VANETs, a característica mais importante é a capacidade que os veículos possuem de enviar, receber, armazenar e encaminhar dados pela rede, ou seja, trocarem informações entre si. O objetivo principal das VANETs é garantir a comunicação entre os veículos, oferecendo as condições mínimas necessárias para que aplicações, com diferentes requisitos, sejam atendidas. As principais aplicações são voltadas para segurança, eficiência de recursos e conforto (MAOWAD; SHAABAN, 2012; LIU et al., 2011; BARBA et al., 2012).

No campo da segurança, destaca-se a divulgação de informações sobre acidentes, ocorrências no trânsito e condições adversas nas ruas e estradas, de forma que o condutor possa

reagir adequadamente de acordo com o obstáculo encontrado. Exemplos de aplicações voltadas à segurança são descritos a seguir: detecção de condições da estrada, detecção de acidentes, detecção de veículos de emergência, detecção de desaceleração do tráfego.

Na área da eficiência de recursos, são desenvolvidas aplicações voltadas à condução eficiente e consciente, cujo objetivo é evitar congestionamentos, diminuir a poluição ambiental, aumentar o rendimento dos veículos e melhorar o bem estar dos motoristas durante as viagens. Exemplos de aplicações voltadas à eficiência de recursos são descritos a seguir: detecção de congestionamento, fiscalização, cobranças automáticas, assistências, detecção de semáforos.

Nas aplicações voltadas para o conforto, destacam-se sistemas de compartilhamento de conteúdo para troca de arquivos, informações turísticas, localização de restaurantes e postos de abastecimento. Exemplos de aplicações voltadas ao conforto são descritas a seguir: informações sobre cardápios de restaurantes, informações sobre horários de cinemas e teatros, compartilhamento de músicas e vídeos, acesso a internet.

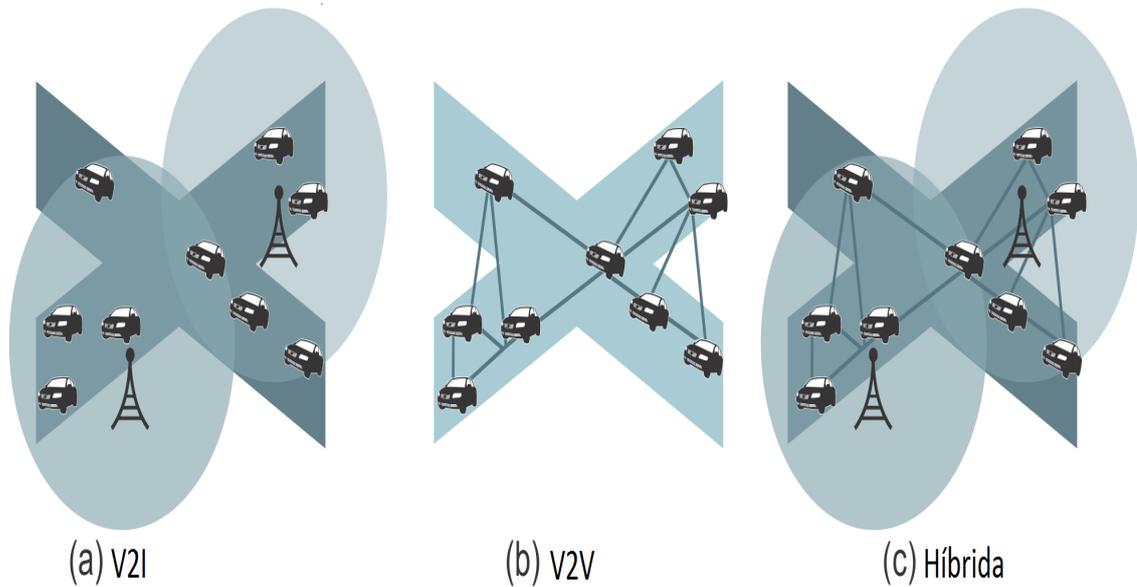
## 2.2 COMUNICAÇÃO

Nesta seção são apresentados os tipos de arquiteturas de comunicação que podem ocorrer nas redes veiculares, bem como os modos de comunicação possíveis. Os tipos de arquiteturas compreendem a topologia da rede, e os modos de comunicação estão relacionados às formas como as informações são transferidas.

### 2.2.1 ARQUITETURAS DE COMUNICAÇÃO

Nas VANETs, a comunicação entre os veículos pode ser feita seguindo três topologias diferentes: *Vehicle-to-Vehicle* (V2V); *Vehicle-to-Infrastructure* (V2I) e de forma híbrida utilizando a V2V e a V2I ao mesmo tempo (XIANG et al., 2009; CHEN et al., 2009; ALVES et al., 2008). A Figura 1 ilustra estas arquiteturas de comunicação.

A arquitetura V2V é caracterizada pela descentralização das funções da rede, na qual os veículos se comunicam entre si sem qualquer infraestrutura centralizada. Para isso, os próprios veículos fazem o roteamento dos pacotes na rede, encaminhando-os através de outros veículos por múltiplos saltos. Estas redes são consideradas distribuídas, auto-organizáveis e auto-gerenciáveis. Devido ao fato das unidades serem móveis, a topologia da rede pode mudar imprevisivelmente. Com efeito, as rotas estabelecidas inicialmente podem se tornar obsoletas, devendo ser recalculadas. O roteamento de pacotes em VANETs V2V deve usar protocolos distribuídos e eficientes que calculem múltiplas rotas livres de laços e que mantenham uma baixa



**Figura 1: Arquiteturas de comunicação.**

sobrecarga de comunicação e uma alta taxa de entrega (ROYER; CHAI-KEONG., 1999). Apesar desta estrutura de rede ser facilmente implementada, podendo ser construída em qualquer lugar, ela possui a desvantagem de ter sua conectividade dependente da densidade e do padrão de mobilidade dos veículos.

A arquitetura V2I adota nós estáticos funcionando como pontos de acesso (APs). Esses APs centralizam todo o tráfego da rede, servindo como nós intermediários das comunicações. O roteamento de pacotes é simples, dado que cada pacote é entregue com apenas um salto, e o posicionamento de cada ponto de acesso é conhecido. A vantagem deste tipo de rede é o aumento da conectividade e a possibilidade da comunicação com outras redes, como a Internet. Entretanto, essa conectividade da rede só é garantida mediante um grande número de APs, o que pode elevar consideravelmente o valor da sua implementação.

Existe ainda uma arquitetura híbrida para redes veiculares, na qual é utilizada uma infraestrutura mínima para aumentar a conectividade e também existe a possibilidade dos veículos se comunicarem por múltiplos saltos.

### 2.2.2 MODOS DE COMUNICAÇÃO

Os modos de comunicação estão relacionados às formas como as informações são transferidas, e podem ser classificados em (NAMBOODIRI; GAO, 2007):

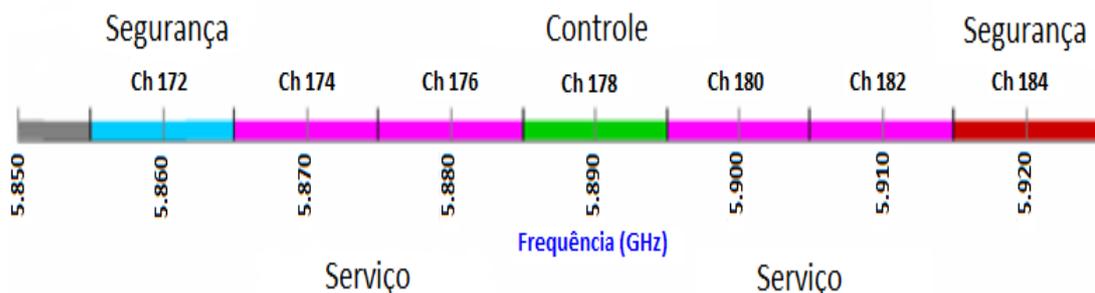
- *Unicast*: é caracterizado pela existência de um processo de comunicação entre um nó de

origem e um nó de destino. A informação é transferida por um único caminho, sem ser replicada.

- *Multicast*: é caracterizado por permitir que uma mesma mensagem seja enviada para múltiplos destinos. Os nós para os quais a informação se destina devem pertencer a um mesmo grupo *multicast*.
- *Broadcast*: é caracterizado pelo envio da informação em difusão, sendo utilizado para um nó de origem enviar uma mensagem para todos os nós da rede que estão ao seu alcance.
- *Geocast*: é caracterizado por uma mensagem ser enviada para todos os nós que se encontrem em uma determinada posição geográfica. Para utilizar o modo *geocast*, cada nó deve estar equipado com um dispositivo de localização por posição geográfica (GPS).

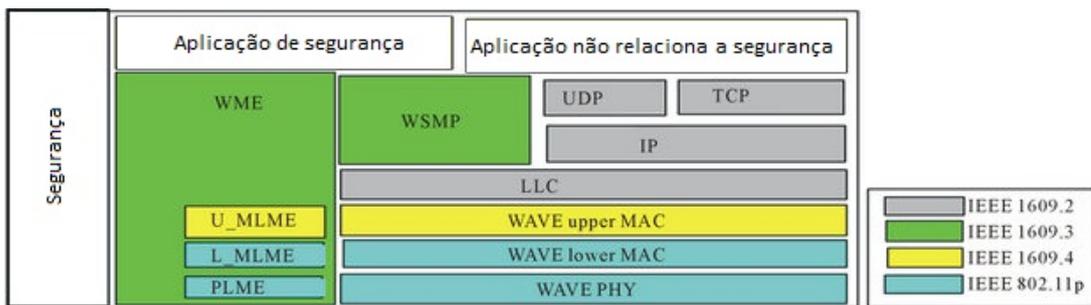
### 2.3 CAMADA FÍSICA E ACESSO AO MEIO

Conforme ilustrado na Figura 2, nas VANETs, a comunicação por rádio frequência deve utilizar o padrão *Dedicated Short Range Communications* (DSRC) (IEEE, 2007) na faixa de frequência entre 5.850 e 5.925 GHz nas categorias segurança, controle e serviços. O *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE) está desenvolvendo o padrão *Wireless Access in Vehicular Environments* (WAVE) (UZCATEGUI; MARUM, 2009) para operar na banda definida pelo DSRC. Este padrão define uma nova família de quatro protocolos dedicados à comunicação entre veículos, denominados IEEE 1609 (Figura 3). O padrão IEEE 1609.2, por exemplo, especifica os protocolos da camada de rede.



**Figura 2: Banda do espectro e canais do DSRC**

O WAVE está sendo construído levando em consideração as especificações do DSRC americano, dividindo o espectro de frequência em sete canais de 10MHz cada. Um desses canais é usado apenas para gerenciamento da rede e serve para troca de mensagens de controle. Como o padrão está sendo desenvolvido para as VANETs, deve levar em consideração a velocidade de



**Figura 3: Normas do DSRC**

deslocamento dos nós, o alcance da rede e a taxa de transmissão dos dados, assim as seguintes características merecem destaque:

- Alcance de até 1 km na ausência de obstáculos;
- Taxa de transmissão entre 6 a 27 Mbps;
- Velocidade dos nós de até 190 km/h.

Outro desafio desse protocolo é a construção de uma camada *Medium Access Control* (MAC) que suporte a alta velocidade dos nós e que mantenha a latência minimizada. A camada MAC definida pelo WAVE deve seguir uma adaptação da camada MAC do padrão IEEE 802.11e (JIANG; DELGROSSI, 2008).

## 2.4 CAMADA DE REDE - ROTEAMENTO DE PACOTES

O roteamento de pacotes é o serviço responsável por descobrir e manter as rotas entre os nós de origem e destino, sendo desta forma fundamental para o funcionamento da VANETs (TALOOKI; ZIARATI, 2006). Os protocolos de roteamento são os responsáveis por controlar tal serviço, e podem ser classificados com base no modo de operação em topológico, geográfico, oportunístico e disseminação.

### 2.4.1 PROTOCOLOS TOPOLÓGICOS

Os protocolos de roteamento baseados em topologia funcionam em modo unicast e podem ser classificados de acordo com o tipo de arquitetura em V2V (LI; WANG, 2007). Estes protocolos normalmente são classificados em dois grupos principais: proativos e reativos. Os protocolos proativos mantêm informações sobre a topologia da rede continuamente atualizadas em suas tabelas de roteamento, independente do uso das rotas armazenadas (PERKINS;

BHAGWAT, 1994). Quando um cliente necessita enviar uma mensagem na rede, ele já sabe previamente qual a rota a ser seguida. Tais protocolos podem ter alta sobrecarga de mensagens de controle, pois para manter as tabelas de roteamento atualizadas, mensagens de controle são periodicamente enviadas para todos os nós. O protocolo *Destination Sequenced Distance Vector* (DSDV) (PERKINS; BHAGWAT, 1994) é um exemplo de protocolo proativo.

Os protocolos reativos não mantêm informações de roteamento atualizadas, eles descobrem rotas apenas quando um nó de origem precisa transmitir pacotes de dados para um nó de destino (PERKINS; ROYER, 1999; MARINA; DAS, 2002). Quando uma origem quer enviar uma mensagem para um destino, inicia-se um processo de descoberta de rota, normalmente por inundação. Se o destino é alcançado, uma mensagem de resposta é enviada para origem. Quando a rota é estabelecida, ela é mantida na tabela de roteamento dos nós até que o destino se torne inalcançável, ou a origem não deseje mais a rota. Tais protocolos apresentam sobrecarga de mensagens de controle baixa, embora aumentem a latência do procedimento de descoberta de rotas.

O protocolo *Ad-hoc On-demand Distance Vector* (AODV) (PERKINS; ROYER, 1999) é um exemplo de protocolo reativo. O procedimento de descoberta de rotas pode resultar na formação de uma ou mais rotas entre um nó de origem e um nó de destino. Os protocolos que descobrem apenas uma rota, como o AODV, são classificados como protocolos de rota única ou caminho único. Já os protocolos que descobrem mais de uma rota, como o *Ad hoc On-demand Multipath Distance Vector Routing* (AOMDV) (MARINA; DAS, 2002), são classificados como protocolos de múltiplas rotas.

#### 2.4.2 PROTOCOLOS GEOGRÁFICOS

Os protocolos de roteamento baseados em posição geográfica trabalham em modo unicast e podem ser classificados de acordo com o tipo de arquitetura em híbridos (LI; WANG, 2007). Caracterizam-se por encontrar o melhor caminho entre a origem e o destino com base em suas posições geográficas, fato este que obriga cada um dos nós a possuir um sistema de localização geográfica, como um GPS, por exemplo. Nestes protocolos, um nó de origem envia os pacotes em direção ao nó de destino por múltiplos saltos. Porém, para isso acontecer, o nó precisa conhecer a posição geográfica dos seus vizinhos.

O foco destes protocolos é permitir escalabilidade em ambientes de alta mobilidade, já que não é necessário manter informação sobre as rotas de todos os nós nas tabelas de roteamento, pois esta informação é determinada no momento em que os pacotes devem ser transmitidos ou retransmitidos (RAO et al., 2008; LIU et al., 2008; NAUMOV; GROSS, 2007; LIU

et al., 2004). Entre os protocolos baseados em posição geográfica, pode-se citar os seguintes: *Greedy Perimeter Stateless Routing* (GPSR) (RAO et al., 2008), *Geographic Source Routing* (GSR) (LIU et al., 2008), *Anchor-Based Street and Traffic Aware Routing* (A-STAR) (LIU et al., 2004) e o *Connectivity-Aware Routing* (CAR) (NAUMOV; GROSS, 2007).

### 2.4.3 PROTOCOLOS OPORTUNÍSTICOS

Os protocolos oportunisticos podem ser classificados de acordo com o tipo de arquitetura em V2V. Estes protocolos consideram cenários com frequentes desconexões e caracterizam-se por utilizar o método conhecido por *carry-and-forward* para transmitir as informações. Este método consiste em transportar ou armazenar as informações durante certo intervalo de tempo, e voltar a transmitir quando for possível (BURGESS et al., 2006; AHMED; KANERE, 2006; ZHAO; CAO, 2006).

Dentre os vários protocolos existentes, os mais importantes são: *MaxProp* (BURGESS et al., 2006), *Scalable Knowledge-Based Routing* (SKVR) (AHMED; KANERE, 2006) e o *Assisted Data Delivery* (VADD) (ZHAO; CAO, 2006). Os protocolos oportunisticos estabelecem rotas entre pares de origens e destinos em unicast, mas apresentam uma grande vantagem, que é a possibilidade de possuir conectividade temporária entre os diversos nós da rede para o encaminhamento das mensagens.

### 2.4.4 PROTOCOLOS DE DISSEMINAÇÃO

Os protocolos de disseminação podem ser classificados de acordo com o tipo de arquitetura em V2I e caracterizam-se por enviar as informações em *broadcast* ou *geocast*, sendo indicados para diversas aplicações em redes veiculares, como por exemplo, aplicações de segurança. Nestes protocolos, quando ocorre um acidente em um ambiente rodoviário, mensagens de alarme podem ser transmitidas para informar todos os outros veículos sobre o ocorrido.

Os protocolos clássicos, como os topológicos, geográficos e oportunisticos, os quais funcionam em modo *unicast*, devem primeiramente descobrir as rotas e construir cada uma delas para cada nó vizinho. Essa tarefa consome tempo, por isso os protocolos clássicos são muitas vezes menos indicados para divulgação de informações críticas (KORKMAZ et al., 2004; BENSLIMANE, 2004). São exemplos de protocolos de disseminação: *Urban Multi-hop Broadcast protocol* (UMB) (KORKMAZ et al., 2004) e o *Optimized Dissemination of Alarm Messages* (ODAM) (BENSLIMANE, 2004).

## 2.5 DESCRIÇÃO DE ALGUNS PROTOCOLOS DE ROTEAMENTO

### 2.5.1 AD-HOC ON-DEMAND DISTANCE VECTOR (AODV)

O protocolo *Ad-hoc On-demand Distance Vector* (PERKINS; ROYER, 1999) foi projetado para o uso em redes ad hoc que possuam desde dezenas até milhares de nós móveis. O objetivo principal do protocolo é se adaptar rápida e dinamicamente às variações das condições dos enlaces da rede, descobrindo rotas de forma a se evitar o desperdício de banda e minimizar o uso de memória e processamento nos nós que atuam como roteadores.

O AODV é um protocolo que atua sob demanda, isto é, procura por rotas somente quando elas são realmente necessárias, e o faz através um mecanismo de descoberta de rotas. Cada nó possui em sua tabela de roteamento somente informações sobre o próximo salto para o qual a mensagem deve ser enviada para chegar ao destino. Desta forma, quando o nó K quer enviar uma mensagem para o nó J, ele verifica em sua tabela de roteamento qual é o próximo salto para se chegar ao nó J, e envia a mensagem para o nó que for o próximo salto. Caso este nó não seja o J (destino), ele repete o processo até que a mensagem chegue ao destino. Quando a origem não tem próximo salto para o destino desejado, ela executa o processo de descoberta de rota.

#### 2.5.1.1 DESCOBERTA DE ROTA

O AODV constrói rotas através de mensagens de requisição de rotas *Route Request* (RREQ) e respostas de rota *Route Reply* (RREP). Quando um nó origem necessita enviar uma mensagem de dados para um nó que ele ainda não conhece a rota, uma mensagem de RREQ é enviada em *broadcast* através da rede. Os nós que recebem esta mensagem atualizam suas tabelas de roteamento, adicionando uma entrada para informar que para chegar à origem, basta enviar a mensagem para o nó que acabou de enviar a RREQ. Os nós mantêm controle da origem da RREQ e do identificador de *broadcast*. Se eles receberem uma mensagem RREQ já processada, a mensagem é simplesmente descartada.

Um nó que recebe uma mensagem de RREQ pode enviar uma mensagem de RREP para a origem se ele é o destinatário, ou se ele conhece uma rota para o destino. Esta mensagem de RREP é enviada em *unicast* pelo caminho reverso criado pelo RREQ. Como a mensagem de RREP deve ser propagada até a origem, os nós atualizam suas tabelas de roteamento, adicionando uma entrada para informar que para chegar no destino original da RREQ (que agora é origem da RREP), basta enviar a mensagem para o nó que acabou de enviar a RREP. Quando o nó de origem receber a RREP, ele pode então transmitir pacotes de dados para o destinatário,

simplesmente encaminhando mensagem para o nó que entregou a RREP.

### 2.5.1.2 MANUTENÇÃO DAS ROTAS

A movimentação de um nó pode provocar a queda de um enlace que está sendo utilizado. Nesta situação, o nó que detectou a quebra envia uma mensagem de *Route Error* (RERR) até a origem, avisando sobre a queda do enlace. Se a origem ainda deseja utilizar a rota, o processo de descoberta de rotas é reiniciado.

### 2.5.2 AD HOC ON-DEMAND MULTIPATH DISTANCE VECTOR ROUTING (AOMDV)

O objetivo do protocolo AOMDV (MARINA; DAS, 2002) é estender o AODV para encontrar múltiplas rotas livres de laços e disjuntas entre a origem e o destino, ao invés de somente uma rota. Ao descobrir a primeira rota para o destino, a origem começa a usá-la. Todas as outras rotas descobertas são deixadas como rotas de *backup*. A origem vai tentar usar uma dessas rotas se a atual for interrompida. O AOMDV está baseado nas seguintes operações: descoberta de rota, manutenção de rota, liberdade de laço e caminhos disjuntos.

#### 2.5.2.1 DESCOBERTA DE ROTA

A origem inicia um processo de descoberta de rota enviando uma mensagem de *route request* (RREQ) em *broadcast*. A partir do momento que o RREQ é enviado para a rede toda, um nó pode receber várias cópias do mesmo RREQ. Em protocolos de caminho único, apenas o primeiro RREQ é usado para formar rotas inversas entre o nó que recebeu o RREQ e a origem, as cópias duplicadas que chegam depois, são simplesmente descartadas. Porém, algumas dessas cópias duplicadas podem ser utilizadas para formar caminhos inversos alternativos. Assim, todas as cópias duplicadas são examinadas no AOMDV, aquelas cópias que preservam a liberdade de laço e possuem caminhos disjuntos entre a origem e o destino, poderão ser utilizadas para formar caminhos alternativos.

Quando um nó intermediário recebe uma cópia de uma mensagem de RREQ, ele verifica em sua tabela de roteamento se existe um ou mais caminhos válidos para o destino solicitado na mensagem de RREQ. Caso exista, o nó gera uma mensagem de *route reply* (RREP) e a envia de volta para a origem no caminho inverso. Caso contrário, a mensagem de RREQ é reencaminhada pelo nó intermediário na rede.

Quando o nó destino recebe cópias da RREQ, ele constrói caminhos inversos da mesma forma que os nós intermediários. O nó destino gera um RREP em resposta a cada RREQ que

chega, através de um caminho livre de laço com a origem.

#### 2.5.2.2 MANUTENÇÃO DE ROTA

Para manutenção de rotas, o AOMDV usa mensagens de erro *Route Error* (RERR). Um nó gera e encaminha uma RERR para a origem quando detecta a quebra de um enlace. O AOMDV também inclui uma otimização para salvar pacotes enviados através de enlaces quebrados e reenviá-los posteriormente por um caminho alternativo. Ao receber uma mensagem de RERR, a origem simplesmente escolhe outro caminho para o destino e mantém o encaminhamento dos dados. Se não houver mais rotas disponíveis, a origem deve reiniciar o processo de descoberta de rota.

#### 2.5.2.3 LIBERDADE DE LAÇO

Um ponto importante na utilização do AOMDV é o fato deste protocolo utilizar múltiplas rotas entre a origem e o destino e conseguir garantir que estas sejam livres de laços. No AOMDV, cada RREQ e RREP define um caminho alternativo entre a origem e o destino. Múltiplos caminhos são mantidos nas tabelas de roteamento de cada nó. Cada entrada na tabela de roteamento contém uma lista do próximo salto juntamente com o número de saltos (*hop count*) para cada destino.

O AOMDV, para assegurar que os caminhos sejam livres de laços, utiliza um valor chamado de *advertised hop count*. Cada nó mantém este valor para cada destino em sua tabela de roteamento. O *advertised hop count* é definido como a contagem de saltos do caminho mais longo disponível no momento em que um nó anuncia pela primeira vez um caminho para o destino. Um caminho alternativo entre o nó J e o destino K, só é aceito se o *hop count* é menor que o *advertised hop count*. A contagem de saltos anunciados (*advertised hop count*) impede a formação de um caminho alternativo para um destino, através do nó que gerou o RREQ, e portanto, garante a liberdade de laço. Este fato acontece pois, caso o pacote de RREQ passe novamente pelo nó que o gerou, o valor da variável *hop count* será maior que o valor da variável *advertised hop count* e, quando isso ocorre, um caminho alternativo entre dois nós não é formado. A Tabela 1 ilustra os campos da tabela de roteamento do protocolo AOMDV.

#### 2.5.2.4 CAMINHOS DISJUNTOS

Além de manter vários caminhos livres de laço, o AOMDV visa encontrar caminhos alternativos disjuntos entre um par de nós. A utilização de rotas disjuntas aumenta a tolerância

**Tabela 1: Tabela de roteamento do protocolo AOMDV.**

<b>AOMDV</b>
destination
sequence number
advertised_hopcount
route_list {(nexthop1,hopcount1), (nexthop2,hopcount2),...}
expiration_timeout

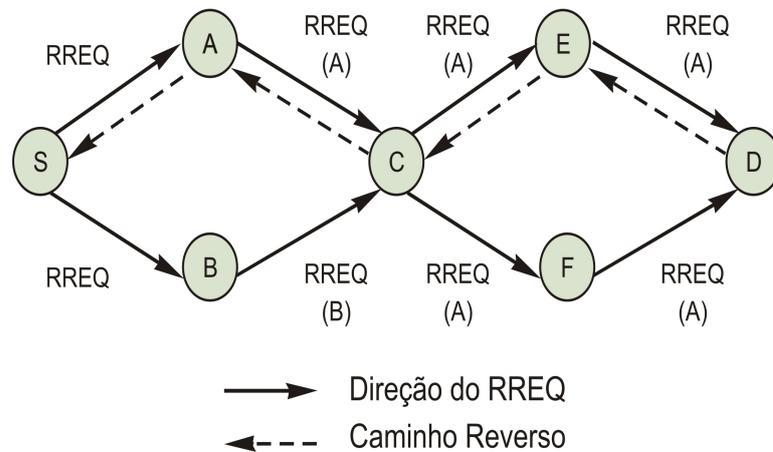
a falhas, pois a probabilidade de falhas simultâneas é menor em comparação à utilização de caminhos alternativos compartilhados. Para o AOMDV, qualquer caminho entre um par de nós que não possua nós ou enlaces comuns é considerado disjunto.

Em protocolos de caminho único, um nó pode registrar apenas o próximo salto e a distância através do próximo salto para cada caminho. Estas informações não são suficientes para um nó determinar se dois caminhos obtidos a partir de dois vizinhos são de fato distintos. Informações adicionais são necessárias para verificar se os caminhos são totalmente diferentes. Uma possibilidade é que cada nó da rede mantenha informações completas de caminhos para cada rota, ou seja, todo o caminho com todos os nós os quais o pacote deverá percorrer. No entanto, esta solução tem uma alta sobrecarga de comunicação (MARINA; DAS, 2002). O protocolo AOMDV possui um mecanismo o qual não necessita que os nós mantenham informações completas de caminhos para cada rota, e mesmo assim consegue garantir que as múltiplas rotas sejam disjuntas.

O mecanismo proposto pelo AOMDV requer que cada nó mantenha o registro do último salto para cada caminho, além do próximo salto. Quando um nó de origem necessita de uma rota para um destino e nenhuma rota está disponível, inicia-se um processo de descoberta de rotas. A origem gera um pacote de RREQ e envia para toda rede. Quando algum vizinho da origem recebe o pacote de RREQ, antes de retransmiti-lo, copia seu endereço para o campo *Last Hop* (último salto) do RREQ. Um nó intermediário somente aceita pacotes de RREQ com diferentes *Last Hop* e só retransmite o primeiro pacote recebido. O destino aceita todos os RREQs recebidos, mas somente cria rotas com os que possuem diferentes *Last Hop*.

Na Figura 4, o nó S transmite um pacote de RREQ em seu raio de alcance. Quando os nós A e B recebem o pacote de RREQ, adicionam seus endereços no campo *Last Hop*. Em seguida, os nós criam em suas tabelas de roteamento os caminhos reversos (A-S) e (B-S) e retransmitem os pacotes de RREQ. O pacote enviado via nó A é representado por RREQ(A) e o enviado via nó B é representado por RREQ(B). Após o nó C receber os pacotes RREQ(A) e

RREQ(B), ele cria em sua tabela de roteamento duas rotas reversas disjuntas:(C-A-S) e (C-B-S). Em seguida, o nó C retransmite o RREQ(A), que foi o primeiro pacote de RREQ recebido. Quando os nós E e F recebem o RREQ(A), criam as rotas reversas (E-C-A-S) e (F-C-A-S). Por fim, o nó D recebe os pacotes RREQ(A) enviados pelos nós E e F. Se D receber primeiramente o RREQ(A) enviado por E, cria a rota reversa (D-E-C-A-S). Quando receber a segunda cópia de RREQ(A) enviada por F, a qual contém o mesmo *Last Hop* do pacote enviado por E, o nó destino D não constrói a rota reversa(D-F-C-A-S), pois esta não será disjunta.



**Figura 4: Criando caminhos disjuntos**

### 2.5.3 DESTINATION-SEQUENCED DISTANCE-VECTOR ROUTING (DSDV)

O DSDV é um protocolo *unicast* do tipo *Distance-Vector* (PERKINS; BHAGWAT, 1994) ao qual são acrescentados números de sequência. No DSDV, os nós da rede mantêm uma tabela de rotas com todos os destinos disponíveis, número de saltos (métrica) para alcançar os destinos, próximos saltos e números de sequência. A Tabela 2 ilustra os campos da tabela de rotas do protocolo DSDV.

**Tabela 2: Tabela de roteamento do protocolo DSDV.**

DSDV
Destination
Next hop
Metric
Sequence number

O DSDV requer que cada nó anuncie para seus vizinhos sua própria tabela de roteamento. Como alterações na topologia da rede podem ocorrer dinamicamente, os anúncios

devem ser realizados com frequência, assegurando que todos os nós mantenham suas tabelas de roteamento atualizadas. Todos os anúncios realizados devem conter o endereço do destino, o número de saltos (métrica) para alcançar esse destino e um novo número de sequência.

O número de sequência é usado para distinguir rotas velhas de novas, evitando assim a formação de laços (*loops*). Quando os nós recebem as mensagens de atualização de seus vizinhos, eles comparam o número de sequência recebido com o número de sequência das suas próprias tabelas. Se este número for maior (mais recente), a atualização é feita independente de outros parâmetros. Se os números forem iguais, é utilizada a rota com a menor métrica (menor número de saltos para o destino) (PERKINS; BHAGWAT, 1994). O recebimento de mensagens com o mesmo número de sequência é comum, uma vez que todos os nós fazem a difusão das mensagens de atualização por *broadcast*. A Figura 5 ilustra o funcionamento do protocolo DSDV.

Como pode ser observado na Figura 5, o nó *B* fará o anúncio de rotas. Ele incrementa o seu número de sequência para o próximo número par e envia as informações sobre sua tabela de rotas para seus vizinhos. Os nós vizinhos ao receberem as informações sobre a tabela de *B*, realizam a atualização imediatamente, pois possuem um número de sequência menor armazenado.

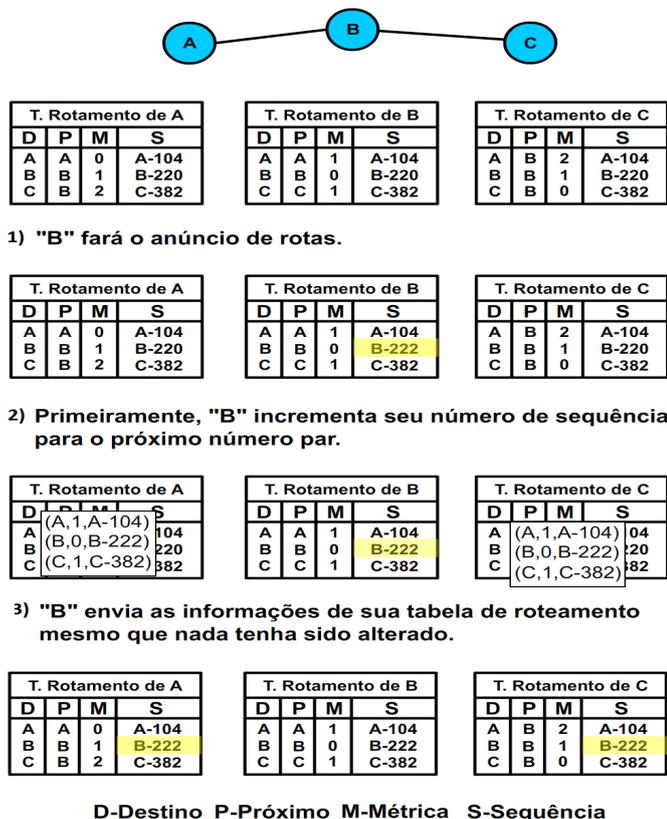


Figura 5: Funcionamento do DSDV

#### 2.5.4 URBAN MULTIHOP BROADCAST PROTOCOL (UMB)

Os sistemas de comunicação entre veículos podem utilizar a transmissão por múltiplos saltos como forma de transmitir informações para locais que estão fora do alcance dos nós de origem. Contudo, esta disseminação de mensagens pode ser difícil em áreas urbanas, pois tais áreas possuem diversos obstáculos que dificultam tal tarefa.

O *Urban Multihop Broadcast Protocol* (UMB) (KORKMAZ et al., 2004) tem como objetivo superar interferências, colisões de pacotes e o problema do nó oculto durante o envio das mensagens por múltiplos saltos em áreas urbanas. Para alcançar estes objetivos, o referido protocolo utiliza um processo semelhante ao *Request-To-Send* (RTS) e o *Clear-To-Send* (CTS) (IEEE, 1999).

O UMB trabalha de duas formas, no modo difusão direcional e no modo interseção. Na difusão direcional, o nó de origem escolhe o nó mais distante em relação a sua posição para reconhecer as mensagens e continuar a difusão. Todavia, esta operação é feita sem nenhum conhecimento inicial sobre a topologia da rede, ou seja, o nó mais distante é selecionado sem o conhecimento inicial de seu identificador único na rede, ou da posição dos seus vizinhos.

No modo interseção, o UMB admite que repetidores sejam instalados nos cruzamentos das estradas para encaminhar a difusão, e estes repetidores devem possuir linha de visada direta para todas as partes da estrada. Quando um cruzamento é descoberto no caminho das transmissões dos pacotes, novas difusões devem ser iniciadas em todas as direções neste cruzamento, uma vez que repetidores têm a melhor linha de visada com os outros segmentos de estrada, especialmente quando há prédios altos ao redor.

#### 2.5.5 ROUTING FOR VEHICLE-BASED DISRUPTION-TOLERANT NETWORKS (MAX-PROB)

No protocolo *MaxProb* (BURGESS et al., 2006), o conhecimento adquirido durante o encontro dos nós na rede é utilizado para otimizar o encaminhamento das mensagens. Todos os nós pertencentes à rede possuem um vetor de pacotes ordenados, no qual a ordenação funciona de acordo com o *delivery likelihood* (probabilidade de encontro) de cada pacote.

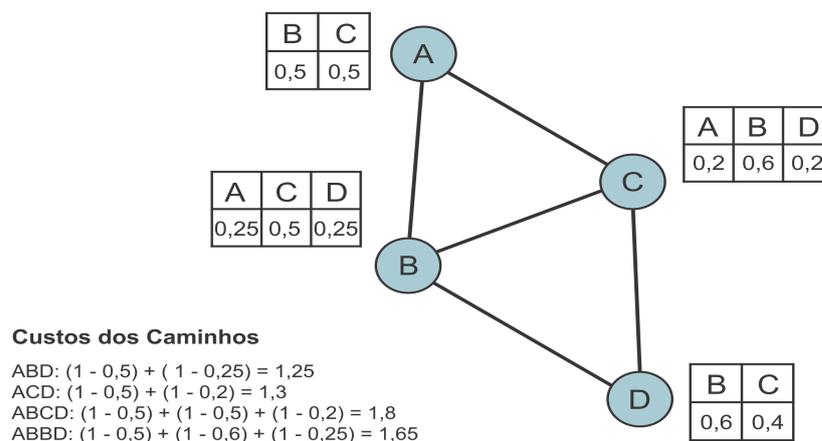
Além do vetor ordenado de pacotes, os nós possuem também uma tabela de todos os outros nós destinatários, contendo o peso de cada um destes. Este peso representa a frequência de um encontro e inicialmente tem o mesmo valor para todos os destinos, mas conforme os encontros entre os nós ocorrem, este peso pode ser incrementado.

Como exemplo pode-se mencionar uma rede com 5 nós. Nesta rede todos os nós mantêm uma lista com os pesos dos outros nós, sendo inicialmente cada peso igual a 0,25, com isso o somatório dos pesos é igual a 1. No momento que um nó encontra um dos outros quatro nós, o peso do nó encontrado é incrementado em 1 (um) na tabela de pesos do nó que o encontrou. Após isso, todos os pesos que estão na tabela são normalizados para que a soma se torne 1 (um) novamente. A Tabela 3 ilustra este fato.

**Tabela 3: Normalização de encontros.**

1	2	3	4
0,25	0,25	0,25	0,25
1	2	3	4
$0,25/2$	$0,25/2$	$(0,25 + 1)/2$	$0,25/2$
1	2	3	4
0,125	0,125	0,625	0,125

Durante o encontro dos nós, cada nó tem acesso à tabela de pesos do outro nó, as quais são trocadas entre eles, e são estas trocas de tabelas que possibilitam o cálculo da probabilidade de entrega dos pacotes. Para isto, é realizada uma busca a partir do nó de origem, considerando todos os caminhos possíveis até o destinatário, sendo que o custo de um caminho entre um par de nós I e J equivale a  $1 - peso_i(J)$ , com  $peso_i(J)$  sendo o peso que J possui na tabela de I. Posteriormente ao cálculo do custo de todos os caminhos, adota-se o menor valor calculado para atribuir o valor da probabilidade de entrega para o pacote. A Figura 6 ilustra o cálculo do custo de caminhos entre os nós A e D no protocolo MaxProp.



**Figura 6: Cálculo do custo de caminhos entre os nós A e D no protocolo MaxProp.**

Além da estrutura de priorização de pacotes, o protocolo MaxProp possui alguns outros mecanismos interessantes, são eles: pacotes que tem poucos saltos até o destino possuem

prioridade; confirmação de recebimento de mensagens pelo nó destinatário; um nó não recebe o mesmo pacote mais de uma vez; um nó não recebe pacotes já armazenados.

#### 2.5.6 GREEDY PERIMETER STATELESS ROUTING (GPSR)

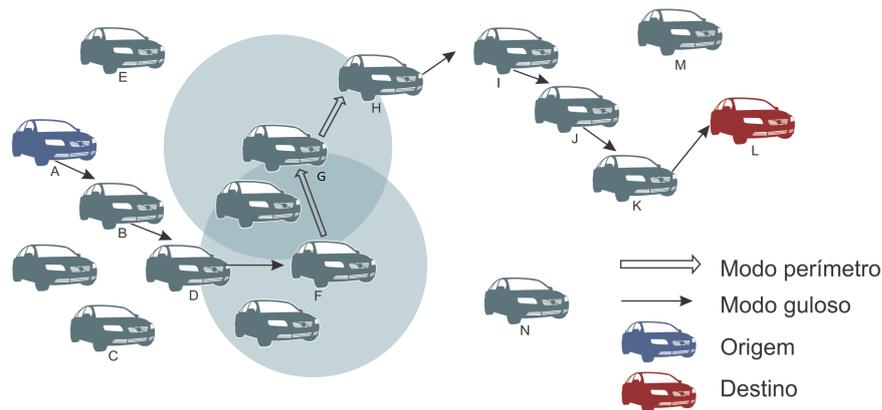
O protocolo *Greedy Perimeter Stateless Routing* (GPSR) (RAO et al., 2008) faz uso do conceito da escolha do nó vizinho mais próximo ao destino para encaminhar os pacotes. No GPSR, todos os nós da rede tem conhecimento da sua posição geográfica, da dos seus vizinhos e da posição do nó destino. Durante a fase de descobrimento de rotas, uma mensagem particular é enviada aos nós localizados a um salto de distância do transmissor. Tal mensagem, conhecida como *beacon*, é responsável por informar a identificação do nó e sua localização.

Por meio das mensagens de *beacons*, todos os nós da rede obtêm informações sobre a localização dos nós vizinhos a um salto de distância. Assim, caso um nó qualquer não receba os *beacons* de um vizinho por um determinado período de tempo, ele assume que o vizinho está fora do raio de alcance do sinal, e o exclui da sua lista de vizinhos. O encaminhamento dos dados pelo protocolo GPSR pode ser realizado de duas maneiras: encaminhamento guloso e encaminhamento por perímetro.

No encaminhamento guloso, o pacote é enviado por múltiplos saltos até que chegue ao vizinho mais próximo possível do nó de destino. Porém, se o destino não estiver dentro do raio de alcance do vizinho mais próximo, o encaminhamento por perímetro é ativado, o qual possui o objetivo de contornar regiões onde não existem nós mais próximos ao destino que o próprio nó corrente. Nestas situações, o pacote deve se afastar do destino até encontrar uma nova rota gulosa. A Figura 7 ilustra um exemplo de funcionamento do protocolo GPSR.

Conforme ilustrado na Figura 7, o nó A deseja enviar dados para o nó L. O nó A repassa os pacotes para o nó B, que é o seu vizinho mais próximo de L. O mesmo ocorre com os nós B, D e F. Ao receber o pacote, o nó F verifica que nenhum dos seus vizinhos, no caso os nós que estão dentro do círculo cinza, está mais próximo de L que ele mesmo, porém o nó L está fora do alcance dos sinais de rádio do nó F. Assim, o nó F ativa o modo perímetro e envia os dados para G. Da mesma forma, G utiliza-se do modo perímetro para enviar dados para H. O nó H, por sua vez, encontra um nó mais próximo de L que o nó F, e assim o pacote volta a ser repassado pela estratégia gulosa até que chegue em L.

O encaminhamento no modo perímetro cria um grafo planar para conseguir encaminhar os pacotes para o nó destino, utilizando os nós localizados na região do nó que ativa o modo perímetro. Uma vez montado o grafo, uma regra conhecida como regra da mão direita



**Figura 7: Funcionamento do protocolo GPRS.**

determina qual o próximo salto da comunicação. Tal regra define que quando um pacote chega a um nó X vindo de Y, a próxima aresta atravessada será a seguinte na sequência anti-horária do X em relação à aresta (X,Y).

Devido à existência de edifícios e outros fatores que podem interromper a propagação do sinal de rádio nos cenários urbanos, o modo de perímetro é frequentemente utilizado, e de modo a evitar laços, o grafo de conectividade planar vai evitar cruzamento entre arestas. Estes fatores podem fazer com que as mensagens sejam enviadas aos vizinhos que estão mais distantes do nó de destino. Dessa forma, mais nós irão rotear as mensagens, o que causará um atraso maior na entrega das mensagens, assim como um aumento no número de saltos até alcançar o destino.

### 2.5.7 TABELA COMPARATIVA ENTRE OS PROTOCOLOS

Observa-se na Tabela 4 que os protocolos são comparados quanto aos seguintes parâmetros: tipo de arquitetura, modo de operação, tipo de encaminhamento e necessidade de serviço de localização por GPS. Quanto ao tipo de arquitetura, quatro deles são do tipo V2V (AODV, AOMDV, DSDV e MaxProb), um é do tipo V2I (UMB) e um do tipo híbrido (GPRS). Em relação ao modo de operação, três são baseados em topologia (AODV, AOMDV e DSDV), um é do tipo oportunístico (MaxProb), um do tipo disseminação (UMB) e um geográfico (GPRS). No quesito encaminhamento, o AODV, AOMDV, DSDV, MaxProb e GPRS são do tipo *unicast* e apenas o UMB é do tipo *broadcast*. Os protocolos que precisam de um equipamento de GPS para operar são o UMB e o GPRS.

Tabela 4: Tabela Comparativa Entre Protocolos de Roteamento.

<b>Protocolos</b>	<b>Arquitetura</b>	<b>Operação</b>	<b>Encaminhamento</b>	<b>GPS</b>
<b>AODV</b>	V2V	Baseado em topologia	<i>Unicast</i>	Não
<b>AOMDV</b>	V2V	Baseado em topologia	<i>Unicast</i>	Não
<b>DSDV</b>	V2V	Baseado em topologia	<i>Unicast</i>	Não
<b>UMB</b>	V2I	Dissiminação	<i>Broadcast</i>	Sim
<b>MaxProb</b>	V2V	Oportunístico	<i>Unicast</i>	Não
<b>GPSR</b>	Híbrido	Geográfico	<i>Unicast</i>	Sim

## 2.6 MODELOS DE MOBILIDADE

Uma das fases mais importantes no desenvolvimento de um protocolo de roteamento é o teste de validação. Nas VANETs, para que o desempenho de um protocolo possa ser avaliado de forma confiável, é necessário que o modelo de mobilidade utilizado no cenário de testes e simulações reproduza da forma mais realista possível o local onde se deseja utilizar a rede. Um modelo de mobilidade realístico deve possuir as seguintes características (HARRI et al., 2009):

- Possuir mapas topológicos realistas;
- Possuir controle de acelerações e frenagens;
- Prever a existência de obstáculos;
- Prever situações de cruzamentos;
- Prever mudanças de faixas e ultrapassagens;
- Possuir pontos de partidas e chegadas definidos;
- Possuir volume de tráfego configurável;
- Possuir velocidades máximas e mínimas configuráveis.

Os primeiros modelos de mobilidade existentes foram chamados de *Random Node Movement*. Tais modelos são caracterizados por possuírem velocidade e direção aleatórias, não representando assim as características das VANETs. Porém, como são facilmente configuráveis, continuam sendo utilizados. Alguns exemplos de modelos baseados em aleatoriedade são os seguintes (CAMP et al., 2002): *Random Walk Mobility Model*, *Random Waypoint Mobility Model* e *Random Direction Mobility Model*.

Outros modelos de mobilidade, conhecidos como *Real-World Trace Models*, são baseados em dados reais extraídos de sistemas que possuem informações sobre o comportamento

dos veículos, como por exemplo, do sistema GPS. Estes modelos representam com certa precisão a realidade das redes veiculares, porém possuem elevado tempo de processamento das simulações.

Para corrigir os problemas dos modelos anteriores, foram desenvolvidos novos modelos de mobilidade com características semelhantes às das VANETs e que possuem um menor custo de processamento. Estes modelos foram chamados de *Artificial Mobility Traces* e podem ser divididos em duas classes, dependendo do nível de detalhe utilizado na criação do modelo (FIORE et al., 2007).

A primeira classe intitulada de *Traffic Stream Models* é caracterizada como macroscópica e baseia o tráfego veicular em três variáveis: velocidade (km/hora), densidade (veículos/km<sup>2</sup>) e fluxo (veículos/hora). Os modelos desta classe são utilizados com menor frequência em simulações, pois apesar de refletirem melhor a realidade das redes veiculares do que os modelos aleatórios, não representam o comportamento individual dos condutores.

A segunda classe intitulada de *Car-following Models* é caracterizada como microscópica. Um modelo pertence a esta classe quando possui todas as características da primeira classe e ainda considera o comportamento individual dos condutores. Este modelo é a base para muitas aplicações geradoras de modelos de mobilidade, como o *Vanet Mobility Simulation Environment* (VanetMobiSim) (VANETMOBISIM, 2015) e o *Simulation of Urban Mobility* (SUMO) (KRAJZEWICZ et al., 2002). O modelo em questão baseia-se em quatro variáveis fundamentais, sendo elas: taxa de aceleração, taxa de desaceleração, velocidade máxima e grau de aleatoriedade.

Recentemente um novo tipo de modelo de mobilidade chamado de *Bidirectionally Coupled Simulators* vem sendo desenvolvido (SOMMER et al., 2011). Neste modelo, trabalham simultaneamente simuladores de rede, como o *Network Simulator* (NS) (NS2, 2015), e simuladores de tráfego, como o VanetMobiSim. Este simulador compartilha em tempo de simulação, informações entre o simulador de rede e o simulador de tráfego. Assim, é possível fornecer um retorno ao usuário para que este possa tomar decisões durante as simulações. O *Traffic and Network Simulation environment* (TraNS) (PIÓRKOWSKI et al., 2008) é um exemplo de simulador que trabalha seguindo o modelo de mobilidade *Bidirectionally Coupled Simulators*.

### 2.6.1 APLICAÇÕES GERADORAS DE CENÁRIOS DE MOBILIDADE

Nesta subseção serão descritas três importantes aplicações geradoras de cenários de mobilidade para VANETs.

**VanetMobiSim:** a aplicação VanetMobiSim foi desenvolvida para prover realismo nas simulações veiculares. Esta aplicação suporta macro e micro-mobilidade, existindo também a possibilidade de se extrair mapas topológicos da base de dados TIGER (BUREAU, 2015) ou criar mapas de forma manual pelo usuário. O VanetMobiSim possui dois modelos de mobilidade microscópicos integrados por padrão, o *Intelligent Driver Model with Intersection Management* (IDM-IM), que trata do comportamento dos veículos em situações de cruzamentos, e o *Intelligent Driver Model with Lane Changes* (IDM-LC), que regula o funcionamento de mudanças de faixas para suportar ultrapassagens. Os cenários de mobilidade gerados por esta aplicação podem ser utilizados no simulador de redes NS-2 (VANETMOBISIM, 2015).

**SUMO:** esta aplicação também suporta macro e micro-mobilidade, assim como a possibilidade de se extrair mapas topológicos da base de dados TIGER ou criar mapas de forma manual pelo usuário. A micro-mobilidade apresentada no SUMO oferece um sistema sem colisões, no qual a velocidade de um veículo é determinada pela velocidade do veículo que está em sua frente. Assim, em um cenário com estradas com mais de uma faixa, esta ferramenta aceita a realização de ultrapassagens. Os cenários de mobilidade gerados por esta aplicação podem ser utilizados no simulador de redes NS-2 (KRAJZEWICZ et al., 2002).

**MOVE:** o *Mobility Model Generator for Vehicular Networks* (MOVE) tem como base o SUMO, sendo desta forma uma aplicação que suporta macro e micro-mobilidade, onde é possível importar mapas topológicos da base de dados TIGER, assim como produzir mapas manualmente e utilizar os mapas gerados no simulador de redes NS-2 (KARNADI et al., 2007).

### 3 TRABALHOS RELACIONADOS

Estudos encontrados na literatura têm abordado os problemas relacionados à conectividade e aos protocolos de roteamento em VANETs. Neste capítulo, inicialmente são apresentados todos os trabalhos relacionados à conectividade, e na sequência todos os trabalhos relacionados aos protocolos de roteamento. Desta forma, os trabalhos apresentados não estão na ordem cronológica das datas de publicação.

O estudo realizado em (LI.; WANG, 2015) relata que a conectividade intermitente é o grande desafio das VANETs nos dias atuais, dificultando o estabelecimento de redes V2V. Para provar a existência do problema foram realizados estudos sobre a conectividade utilizando um modelo estocástico para a análise. Este estudo mostrou que a distância média entre os veículos influencia fortemente a conectividade em ambientes urbanos. Com base nos resultados estocásticos foi proposto um protocolo de roteamento sensível ao problema da conectividade. O protocolo proposto utiliza informações, coletadas dos semáforos, sobre a forma como os veículos estão distribuídos nas vias, para selecionar rotas mais conectadas. Os resultados de simulação demonstram que o novo protocolo é promissor quando comparado a protocolos tradicionais, apresentando resultados positivos quanto à taxa de entrega e ao atraso. Porém, a rede não é totalmente móvel, uma vez que depende de uma infraestrutura fixa (semáforos) para funcionar.

O estudo realizado em (MOHAMMAD et al., 2014) expõe que a conectividade em redes V2V é uma questão desafiadora, difícil de ser alcançada, mas que precisa ser examinada e compreendida para que soluções possam ser desenvolvidas. Para compreender a forma como os veículos se conectam, o estudo coletou traces de veículos urbanos (táxis amarelos) da cidade de San Francisco. De posse destes traces, desenvolveu um algoritmo para a análise da conectividade em qualquer ambiente de computação móvel, incluindo as VANETs. Entre as principais contribuições deste trabalho estão a análise espaço-temporal da conectividade em redes V2V e a análise do particionamento da rede. O estudo mostrou que na área onde os traces foram obtidos, mais de 70% dos veículos possuem conectividade para formar uma rede V2V.

Em (LIU et al., 2011), observou-se uma proposta que consiste na utilização de veículos estacionados como nós estáticos que fazem parte das VANETs. Os veículos estacionados são elementos naturais nas vias das cidades e podem se comunicar com os outros veículos estacionados e com os que estão em movimento, servindo deste modo como um meio para auxiliar a comunicação entre os veículos e aumentar a conectividade. Os resultados apresentados comprovaram que a utilização de veículos estacionados pode promover o aumento da conectividade da rede e auxiliar na troca de informações. Os estudos realizados utilizaram dados reais obtidos na cidade de Montreal no Canadá para construção dos ambientes de simulação e para os estudos estatísticos. Apesar dos resultados serem promissores, este estudo considerou que todos os veículos pertencentes às VANETs, estacionados ou em movimento, possuem equipamentos de comunicação sem fio instalados, o que pode não condizer com a realidade, prejudicando assim os resultados quando aplicados em ambientes reais. Além disso, a rede criada é mista, pois utiliza pontos estáticos (veículos estacionados) para prover infra-estrutura. O trabalho também não relatou quais protocolos de roteamento foram utilizados para as simulações e não mencionou se foram desenvolvidos ou melhorados protocolos já existentes.

O trabalho realizado em (WISITPONGPHAN et al., 2007) construiu um modelo de tráfego estatístico com dados coletados da rodovia I-80 na Califórnia, que teve como objetivo estudar métricas para VANETs desconexas, como o tempo de restauração da rede e espaçamento entre os veículos. O estudo mostrou que dependendo da dispersão dos veículos, a rede pode levar de segundos a minutos para ser restabelecida. Estes resultados podem indicar se os atuais protocolos de roteamento funcionam ou se novos protocolos devem ser projetados, tendo em vista que os protocolos de roteamento tradicionais não suportam tempos elevados para restauração da rede. Além disso, o estudo afirmou que com os resultados obtidos, também é possível determinar o tamanho mínimo do *buffer* de armazenamento que os nós devem possuir, o tempo médio que os pacotes devem permanecer no *buffer* e quais tipos de aplicações podem funcionar na referida rede. Este trabalho apresentou somente resultados estatísticos e numéricos, não foi apresentado nenhum resultado de simulação utilizando os protocolos de roteamento tradicionais ou novos protocolos.

O trabalho apresentado em (XU et al., 2011) abordou o problema da falta de conectividade e da baixa eficiência no encaminhamento dos pacotes de dados, causados pelo padrão altamente dinâmico de movimentação dos veículos. A solução para estes problemas está pautada na utilização de um esquema de encaminhamento de dados que utiliza rotas compartilhadas entre os veículos. São utilizados pontos de acesso espalhados ao longo das vias, para que os veículos que possuam dados para transmitir possam prever quando ocorrerá o encontro com os veículos que receberão os dados. Dada a informação sobre a trajetória dos veículos com certa

precisão, pode-se prever a probabilidade de encontro entre veículos viajando em direções opostas. Após o veículo de origem possuir conhecimento suficiente sobre a previsão de encontro com o destino, ele pode agendar a transmissão dos pacotes de dados, de forma que o pacote é transmitido salto por salto da origem até o destino. Resultados de simulação mostraram que o referido esquema é eficiente e pode melhorar a taxa de entrega dos pacotes de dados. Porém, os custos financeiros para implementação são elevados, pois as redes criadas são híbridas, utilizam pontos de acesso espalhados pelas vias e todos os veículos participantes da rede devem possuir um equipamento de GPS previamente instalado.

O objetivo do trabalho apresentado em (VIRIYASITAVAT et al., 2009) foi entender os motivos que tornam as VANETs desconexas. Para isso, foi necessário analisar o comportamento do tráfego de veículos em semáforos e vias com pistas duplas. Estas análises podem ajudar na construção de protocolos de roteamento eficientes. Para realizar tais análises, as seguintes métricas foram analisadas: grau de conectividade da rede, tempo de restauração da rede e rotas redundantes. Os resultados dos estudos indicaram que o comportamento topológico das VANETs pode variar de alta densidade, com rede extremamente conexa, a baixa densidade, com rede sem conectividade. O problema da desconexão surge quando o número de veículos é inferior a  $60 \text{ veículos}/\text{km}^2$ . Observou-se também que as redes constituídas nas VANETs urbanas apresentam um elevado número de rotas redundantes, tornando os protocolos que trabalham com multi-caminhos mais apropriados para este tipo de rede. Protocolos de roteamento multi-caminhos podem melhorar a taxa de entrega dos pacotes, pois suportam a falha de alguns veículos ou a quebra de alguns enlaces. Estes protocolos também podem equilibrar a carga de trabalho entre os veículos e evitar congestionamento na rede. O trabalho descrito apresentou somente resultados estatísticos e numéricos, não foi apresentado nenhum resultado de simulação utilizando os protocolos de roteamento multi-caminhos ou de caminho único.

O trabalho apresentado em (BARBA et al., 2012) criou uma VANET híbrida, parte ad hoc e parte provida por infraestrutura para tornar o tráfego veicular de uma cidade conexo, seguro e inteligente. Para alcançar este objetivo, foram utilizados os semáforos localizados nos cruzamentos para coletar e atualizar informações estatísticas de tráfego e enviar mensagens sobre acidentes e congestionamentos para os veículos, evitando assim novos acidentes e longas filas de espera. Os resultados apresentados mostraram que o uso de semáforos inteligentes além de melhorar a segurança nas rodovias, pode melhorar qualidade de vida dos motoristas, pois ajudam a decidir qual o melhor percurso a seguir, evitando congestionamentos e diminuindo o tempo de viagem. No entanto, o custo de implementação desta proposta é elevado, pois cada semáforo da cidade deve possuir um equipamento de comunicação sem fio com proteção contra vandalismo e ações climáticas.

Em (MAOWAD; SHAABAN, 2012), observou-se que o objetivo do trabalho foi adaptar um protocolo de roteamento já existente, para que se torne mais adequado em VANETs com alto padrão de mobilidade e rápidas mudanças de topologia. Para alcançar o objetivo desejado, foi adaptado o protocolo de roteamento multi-caminhos AOMDV. A adaptação consiste em realizar alterações na forma como o AOMDV descobre as rotas entre um nó de origem e destino. Foram adicionados parâmetros como velocidade e direção para selecionar o próximo salto durante a fase de descoberta de rotas. Resultados de simulações comprovaram que o novo protocolo superou o AOMDV original quanto ao desempenho da taxa de entrega e do atraso na entrega dos pacotes de dados. Este trabalho apresentou resultados positivos, porém foi experimentado somente em redes previamente configuradas para garantir a conectividade entre os veículos, não foram considerados casos onde a rede pode ficar com pouca ou nenhuma conectividade, como acontece nas situações reais.

O trabalho apresentado em (BISHT et al., 2012) criou um cenário de simulação urbano, utilizando o mapa da cidade de *Arlington*, localizada nos EUA, para representar as vias das cidades com realismo. A mobilidade veicular foi gerada utilizando o software VanetMobiSim e as simulações foram realizadas utilizando o Network Simulator (NS-2). O escopo destas simulações foi comparar a eficiência de dois protocolos de roteamento, um reativo e outro pró-ativo. Os protocolos utilizados para comparação foram o *Optimized Link State Routing Protocol* (OLSR) (CLAUSEN; JACQUET, 2003), representando a classe dos protocolos pró-ativos e o AOMDV, representando a classe dos protocolos reativos. Os resultados de simulações comprovaram que o protocolo AOMDV foi mais eficiente que o OLSR quanto à taxa de entrega, porém o OLSR apresentou uma sobrecarga ligeiramente menor. O trabalho afirmou ainda que devido à capacidade do protocolo AOMDV de descobrir várias rotas entre uma origem e um destino, ele é o mais eficiente para redes altamente dinâmicas, onde quebras de rotas acontecem com muita frequência, como ocorre nas VANETs.

O autor em (CHEN et al., 2009) adaptou o protocolo AOMDV para que tenha maior eficiência quando aplicado em VANETs. Além de manter as conhecidas vantagens da utilização do AOMDV, como a redução do processo de descoberta de rotas, foram realizadas modificações na forma como as rotas são selecionadas. Utilizaram-se métricas como número de saltos para o destino e retransmissões na camada MAC para selecionar a rota com maior qualidade (o número de saltos e retransmissões pode indicar qual rota é mais qualificada para enviar os dados). Resultados de simulações mostraram que o novo protocolo foi mais eficiente que o próprio AOMDV quanto à taxa de entrega e ao atraso na entrega dos pacotes de dados. Este trabalho apresentou resultados positivos, mas foi avaliado somente em redes previamente configuradas para garantir a conectividade entre os veículos, não foram consideradas as situações onde a rede pode ficar

com pouca conectividade.

O autor do estudo realizado em (TALEB et al., 2007) aponta que o maior desafio das VANETs é o desenvolvimento de protocolos de roteamento que considerem as frequentes desconexões causadas pela alta mobilidade dos veículos. Por isso propôs um protocolo de roteamento que possui informações sobre a posição, direção e velocidade, dos veículos, além de um mapa das estradas. Com estas informações é possível prever um evento de quebra de enlace antes de sua ocorrência. Resultados das simulações mostram que o protocolo é capaz de reduzir a sobrecarga de roteamento e aumentar a vazão. Porém, todos os veículos participantes da rede devem possuir um equipamento de GPS previamente instalado, tornando a rede dependente de uma infraestrutura fixa.

### 3.1 TABELA COMPARATIVA ENTRE OS TRABALHOS RELACIONADOS

Observa-se na Tabela 5 que os trabalhos relacionados são comparados quanto a utilização ou não de infraestrutura fixa para prover conectividade, a utilização de dados reais para as análises, o desenvolvimento de novos protocolos para redes com frequentes desconexões, e a utilização de métricas de conectividade para a decisão de roteamento ou outros estudos.

**Tabela 5: Tabela Comparativa Entre os Trabalhos Relacionados.**

<i>Trabalhos</i>	<i>Utiliza infraestrutura fixa?</i>	<i>Utiliza dados reais?</i>	<i>Desenvolveu novo protocolo?</i>	<i>Utiliza métricas de conectividade?</i>
(LI.; WANG, 2015)	SIM	SIM	SIM	SIM
(MOHAMMAD et al., 2014)	-	SIM	NÃO	SIM
(LIU et al., 2011)	SIM	SIM	NÃO	NÃO
(WISITPONGPHAN et al., 2007)	-	SIM	NÃO	SIM
(XU et al., 2011)	SIM	NÃO	NÃO	SIM
(VIRIYASITAVAT et al., 2009)	-	SIM	NÃO	SIM
(BARBA et al., 2012)	SIM	SIM	NÃO	NÃO
(MAOWAD; SHAA-BAN, 2012)	-	NÃO	SIM	SIM
(BISHT et al., 2012)	-	NÃO	NÃO	NÃO
(CHEN et al., 2009)	-	NÃO	SIM	SIM
(TALEB et al., 2007)	SIM	NÃO	SIM	SIM

Dentre as análises possíveis destacam-se: todos os trabalhos analisados utilizam in-

fraestrutura fixa para prover conectividade ou não fizeram proposta quanto a este tema; mais da metade dos trabalhos utilizam dados reais e métricas de conectividade; e somente quatro trabalhos desenvolveram novos protocolos. A presente pesquisa, no entanto, possui como foco a utilização de infraestrutura móvel para prover conectividade, a utilização de dados reais para as análises e o desenvolvimento de novos protocolos que considerem a infraestrutura móvel (métrica de conectividade) para a decisão de roteamento.

## 4 REDE DE TRANSPORTE DE DADOS AD HOC MÓVEL (BMVA)

O BMVA possui como objetivo o fornecimento de infraestrutura e conectividade para rede, auxiliando a entrega das mensagens em uma determinada região. Ele é formado pelos ônibus do transporte coletivo urbano que circulam por vias expressas e exclusivas. Em ambientes urbanos existem basicamente veículos particulares, veículos de transporte pesado e veículos de transporte coletivo (ônibus). Entre estes, os veículos de transporte coletivo apresentam um comportamento de tráfego diferenciado em relação aos demais veículos. Em particular, na cidade de Curitiba, os ônibus pertencentes às linhas expressas trafegam por canaletas exclusivas, segundo um escalonamento relativamente regular, em um trajeto linear praticamente sem obstáculos. Estas características sugerem que um sistema que faz uso destes ônibus para a criação de uma infraestrutura de comunicação apresentará um desempenho superior quando comparado a um sistema que não faz distinção entre veículos.

É desejável que os ônibus que compõe o BMVA permaneçam conectados o maior tempo possível. A conectividade é determinada, entre outros fatores, pela quantidade de linhas que circulam em uma determinada via. Uma linha isolada pode não possuir o grau de conectividade mínimo requerido para o funcionamento da rede, por isso deve-se considerar também o uso de linhas superpostas, ou seja, considerar várias linhas de ônibus operando sobre uma mesma via ao mesmo tempo. As investigações sobre a conectividade são realizadas por análises estatísticas aplicadas em dados reais dos registros de mobilidade do transporte urbano da cidade de Curitiba, além de avaliações através de simulações e modelos analíticos.

### 4.1 REDE DE TRANSPORTE COLETIVO URBANO

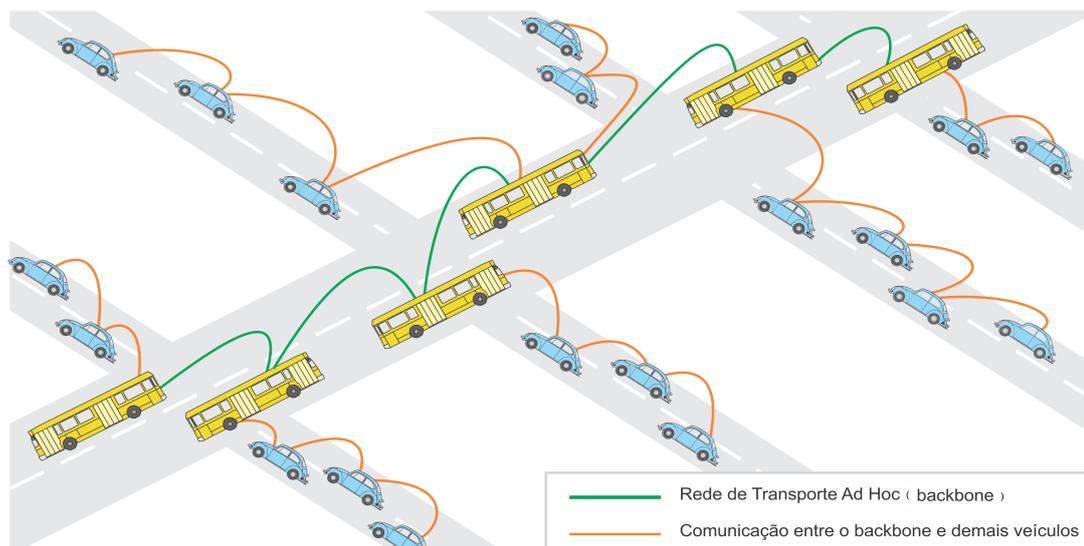
Uma rede de transporte coletivo urbano é um conjunto interligado de rotas ou vias onde circulam ônibus que transportam passageiros. Nestas redes, podem existir diversos tipos de ônibus e vias. Os ônibus são basicamente classificados pela capacidade de transporte e tipo de combustível. E as vias podem ser classificadas pela velocidade máxima permitida, número de pistas, direção dos deslocamentos e por serem exclusivas ou compartilhadas. A rede de

transporte coletivo urbano de Curitiba possui os mais diversos tipos de ônibus e vias, sendo as vias exclusivas e expressas as de maior expressão. São 185 ônibus expressos e 81 quilômetros de vias exclusivas que possuem duplo sentido, permitem ultrapassagem, estão localizadas no corredor central das grandes avenidas e ligam os principais bairros ao centro da cidade (URBS, 2015).

Esta rede de transporte é utilizada por 85% da população, integrando toda a cidade e mais 14 municípios da região metropolitana. Seu sucesso serviu de inspiração para muitos sistemas de transportes coletivos semelhantes implantados ao redor do mundo, como por exemplo o *Transantiago em Santiago* (Chile), o *Orange Line de Los Angeles* (Estados Unidos) entre outros (URBS, 2015).

#### 4.2 REDE DE TRANSPORTE DE DADOS PROPOSTA

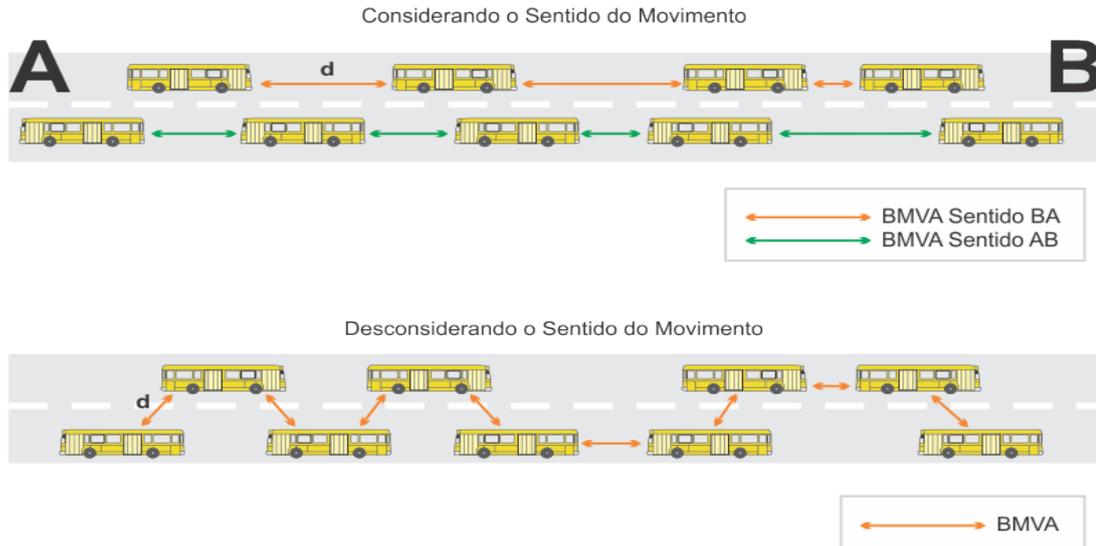
A rede de transporte de dados proposta neste trabalho é formada pelos ônibus que estão em frequente movimento por toda extensão das vias expressas, sendo desta forma independente de infraestrutura fixa. Esta rede além de permitir a troca de informações entre os próprios ônibus, busca a troca de informações entre veículos separados por até dezenas de quilômetros. A Figura 8 ilustra a topologia da rede.



**Figura 8: Topologia da rede de transporte de dados.**

A rede de transporte de dados pode ser formada considerando-se ou não o sentido dos movimentos dos ônibus. Conforme ilustrado pela Figura 9, quando considera-se o sentido, a comunicação ocorre somente entre os ônibus que seguem a mesma orientação (somente sentido

AB ou somente sentido BA), porém quando desconsidera-se o sentido, a comunicação ocorre independente da orientação.



**Figura 9: Rede de transporte de dados considerando ou desconsiderando o sentido dos movimentos dos ônibus.**

Para que a rede de transporte de dados possa ser utilizada para a comunicação entre veículos distantes, os ônibus que a compõe devem permanecer conectados durante o maior tempo possível. Nas VANETs, os veículos se comunicam uns com os outros através de sinais de radiofrequência. As regras para que esta comunicação ocorra são definidas pelo padrão IEEE802.11p (IEEE, 2007). Tal padrão determina que a distância máxima de transmissão entre os nós, na ausência de obstáculos, é de mil metros (1000m). Desta forma, para que os ônibus do BMVA permaneçam conectados, eles deveriam permanecer a uma distância menor ou igual ao raio de transmissão do sistema sem fio, uns dos outros, durante todo o tempo de circulação e em toda extensão da via.

#### 4.3 A CONECTIVIDADE DA REDE

A conectividade é determinada por fatores como o número de linhas de ônibus que estão circulando em um determinado ambiente, horário de circulação, maneira como os ônibus estão distribuídos nas vias, raio de transmissão dos sinais de radiofrequência e distância inter-veicular. Uma *linha de ônibus* consiste basicamente de diferentes ônibus que percorrem a mesma trajetória (cada qual com escalonamento temporal próprio). A *distância inter-veicular* ( $d$ ) é definida como a distância, em quilômetros, entre um certo veículo (ônibus) e seu vizinho mais próximo. Uma quantidade fundamental corresponde ao *grau de conectividade* da

rede. O grau de conectividade ( $g_c$ ) é definido como o percentual de tempo onde a distância inter-veicular assume valor menor ou igual ao raio de transmissão ( $r$ ) do sistema sem fio, e é formalmente definido pela Equação 1

$$g_c \triangleq P[d \leq r], \quad (1)$$

onde  $P$  [...] corresponde a probabilidade de um evento.

É importante que o grau de conectividade se mantenha elevado para que o BMVA possa prover infraestrutura e conectividade para rede (valores acima de 95% são desejados).

Para avaliar a conectividade dos ônibus no BMVA foram realizados estudos experimentais, analíticos e simulados. Os estudos experimentais e analíticos compreendem análises estatísticas da distância inter-veicular e a caracterização da distribuição de probabilidade. Os estudos de simulação por sua vez estão relacionados a reprodução dos dados experimentais com o uso de um software gerador de mobilidade veicular e um simulador de rede.

#### 4.3.1 CARACTERIZAÇÃO DA DISTÂNCIA INTER-VEICULAR

Observações dos registros de mobilidade da rede de transporte coletivo urbano da cidade de Curitiba foram realizadas por cinco dias úteis consecutivos em fevereiro de 2014. A Companhia de Urbanização da Cidade de Curitiba (URBS) forneceu acesso às informações sobre as coordenadas geográficas de todos os ônibus durante todo o período de observação. Com estas observações foi possível realizar os estudos experimentais e analíticos e notar que à medida que cresce o número de linhas que circulam na via reduz-se a distância inter-veicular média e aumenta-se o grau de conectividade entre os ônibus do BMVA. A partir de três linhas trafegando na via, a distância inter-veicular média entre os ônibus pode ficar abaixo dos 300 metros e o grau de conectividade pode passar dos 98% (considerando um raio de transmissão de 1km). Os Apêndices A e B fornecem informações detalhadas sobre os estudos experimentais e analíticos.

Para encontrar a distribuição de probabilidade que melhor caracteriza a distância inter-veicular, foram realizadas análises numéricas de aproximação de distribuições de probabilidade conhecidas em relação aos dados reais capturados. Para isso, histogramas normalizados para a distância inter-veicular, apresentados no Apêndice A, foram comparados a diversas distribuições de probabilidade conhecidas na literatura ajustadas aos dados reais, como a distribuição Gama, Lognormal, Normal, Weibull, etc (MEYER, 1999; BUSSAB; MORETTIN, 2006; JAIN, 1991). O estimador da máxima verossimilhança (*Maximum Likelihood Estima-*

tion) (MEYER, 1999; BUSSAB; MORETTIN, 2006; JAIN, 1991) foi utilizado para eleger os parâmetros das distribuições.

Para determinar a distribuição mais adequada, realizou-se uma avaliação de hipóteses por meio do teste chi-quadrado de Pearson (TAYLOR, 1997). Os resultados obtidos indicam que a distribuição de Weibull não pode ser rejeitada, podendo caracterizar analiticamente a distância inter-veicular (ver Apêndice B). Tal distribuição é formalmente definida pela função densidade de probabilidade da Equação 2

$$f(x) = \frac{\alpha}{\beta} \left(\frac{x}{\beta}\right)^{\alpha-1} \exp\left(-\left(\frac{x}{\beta}\right)^{\alpha}\right), x \geq 0, \quad (2)$$

onde  $\alpha$  é o parâmetro contínuo de forma ( $\alpha > 0$ ) e  $\beta$  é o parâmetro contínuo de escala ( $\beta > 0$ ).

A média e a variância associadas com esta distribuição são dadas por:

$$\mu_d = \beta \cdot \Gamma(1 + 1/\alpha), \quad (3)$$

$$\sigma_d^2 = \beta^2 \cdot [\Gamma(1 + 2/\alpha) - \Gamma^2(1 + 1/\alpha)], \quad (4)$$

onde  $\Gamma(\cdot)$  é a função *Gama*.

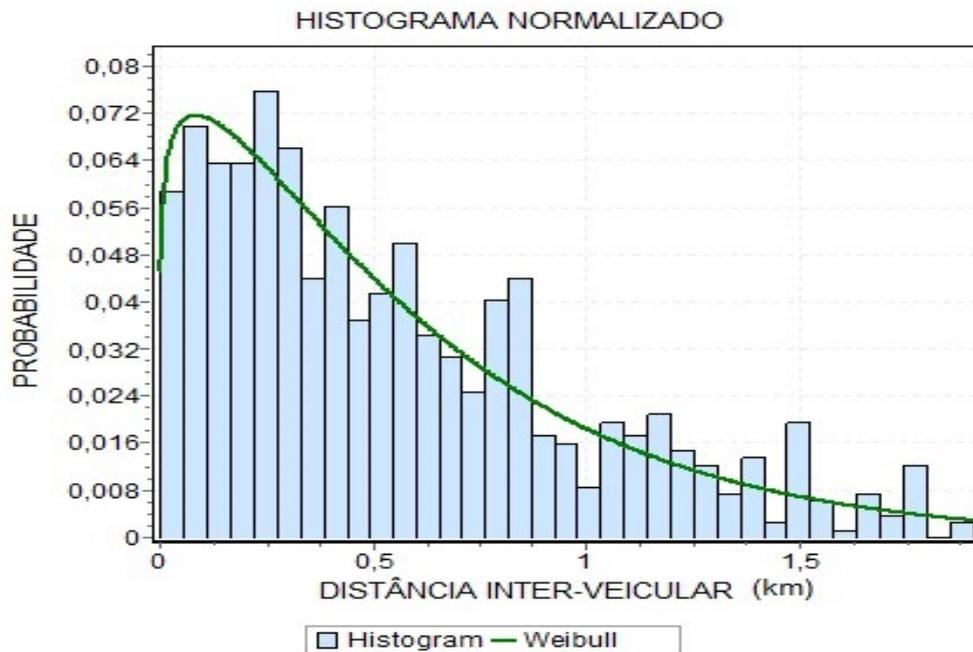
A título de exemplo, a Figura 10 mostra um histograma representativo ajustado para a distribuição Weibull. Este histograma considera uma única linha de ônibus viajando na Área 1 (ver Apêndice A ) durante a faixa de horário das 16h31m às 19h30m.

A Tabela 6 apresenta os resultados relacionados ao teste chi-quadrado de Pearson para o conjunto de distribuições que mais se assemelham ao formato do histograma apresentado. Com base nos valores da tabela conclui-se que a distribuição de Weibull não pode ser rejeitada ao nível de significância de 1%.

**Tabela 6: Resultados do *chi-square* teste, considerando quatro distribuições de probabilidade.**

Distribuições	Parâmetros		P-value
Exponential	–	$\lambda = 1.804$	0.003
Lognormal	$\mu = -1.019$	$\sigma = 1.126$	1.4e-11
Gama	$\alpha = 1.634$	$\beta = 0.339$	1.1e-5
Weibull	$\alpha = 1.121$	$\beta = 0.601$	0.012

Observa-se também que a distribuição exponencial representa a hipótese mais simples e comumente considerada na literatura (BETTSTETTER, 2002). Porém, esta hipótese não consegue prever o comportamento da distância inter-veicular porque ela assume que as distâncias

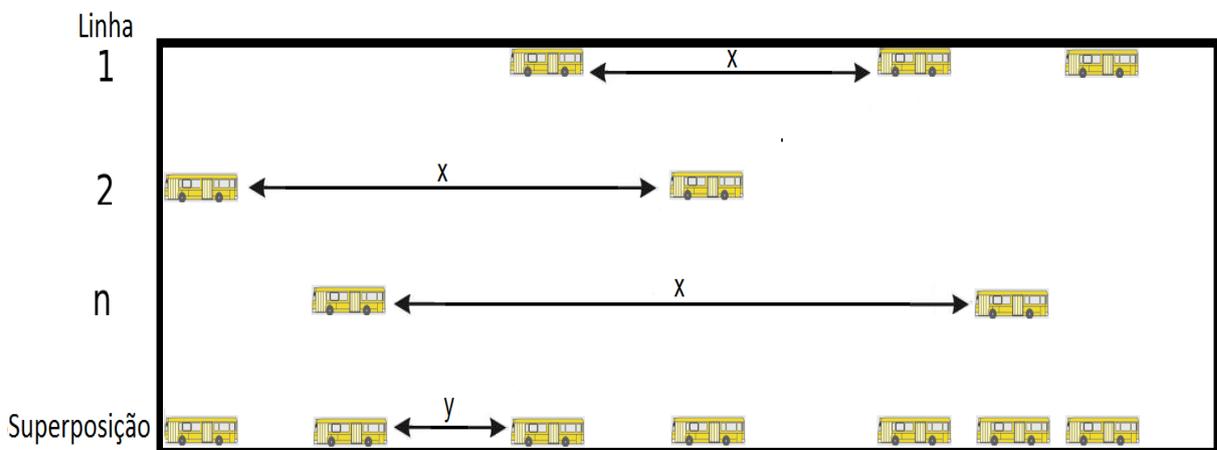


**Figura 10: Histograma normalizado para a distância inter-veicular com uma linha na faixa de horário das 16h31m às 19h30m.**

seguem um processo de Poisson, ao passo que este não é o caso no tráfego de veículos.

#### 4.3.2 SUPERPOSIÇÃO DE LINHAS

Uma linha isolada pode não possuir o grau de conectividade mínimo requerido para o funcionamento da rede. Desta forma, deve-se considerar o uso de linhas superpostas. A superposição ocorre quando  $n$  linhas de ônibus operam sobre uma mesma via ao mesmo tempo. A Figura 11 ilustra tal situação.



**Figura 11: Superposição de linhas de ônibus.**

Para caracterizar a situação, seja um processo estocástico que registra as distâncias

inter-veiculares associadas a uma determinada linha de ônibus  $i$ , onde  $i=1\dots n$ . Cada distância inter-veicular é independentemente distribuída de acordo com uma função de distribuição de probabilidade não negativa  $F_{X_i}(x) = P[X_i \leq x], x \geq 0$ .

A distribuição das distâncias inter-veiculares da superposição dos processos individuais pode ser derivada analiticamente, como segue. Considerando  $Y$  uma variável aleatória não negativa que caracteriza a distância inter-veicular no processo de sobreposição (Figura 11), pode-se escrever (veja a validação desta proposição no Apêndice C):

$$Y = \min(X_1, X_2, \dots, X_n), \text{ assim :} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} F_Y(y) &= P[Y \leq y] \\ &= P[\min(X_1, X_2, \dots, X_n) \leq y] \\ &= P[(X_1 \leq y) \cup (X_2 \leq y) \cup \dots \cup (X_n \leq y)] \\ &= 1 - [1 - F_{X_1}(y)] \dots [1 - F_{X_n}(y)]. \end{aligned} \quad (6)$$

Considerando a distribuição de Weibull com parâmetros  $\alpha_i$  e  $\beta_i$  para cada processo individual, encontra-se:

$$\begin{aligned} F_Y(y) &= 1 - [\exp\{-(\frac{y}{\beta_1})^{\alpha_1}\}] \dots [\exp\{-(\frac{y}{\beta_n})^{\alpha_n}\}] \\ &= 1 - \exp\{-\sum_{i=1}^n (\frac{y}{\beta_i})^{\alpha_i}\}. \end{aligned} \quad (7)$$

No caso em que todas as distribuições são idênticas, obtém-se:

$$F_Y(y) = 1 - \exp\{-n[\frac{y}{\beta}]^\alpha\}. \quad (8)$$

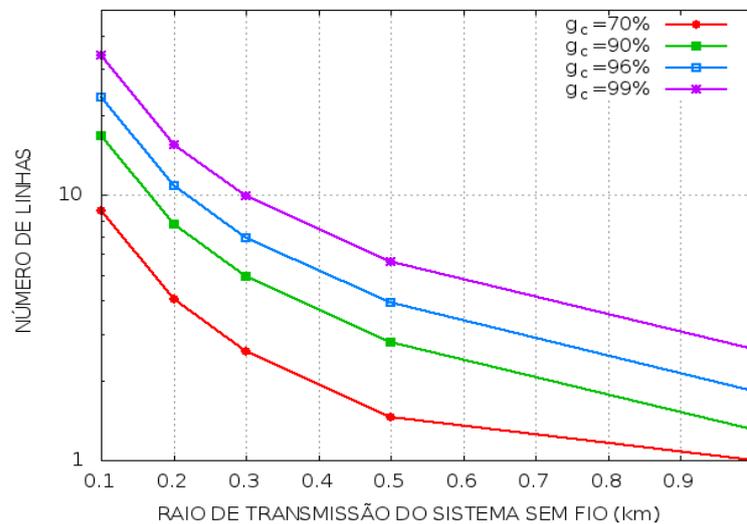
Trata-se de uma nova distribuição de Weibull onde o parâmetro de escala passa a valer  $\beta' = \frac{\beta}{n^{\frac{1}{\alpha}}}$ . Além disso, a média e a variância da distância inter-veicular para o processo final, são  $\bar{Y} = \frac{\bar{X}}{n^{\frac{1}{\alpha}}}$  e  $\sigma_Y^2 = \frac{\sigma_X^2}{n^{\frac{2}{\alpha}}}$  respectivamente.

Com este resultado pode-se determinar analiticamente o número de linhas que se faz necessário para obter um certo grau de conectividade de acordo com o raio de transmissão do sistema sem fio:

$$\begin{aligned} g_c &= P[Y \leq r] = F_Y(r), \\ g_c &= 1 - \exp\{-n[\frac{r}{\beta}]^\alpha\}, \end{aligned}$$

$$n \geq -\left(\frac{\beta}{r}\right)^\alpha \ln(1 - g_c). \quad (9)$$

A Figura 12 exibe o número de linhas necessárias para se obter 70%, 90%, 96% e 99% de conectividade com o raio de transmissão do sistema sem fio em 0,1, 0,2, 0,3, 0,5 e 1 quilômetro, considerando  $\beta = 0,60$ ,  $\alpha = 1,11$  (dados da linha 550). Nota-se nesta figura que à medida que cresce o número de linhas pode-se reduzir o raio de transmissão. Com o grau de conectividade em 70%, são necessárias 3 linhas para o raio de transmissão do sistema sem fio em 0,3 km. Para obter-se um maior grau de conectividade é necessário um número maior de linhas, aproximadamente 7 linhas para alcançar 96% com o mesmo raio de 0,3 km. Aumentando-se o raio para 1 km, é necessário aproximadamente uma linha para atingir um grau de conectividade de 70% e 3 linhas para 99%.



**Figura 12:** Número de linhas necessárias para obter um determinado grau de conectividade de acordo com o raio de transmissão do sistema sem fio.

#### 4.4 VALIDAÇÃO DO BMVA UTILIZANDO UM SIMULADOR DE MOVIMENTOS

Validar o BMVA utilizando um simulador de movimentos veiculares incide em criar um ambiente para simulações dos movimentos dos ônibus que retrate a realidade observada nos estudos experimentais quanto à distância inter-veicular e a conectividade no BMVA. Para isso, utiliza-se um software gerador de mobilidade veicular parametrizado com informações obtidas dos dados reais. O software utilizado é o VanetMobiSim versão 1.1 (VANETMOBISIM, 2015).

#### 4.4.1 AMBIENTE DE SIMULAÇÃO

Os movimentos dos ônibus que trafegam por vias exclusivas e expressas seguem um determinado padrão, o qual é definido pela topologia da via, horário de circulação e número de linhas. Nas simulações realizadas neste trabalho, criaram-se ambientes que procuram refletir o comportamento real dos ônibus expressos. Para isso, foram considerados quatro casos diferentes, com base nos grupos de horários propostos pela URBS (URBS, 2015). Em cada faixa horária definiu-se a mesma quantidade de ônibus por quilômetro (densidade) observada no cenário real com 3 linhas e atribui-se para cada um desses ônibus uma via exclusiva na qual ele pode se movimentar. Ainda, a velocidade máxima, média, número de semáforos e tempo de parada nos mesmos foram capturados dos dados reais. A Tabela 7 apresenta um resumo dos parâmetros utilizados nas simulações.

**Tabela 7: Parâmetros utilizados para simulação.**

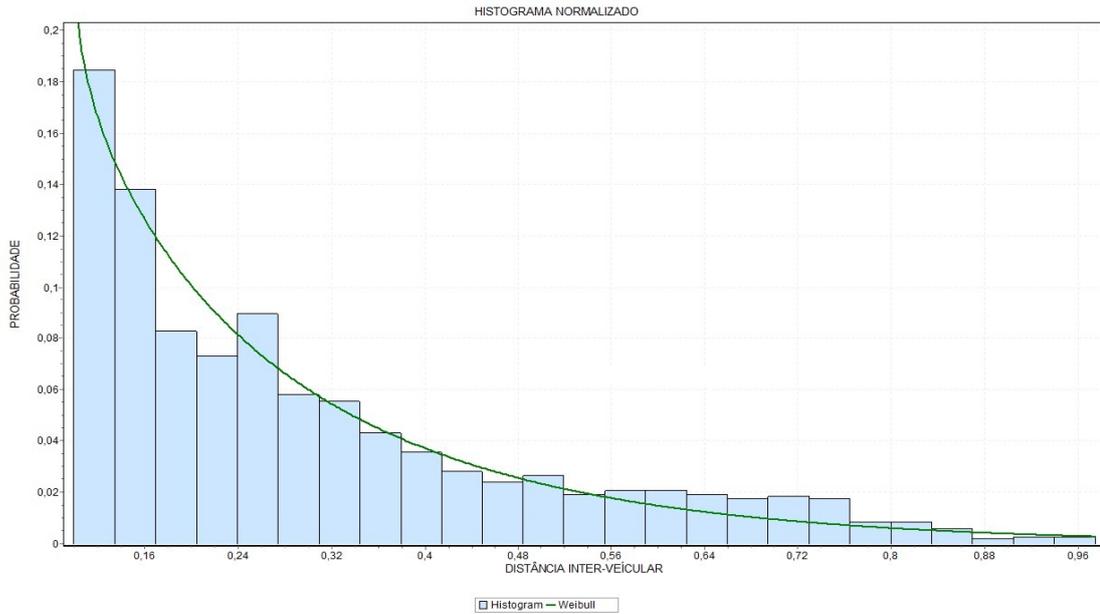
<b>Parâmetros</b>	<b>Valores(s)</b>
Casos (faixas horárias)	05h:30m às 08h:30m (1); 08h:31m às 16h:30 (2); 16h:31m às 19h:30m (3); 19h:31m às 23h:59m (4)
Extensão da via (km)	2 X 0,1
Densidade (ônibus/km) por faixa horária	3; 2,2; 3,4; 1,8
Velocidade máxima (km/h) por faixa horária	51; 53; 50; 54
Número de semáforos	5
Tempo de parada dos semáforos	20s
Tempo de simulação	600s

Na Tabela 7 observa-se, por exemplo, que na faixa horária 1 realizaram-se simulações em uma via com 2 km de comprimento e 0,1 km de largura, com 3 ônibus por km. Neste horário, os ônibus podem alcançar uma velocidade máxima de 51 km por hora e estão sujeitos a 5 semáforos com tempo de parada de 20 segundos. É importante salientar que o tempo de parada nos semáforos dos ônibus expressos é baixo, pois eles possuem um sistema que sincroniza a abertura e o fechamento para minimizar o tempo de parada.

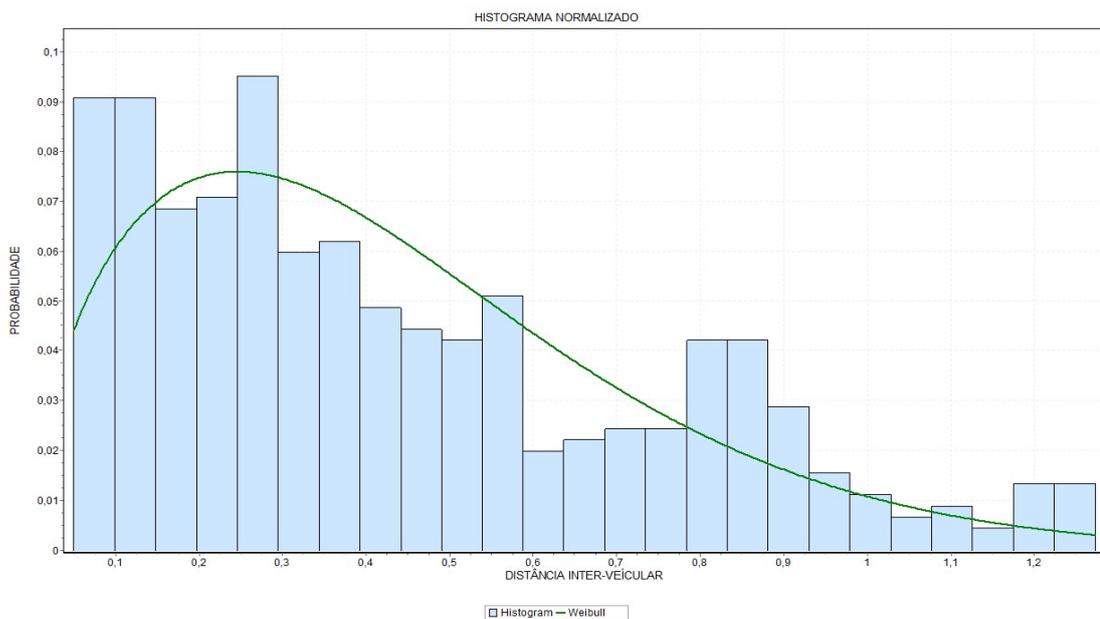
#### 4.4.2 RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

As simulações realizadas foram avaliadas com base na distância inter-veicular. Assim, é possível verificar em todas as avaliações (Figuras 13, 14, 15, 16) que os histogramas normalizados possuem características semelhantes aos apresentados nos estudos experimentais (ver Apêndices A.1, A.2 e A.3). Além disso, as distâncias inter-veiculares concentram-se abaixo de um quilômetro. No pior caso (Figura 14) menos de 5% das distâncias inter-veiculares são maio-

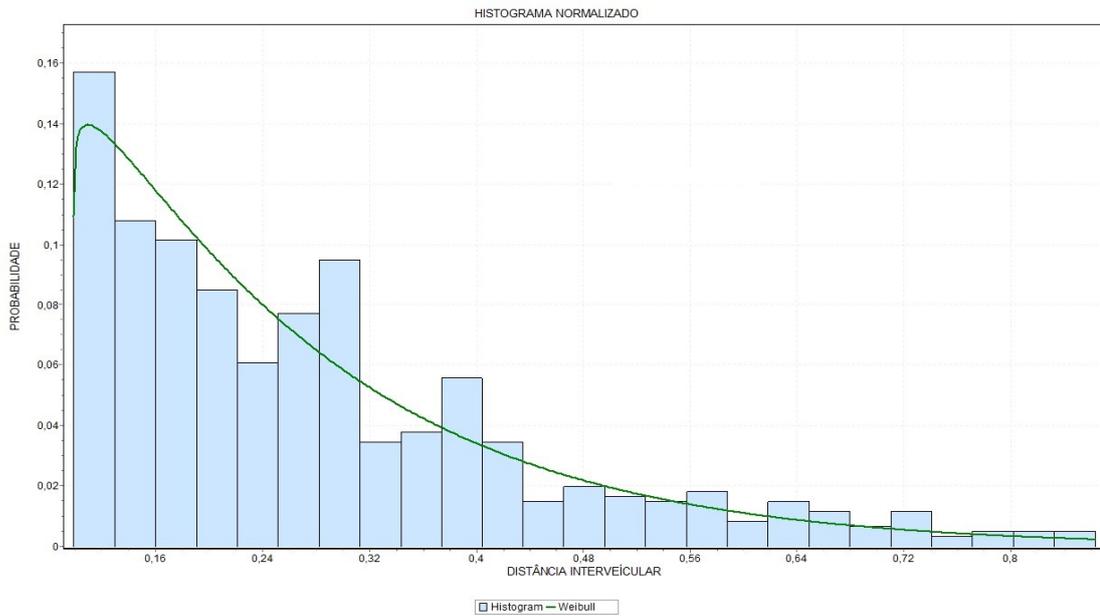
res do que um quilômetro. Desta forma, verifica-se que é possível criar ambientes de simulação que reproduzam as características observadas nos estudos experimentais e que mantenham um grau de conectividade necessário para garantir o funcionamento do BMVA. A Tabela 8 apresenta os cálculos para a média e variância das distâncias inter-veiculares e para o grau de conectividade. Além disso, uma avaliação sobre o impacto no desempenho em comunicação obtida pelo uso do BMVA, pode ser observada no Apêndice D.



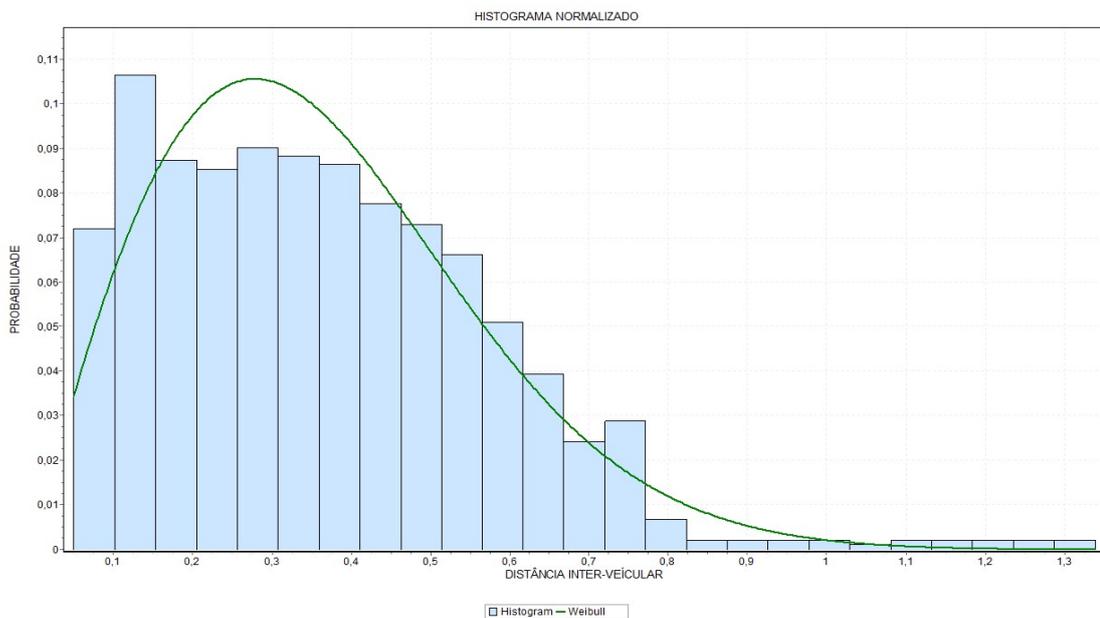
**Figura 13: Histograma normalizado para a distância inter-veicular para a faixa de horário (1).**



**Figura 14: Histograma normalizado para a distância inter-veicular para a faixa de horário (2).**



**Figura 15: Histograma normalizado para a distância inter-veicular para a faixa de horário (3).**



**Figura 16: Histograma normalizado para a distância inter-veicular para a faixa de horário (4).**

Neste capítulo ficou demonstrado que o BMVA possui conectividade e pode prover infraestrutura para rede. Assim, dada à conectividade intrínseca do BMVA, ele deve ser reconhecido e explorado (utilizado com a maior frequência possível) pelos protocolos de roteamento clássicos. Nesse sentido, novos protocolos de roteamento que se integram ao BMVA são propostos. Para a construção destes novos protocolos, três diferentes protocolos clássicos foram modificados, entre eles dois reativos (um de caminho único (AODV) e outro de multicaminhos

**Tabela 8: Resultado da Média, Variância e o Grau de conectividade.**

<b>Cenário</b>	<b>Média (km)</b>	<b>Variância (km<sup>2</sup>)</b>	<b>Grau de conectividade (%)</b>
Faixa horária 1	0,308	0,049	100,00
Faixa horária 2	0,435	0,083	95,13
Faixa horária 3	0,284	0,031	100,00
Faixa horária 4	0,362	0,038	99,53

(AOMDV)) e um proativo (DSDV). Estes protocolos foram selecionados porque possuem características técnicas que vão ao encontro dos objetivos deste estudo, tais como: são topológicos; foram projetados para redes V2V; e formam uma completa integração de tecnologia entre protocolos de roteamento que não dependem de infraestrutura fixa e o BMVA. Além disso, já foram amplamente estudados e são bem aceitos pela comunidade científica.

## 5 O PROTOCOLO P-AODV

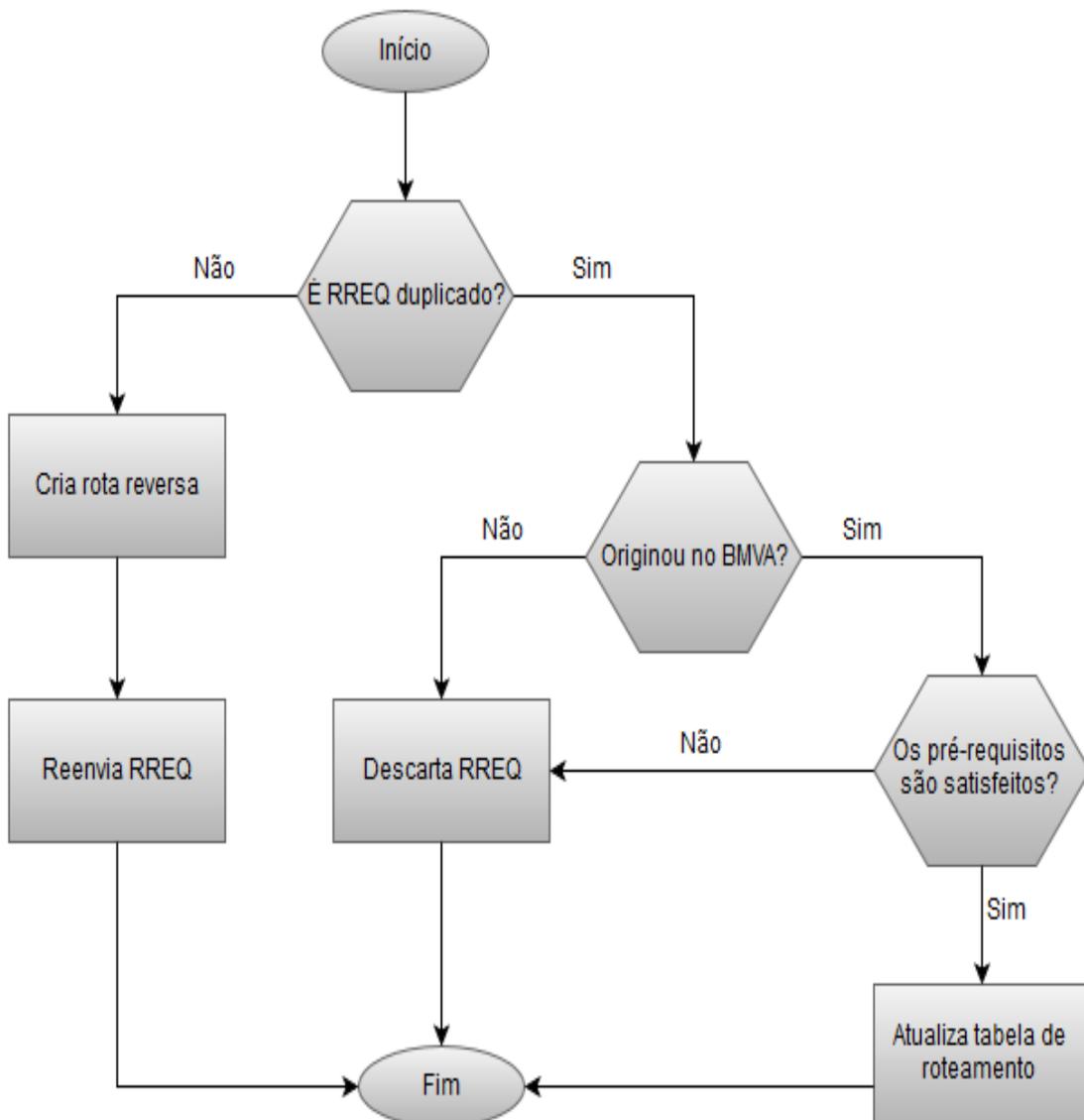
O *Priority Ad Hoc On-Demand Distance Vector* (P-AODV) é uma modificação do protocolo AODV, e seu funcionamento é simples. Ele foi desenvolvido para atuar em conjunto com o BMVA no momento em que os nós estão descobrindo as rotas, possuindo assim a capacidade de construí-las priorizando os nós (ônibus expressos) pertencentes ao BMVA e, como consequência, fazendo com que as mensagens de dados trafeguem sempre que possível pelo *backbone*, onde a conectividade é elevada. A modificação foi realizada essencialmente no processo de descoberta de rotas do AODV.

O AODV é um protocolo que atua sob demanda, isto é, descobre rotas somente quando elas são realmente necessárias. O AODV constrói rotas através de mensagens de requisição de rotas *Route Request* (RREQ) e respostas de rota *Route Reply* (RREP). Quando um nó necessita enviar uma mensagem para outro do qual ele ainda não conhece a rota, uma mensagem de *Route Request* é enviada em *broadcast*. Cada nó que recebe esta mensagem pode enviar uma mensagem de *Route Reply* para a origem se ele é o destinatário ou se ele conhece uma rota para o destino. Caso contrário, a mensagem é reencaminhada. Mensagens de *reply* são enviadas em *unicast* pelo caminho reverso criado pela mensagem de *Route Request* (PERKINS; ROYER, 1999).

### 5.1 PROCESSO DE DESCOBRIMENTO DE ROTAS DO P-AODV

A origem inicia um processo de descoberta de rota enviando uma mensagem de RREQ em *broadcast*. A partir do momento que o RREQ é enviado para a rede toda, um nó pode receber várias cópias dele. Comumente, apenas o primeiro RREQ é usado para formar rotas inversas entre o nó que recebeu o RREQ e a origem, as cópias duplicadas que chegam depois, são simplesmente descartadas. No P-AODV, todas as cópias duplicadas são examinadas e algumas podem ser utilizadas para formar caminhos alternativos que priorizem o BMVA. De acordo com o Fluxograma apresentado na Figura 17, quando um nó intermediário recebe uma mensagem de RREQ, ele verifica se ela é duplicada, ou seja, se possui o mesmo endereço de origem e identi-

ficador de *broadcast* de uma mensagem já recebida. Caso a mensagem não seja duplicada, o nó que recebeu o RREQ atualiza sua tabela de roteamento, tendo o nó que o enviou como próximo salto do caminho inverso (cria rota reversa) e reencaminha a mensagem na rede. No caso do RREQ ser duplicado, o nó intermediário verifica se a origem do RREQ é um nó pertencente ao BMVA. Caso se confirme, ele verifica se os pré-requisitos são satisfeitos e atualiza sua tabela de roteamento (exclui a rota antiga e cria a rota nova), tendo o nó que originou o RREQ (nó pertencente ao BMVA) como próximo salto do caminho inverso. A partir deste momento, um nó do BMVA que não participaria da rota passa a fazer parte dela. Caso o RREQ não tenha sido originado pelo BMVA ou os pré-requisitos não sejam satisfeitos, ele é descartado. Este processo faz com que sejam formadas rotas com o maior número possível de nós pertencentes ao BMVA.

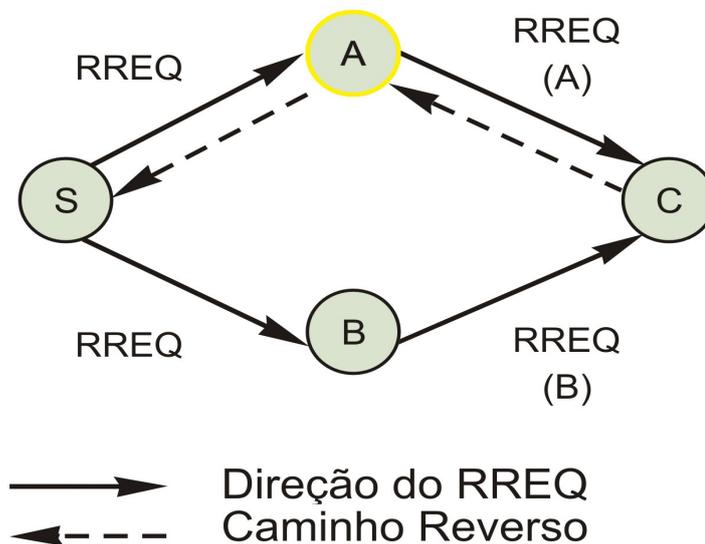


**Figura 17: Fluxograma do processo de descobrimento de rotas do P-AODV.**

A rota somente é atualizada para um nó pertencente ao BMVA caso satisfaça aos seguintes pré-requisitos:

- Preserve a liberdade de laço;
- Seja atual;
- Tenha uma quantidade menor ou igual de nós intermediários;

No exemplo da Figura 18, considera-se S, B e C como nós comuns e A como um nó do BMVA. O nó S transmite um pacote de RREQ em seu raio de alcance. Quando os nós A e B recebem o pacote de RREQ, verificam em sua tabela de roteamento se existe um caminho válido para o destino solicitado nesta mensagem. Como não existe, A e B criam em suas tabelas de roteamento os caminhos inversos (A-S) e (B-S) e retransmitem os pacotes de RREQ. O pacote enviado via nó A é representado por RREQ(A) e o enviado via nó B é representado por RREQ(B). O nó C recebe primeiro o pacote RREQ(B) e cria em sua tabela de roteamento a rota reversa (C-B-S) e retransmite o RREQ(B). Em seguida, recebe o pacote RREQ(A) vindo de um nó do BMVA. Neste momento, C atualiza sua tabela de roteamento com a rota reversa (C-A-S).



**Figura 18: Criando caminhos que priorizam o BMVA**

O Algoritmo 1 descreve em pseudocódigo o processo completo de recebimento de uma mensagem de RREQ pelo P-AODV.

---

**Algorithm 1 - P-AODV**


---

```

1: Entrada:
2: index = Nó Atual.
3: src_rreq = Nó que originou o RREQ.
4: broadcat_id = Identificador de broadcast do RREQ.
5: rreq = Mensagem RREQ.
6: dst = Nó de destino.
7: src = Nó de origem.
8: src_seqno = Número de sequência da origem.
9: rt_seqno = Número de sequência da rota existente na tabela.
10: rq_hop_count = Número de saltos do RREQ.
11: rt_hops = Número de saltos da rota existente na tabela.
12: procedure RECEBERREQ
13:   if (src_rreq == index) then
14:     descartaRreq(rreq); ▷ Descarta a mensagem de RREQ se foi originado por este nó.
15:     return;
16:   end if
17:   if (rotaExistente(src) == false) then           ▷ Verifica se existe rota na tabela.
18:     adicionaRota(src, src_rreq); ▷ Adiciona na tabela de rotas o caminho inverso, tendo
o nó que originou a RREQ como próximo salto e a origem como destino.
19:   end if
20:   if (procuraID(src, broadcat_id) == true) then     ▷ Verifica se o RREQ é duplicado.
21:     if (verificaBMVA(src_rreq) == true) then       ▷ Verifica se o RREQ originou no
BMVA.
22:       if ((src_seqno == rt_seqno) and (rq_hop_count <= rt_hops)) then ▷ Verifica
se é a rota atual e se possui quantidade de saltos menor ou igual a da rota existente.
23:         atualizaTabelaRoteamento(src, src_rreq) ▷ Atualiza a tabela de roteamento
com o nó do BMVA como próximo no caminho inverso.
24:       end if
25:     else
26:       descartaRreq(rreq);           ▷ Descarta o RREQ se não originou-se do BMVA.
27:       return;
28:     end if
29:   end if
30:   if (verificaDestino(dst, index) == true) then     ▷ Verifica se é o destino.
31:     sendReply(src, index)           ▷ Envia a mensagem de RREP em unicast pelo caminho
inverso criado pela mensagem de RREQ.
32:   else if (verificaRota(dst, index, rt_seqno, src_seqno) == true) then ▷ Verifica se possui
uma rota atual.
33:     sendReply(src, index)           ▷ Envia a mensagem de RREP.
34:   else
35:
36:     forwardRREQ(src, index)         ▷ Reencaminha a mensagem de RREQ.
37:   end if
38: end procedure

```

---

## 5.2 AVALIAÇÃO DO P-AODV UTILIZANDO SIMULADOR DE REDE

A avaliação do P-AODV utilizando um simulador de rede (o *Network Simulator* (NS) versão 2.35 (NS2, 2015)) consiste em verificar o quanto o conjunto P-AODV/BMVA pode melhorar métricas como a taxa de entrega, a vazão, e a sobrecarga de roteamento (Seção 5.2.2). As métricas são selecionadas de acordo com o que se deseja medir e com as características do protocolo. Neste caso, o objetivo é medir o quanto o P-AODV/BMVA pode melhorar métricas relacionadas ao desempenho da rede. Os cenários considerados para as avaliações procuram criar ambientes com influência direta na conectividade e no desempenho (Seção 5.2.1), por isso optou-se por realizar variações no número de veículos e no alcance dos sinais de radio-frequência. As avaliações são feitas por meio de comparações entre as seguintes situações:

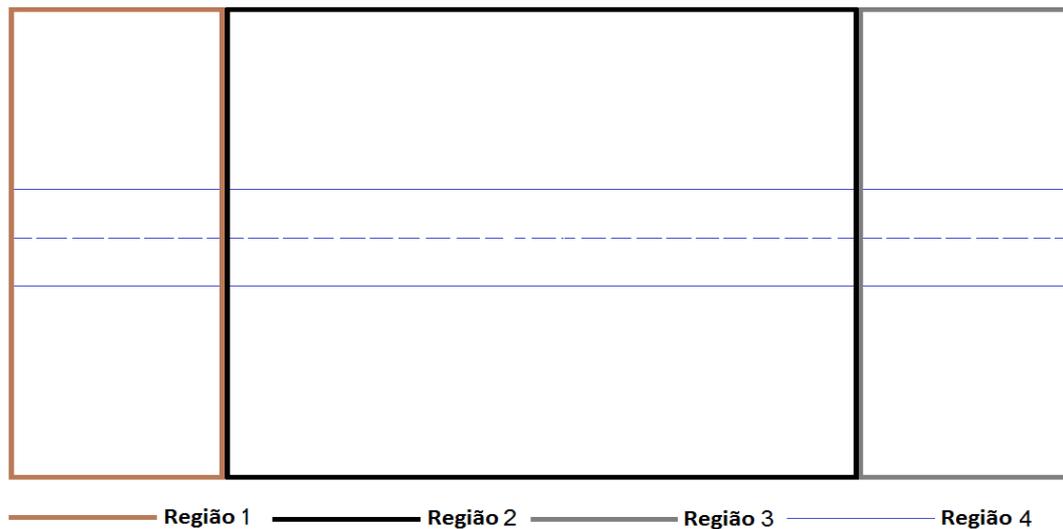
- Sem o BMVA e com o AODV original (sem BMVA);
- Com o BMVA e com o AODV original (com BMVA);
- Com o BMVA e com o P-AODV (com BMVA e P-AODV).

Quando realiza-se comparações entre as situações sem BMVA e com BMVA, espera-se que as situações com BMVA apresentem um melhor desempenho. Quando realiza-se comparações entre as situações com BMVA e com BMVA e P-AODV, espera-se que as situações com BMVA e P-AODV apresentem um desempenho superior.

### 5.2.1 AMBIENTE DE SIMULAÇÃO

As simulações de rede buscam examinar a proposta em dois cenários. Conforme ilustrado pela Figura 19, em ambos os cenários a rede criada é uma área retangular de 4000m x 1000m dividida em quatro regiões: 1, 2, 3 e 4, onde a região 4 representa as vias expressas do BMVA. No cenário 1, existem cinco veículos distribuídos na região 1 e cinco veículos na região 3, além de 10, 20, 30, 40, 50 ou 60 veículos distribuídos por todo o ambiente de simulação (regiões 1, 2, 3). Os veículos da região 1 se comunicam aleatoriamente com os veículos da região 3, fazendo com que as mensagens passem necessariamente pelas regiões 2 e 4. Neste cenário, os veículos comuns transmitem seus sinais de rádio-frequência em um raio de 500m e os ônibus do BMVA em um raio de 1000m. Desta forma, o grau de conectividade para a rede em questão é  $g_c = 99\%$ .

No cenário 2, a rede é a mesma, porém com 20 ou 40 veículos distribuídos nas regiões 1, 2 e 3. Neste novo cenário, os veículos comuns transmitem seus sinais de rádio-frequência em



**Figura 19: Topologia do cenário de simulação.**

um raio de 300m, 500m, 750m e 1000m e os ônibus do BMVA em um raio de 1000m. Nos cenários 1 e 2 foram realizadas simulações sem o BMVA, com o BMVA e com o BMVA em conjunto com o P-AODV. Nas simulações onde o BMVA é utilizado, ele é configurado com uma densidade de 3,4 ônibus/km. Além disso, em ambos os cenários, todos os veículos se deslocam seguindo o modelo de movimentação estabelecido pelo VanetMobiSim, com velocidades de até 54 km/h. O padrão de tráfego consiste de conexões com taxa de bits constante (CBR) considerando o protocolo UDP. O modelo de propagação de rádio é o *twoRay ground* (GAST, 2002), enquanto as camadas PHY/MAC seguem as especificações IEEE 802.11p (IEEE, 2007). As simulações são realizadas por 600 segundos e todos os resultados apresentados são médias de 35 simulações com o mesmo modelo de tráfego, mas com diferentes cenários de mobilidade. Para estas simulações o intervalo de confiança considerado é de 95%. Os parâmetros configurados nas simulações estão resumidos na Tabela 16.

### 5.2.2 MÉTRICAS

O sistema foi avaliado com base nas seguintes métricas:

- *Taxa de entrega dos pacotes (TEP)*: é a razão entre os pacotes de dados entregues ao destino pela quantidade de pacotes de dados enviados pela origem, para cada origem e destino;
- *Vazão dos dados (VDD)*: é a razão entre quantidade de dados transferidos entre dois nós pelo intervalo de tempo em que permanecem conectados, para cada origem e destino;

**Tabela 9: Parâmetros de simulação utilizando simulador de rede.**

<b>Parâmetros</b>	<b>Valores(s)</b>
Simulador	NS-2 (2.35)
Protocolo de roteamento	AODV, P-AODV
Área de simulação	4000m X 1000m
Número de veículos	10,20,30,40,50,60
Densidade do BMVA	3,4 ônibus/km
Modelo de mobilidade	<i>VanetMobiSim</i>
Raio de alcance dos veículos comuns	300m, 500m, 750m, 1000m
Raio de alcance dos ônibus do BMVA	1000m
Velocidade máxima dos veículos	40km/h
Velocidade máxima do BMVA	54km/h
Padrão de tráfego	UDP/CBR com 2 mensagens por segundo
Número de conexões simultâneas	5
Tamanho do buffer (MAC)	50 pacotes
Banda	2 Mbps
Tempo de simulação	600s
Modelo de propagação de rádio	<i>twoRay ground</i>
Especificações da camada PHY/MAC	IEEE 802.11p

- *Sobrecarga do protocolo de roteamento (SPR)*: é a razão entre o número de pacotes de roteamento transmitidos pela quantidade de pacotes de dados recebidos, para cada origem e destino. Em pacotes enviados através de múltiplos saltos, cada salto conta como uma transmissão.

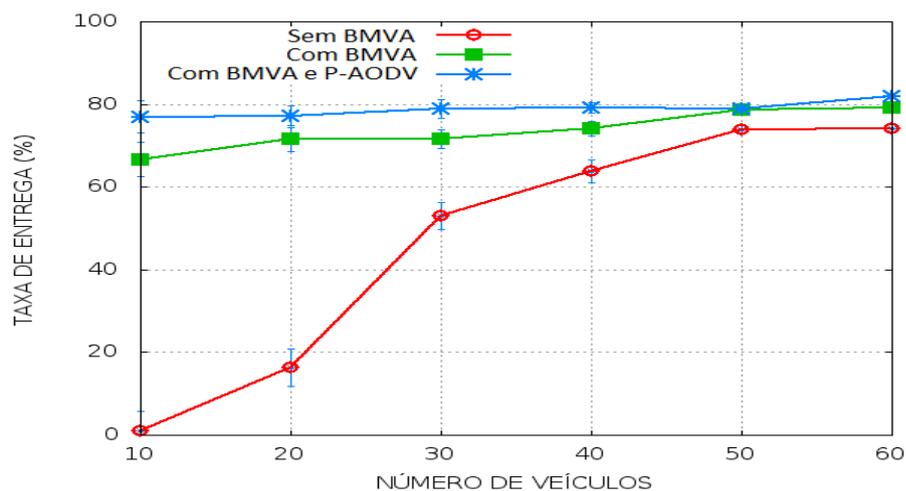
Espera-se que a taxa de entrega e a vazão aumentem sempre que o BMVA em conjunto com o P-AODV estejam presente na rede, e que a sobrecarga se mantenha baixa.

### 5.2.3 RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

As Figuras 20, 21 e 22 apresentam os resultados obtidos para a taxa de entrega, vazão e sobrecarga do protocolo de roteamento versus o número de veículos na rede para o Cenário 1. É possível notar na Figura 20 que a taxa de entrega aumenta com o acréscimo do número de veículos na rede em todos os casos. Contudo, utilizando o BMVA ou o BMVA em conjunto com o P-AODV, foi possível obter melhores resultados, com maior relevância para os casos onde existiam até 30 veículos, fato que demonstra a importância do *backbone* e do novo protocolo em redes com pouca conectividade.

Observa-se na Figura 21 que a vazão também aumenta com o acréscimo do número de veículos na rede em todos os casos. Entretanto, conforme esperado, obteve-se melhores resultados onde foram utilizados o BMVA e o BMVA em conjunto com o P-AODV.

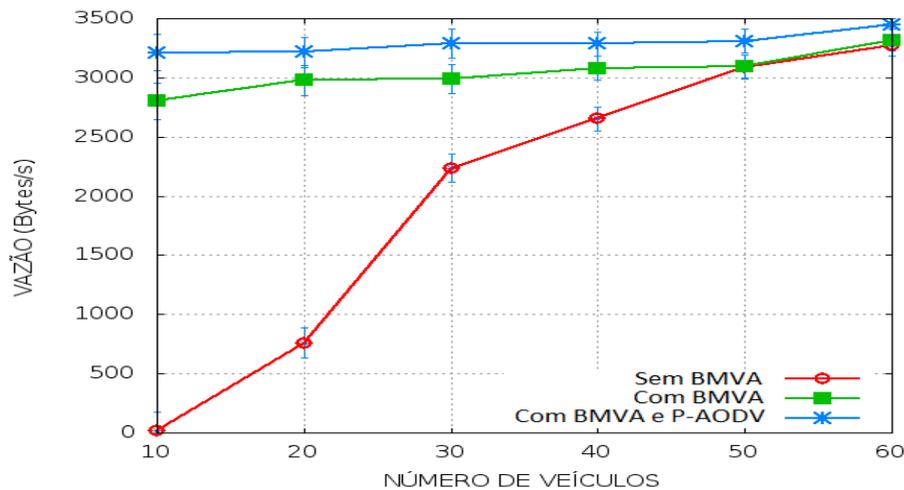
Nota-se na Figura 22 que a sobrecarga do BMVA e do BMVA em conjunto com o P-AODV se manteve semelhante, com leve superioridade do BMVA em conjunto com o P-AODV em simulações com quarenta ou mais veículos. Isso ocorre porque toda vez que um nó recebe uma mensagem de RREQ originada do *backbone*, com o mesmo identificador de uma mensagem de RREQ já recebida, ela não é descartada imediatamente, mas é analisada e reenviada, sendo descartada somente pelos próximos nós que a receberem. Em ambientes que não utilizam o BMVA, a sobrecarga é mais alta quando comparada com ambientes que utilizam o BMVA nos casos onde existem até aproximadamente 30 veículos, sendo menor no restante dos casos. Isso ocorre porque quando existe menos de trinta veículos a conectividade da rede é baixa, contendo muitos pacotes de roteamento sendo enviados e poucos pacotes de dados recebidos. Após 30 veículos, a sobrecarga fica levemente menor devido ao fato do BMVA proporcionar a existência de um número maior de veículos na rede, e em consequência um número maior de pacotes de roteamento enviados.



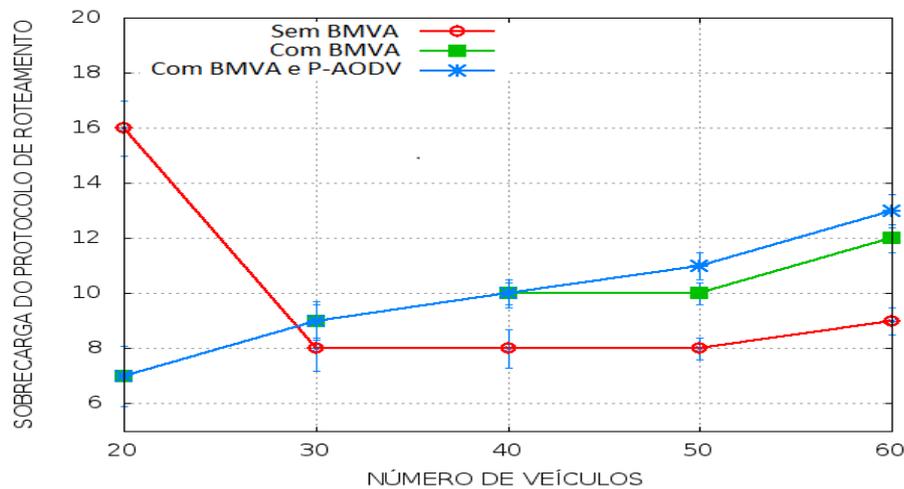
**Figura 20: Cenário 1 - Taxa de entrega versus a variação do número de veículos.**

As Figuras 23, 24, 25, 26, 27, 28 apresentam os resultados obtidos para a taxa de entrega, vazão e sobrecarga do protocolo de roteamento versus o raio de alcance para o Cenário 2. Nota-se nas Figuras 23 e 26 que a taxa de entrega aumenta com o incremento do raio de alcance em todos os casos. Apesar disso, ambientes que utilizaram o BMVA ou o BMVA em conjunto com o P-AODV apresentaram melhores resultados. É possível observar uma rede de 4000m x 1000m com 20 e 40 veículos com raio de 300 metros, configurando assim um ambiente com notável falta de conectividade. Entretanto, o BMVA em conjunto com o P-AODV foi capaz de prover infraestrutura e aumentar a taxa de entrega.

As Figuras 24 e 27 ilustram a vazão, que também aumenta com o acréscimo do raio de alcance em todas as situações simuladas. Mas nos casos onde o BMVA foi utilizado, obteve-se



**Figura 21: Cenário 1 - Vazão versus a variação do número de veículos.**



**Figura 22: Cenário 1 - Sobrecarga de roteamento versus a variação do número de veículos.**

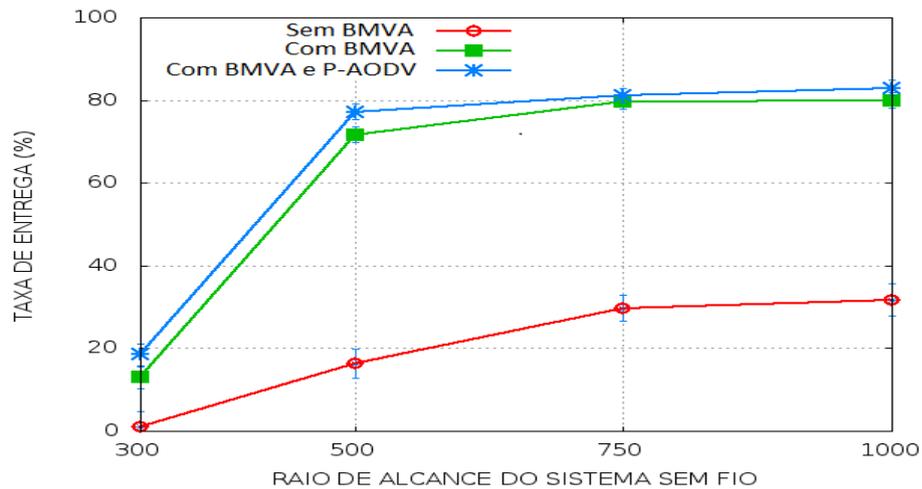
melhores resultados.

Nota-se nas Figuras 25 e 28 que a sobrecarga do BMVA e do BMVA em conjunto com o P-AODV se mantiveram semelhantes, com leve superioridade do BMVA em conjunto com o P-AODV. Na Figura 25 a sobrecarga é mais alta em ambientes que não utilizam o BMVA com até 750 metros de raio, sendo menor no restante dos casos. Isso ocorre porque com até 750 metros de raio a conectividade é baixa, existindo deste modo muitos pacotes de roteamento enviados e poucos pacotes de dados recebidos.

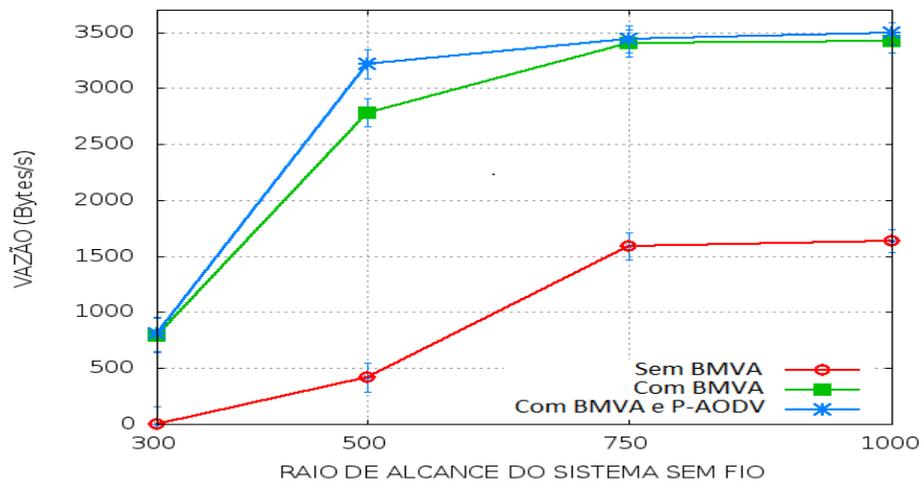
Nota-se na Figura 28 que a sobrecarga do BMVA e do BMVA em conjunto com o P-AODV se mantiveram semelhantes, com leve superioridade do BMVA em conjunto com o P-AODV. Entretanto, em ambientes que não utilizam o BMVA a sobrecarga foi sempre mais baixa. Isso ocorre porque o BMVA proporciona a existência de um número maior de veículos na

rede, e em consequência um número maior de pacotes de roteamento enviados.

Com estes resultados fica comprovado que o BMVA é capaz de prover infraestrutura e aumentar o desempenho da rede. Além disso, comprova-se também que o P-AODV é capaz de atuar em conjunto com o BMVA, melhorando a taxa de entrega e a vazão, ao mesmo tempo em que mantém a sobrecarga estável.



**Figura 23: Cenário 2 - Taxa de entrega versus a variação do raio de alcance do sistema sem fio com 20 veículos.**



**Figura 24: Cenário 2 - Vazão versus a variação do raio de alcance do sistema sem fio com 20 veículos.**

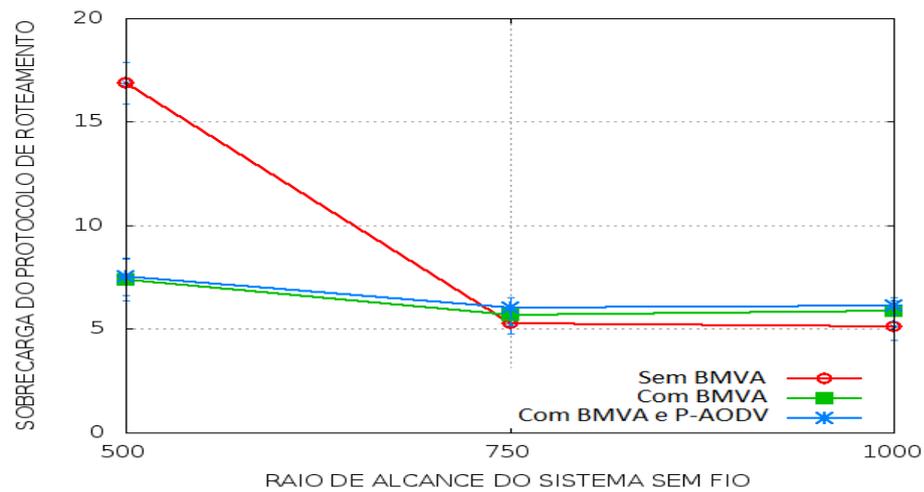


Figura 25: Cenário 2 - Sobrecarga de roteamento versus a variação do raio de alcance do sistema sem fio com 20 veículos.

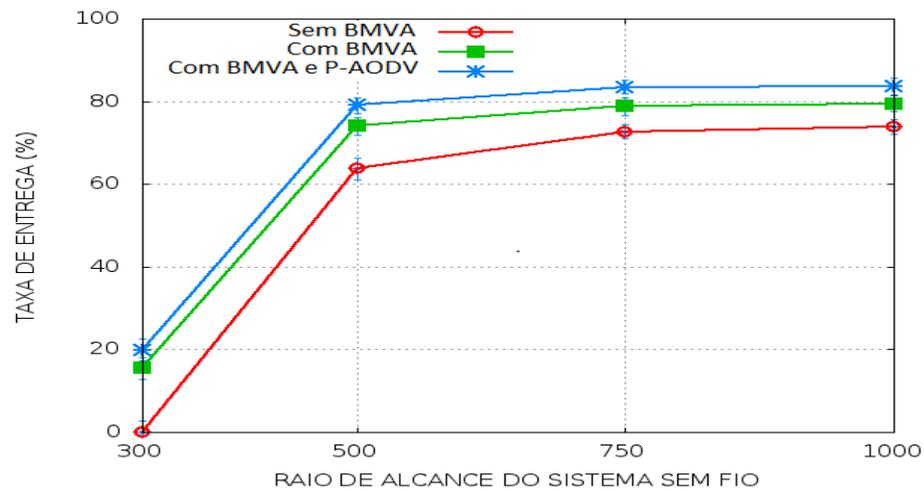


Figura 26: Cenário 2 - Taxa de entrega versus a variação do raio de alcance do sistema sem fio com 40 veículos.

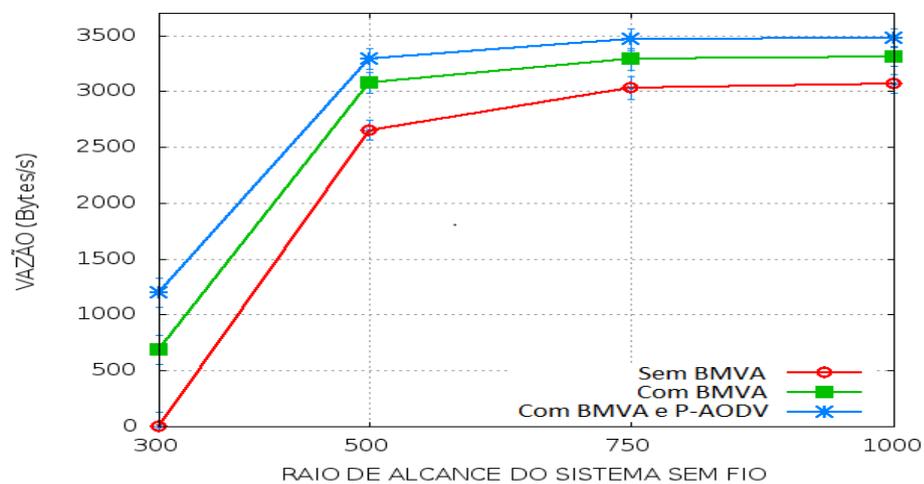
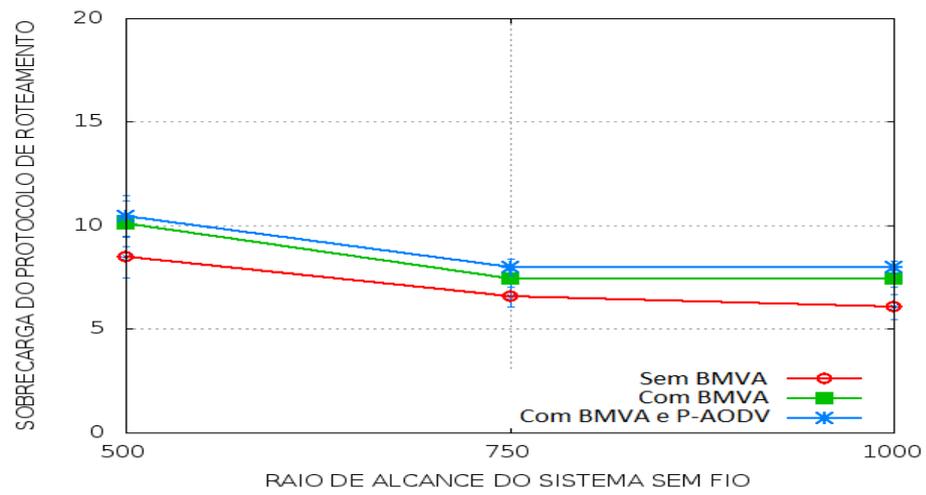


Figura 27: Cenário 2 - Vazão versus a variação do raio de alcance do sistema sem fio com 40 veículos.



**Figura 28: Cenário 2 - Sobrecarga de roteamento versus a variação do raio de alcance do sistema sem fio com 40 veículos.**

## 6 O PROTOCOLO P-AOMDV

O *Priority Ad Hoc On-Demand Multipath Distance Vector* (P-AOMDV) é uma modificação do protocolo AOMDV (MARINA; DAS, 2002). Ele foi desenvolvido para atuar em conjunto com o BMVA no momento em que os nós estão descobrindo as rotas, possuindo assim a capacidade de construí-las levando em consideração a quantidade de ônibus expressos que cada uma das rotas possui. Neste protocolo, as mensagens de dados trafegam por rotas que possuem o maior número possível de ônibus pertencentes ao BMVA, onde existe maior conectividade e confiabilidade. A modificação foi realizada principalmente no processo de descoberta de rotas do AOMDV.

No AOMDV, a origem inicia um processo de descoberta de rota enviando uma mensagem de *route request* (RREQ) em *broadcast*. Quando um nó intermediário recebe uma cópia de uma mensagem RREQ, ele verifica em sua tabela de roteamento se existe um ou mais caminhos válidos para o destino solicitado na mensagem RREQ. Caso exista, o nó gera uma mensagem de *route reply* (RREP) e a envia de volta para a origem no caminho inverso. Caso contrário, a mensagem RREQ é reencaminhada pelo nó intermediário na rede. Quando o nó destino recebe cópias da RREQ, ele constrói caminhos inversos da mesma forma que os nós intermediários. O nó destino gera uma RREP em resposta a cada RREQ que chega, através de um caminho livre de laço com a origem (MARINA; DAS, 2002).

### 6.1 PROCESSO DE DESCOBRIMENTO DE ROTAS DO P-AOMDV

O processo de descoberta de rotas do P-AOMDV é semelhante ao original, quando um nó necessita enviar uma mensagem para outro nó para o qual ele ainda não conhece a rota, uma mensagem RREQ é enviada em *broadcast* e mensagens RREP são enviadas em resposta pelo destino ou por um nó intermediário conhecedor da rota até a origem.

Na mensagem RREP foi incluído um novo campo, chamado de *cont\_bus*, cuja função é armazenar a quantidade de ônibus pertencentes ao BMVA que cada uma das múltiplas rotas possui. A estrutura da mensagem de RREP proposta para o P-AOMDV pode ser visualizada na

Tabela 10.

**Tabela 10: Estrutura da mensagem de RREP proposta para o P-AOMDV.**

scr	dst	dst_seqno	hop_count	lifetime	cont_bus
-----	-----	-----------	-----------	----------	----------

Desta forma, quando a RREP estiver percorrendo a rota do destino até a origem pelo caminho inverso, ela irá incrementar a variável *cont\_bus* em uma unidade toda vez que for recebida por um ônibus que pertence ao BVMA. Assume-se que todos os nós da rede sabem identificar, por meio de um identificador único (ID), quem são os ônibus pertencentes ao BMVA.

No processo de descoberta de rotas, as mensagens RREP são utilizadas para atualizar as tabelas dos nós com informação de roteamento, como por exemplo, atualizar o campo *next\_hop* com o endereço do próximo nó em direção ao destino. No P-AOMDV, incluiu-se um novo campo na tabela de roteamento, chamado de *num\_bus*, cuja função é armazenar quantos nós pertencentes ao BMVA a rota possui.

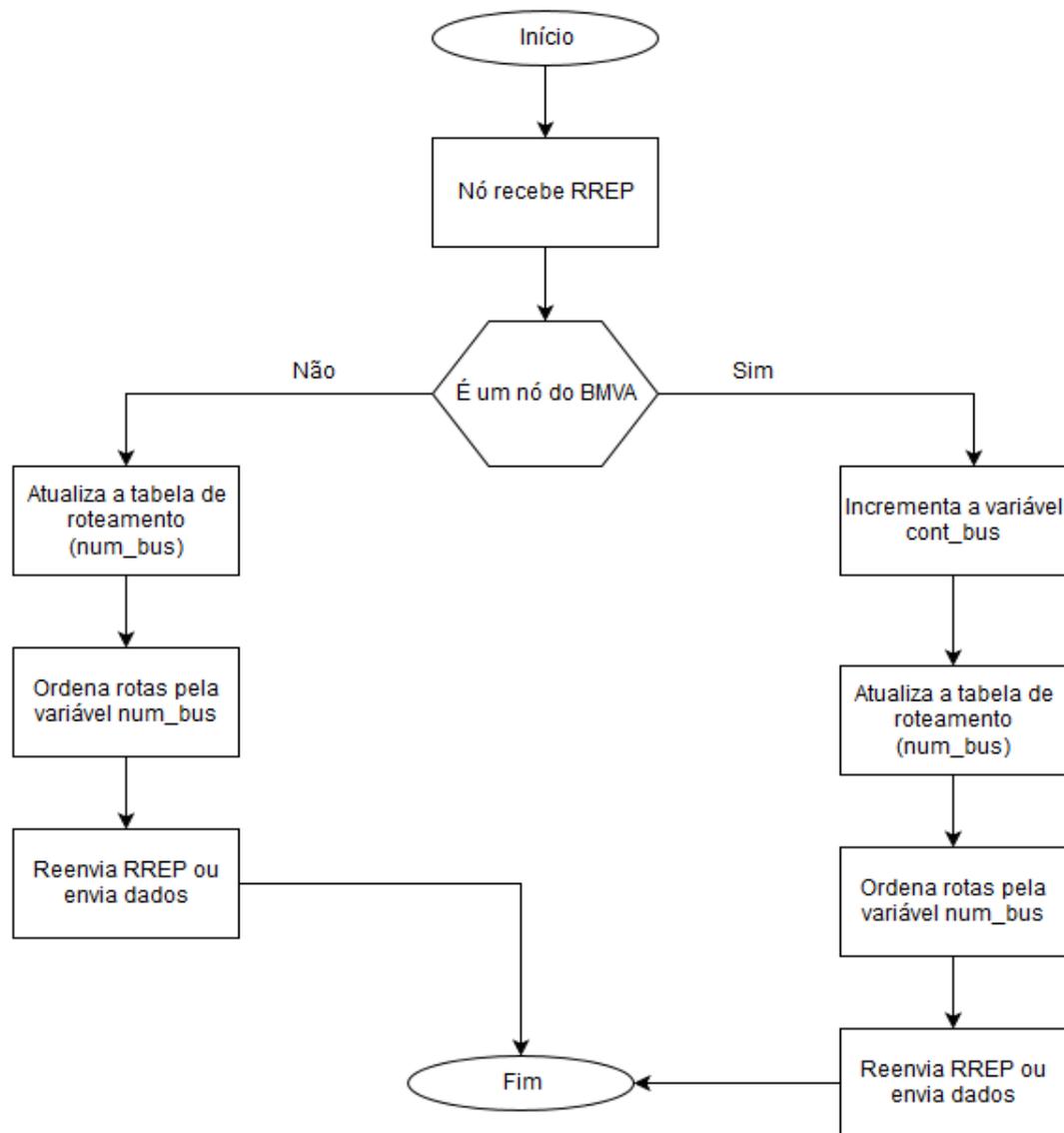
A estrutura da tabela de roteamento do AOMDV e do P-AOMDV é ilustrada pela Tabela 11.

**Tabela 11: Estrutura da tabela de roteamento do AOMDV e do P-AOMDV.**

AOMDV	P-AOMDV
Destination Address	Destination Address
Sequence Number	Sequence Number
Advertised-hop count	Advertised-hop count
RouteList [(next_hop1, hop_count1),(next_hop2, hop_count2),.....]	RouteList [(next_hop1, hop_count1, <b>num_bus1</b> ),(next_hop2, hop_count2, <b>num_bus2</b> ),.....]
Expiration time out	Expiration time out

Com isso, quando a mensagem RREP viajar do destino até a origem, todos os nós que a receberem vão atualizar o valor da variável *num\_bus* em suas tabelas de roteamento, com a quantidade de nós pertencentes ao BMVA que a rota possui a partir do nó atual (nó que recebeu a RREP), ou seja, vão copiar o valor da variável *cont\_bus* da mensagem RREP para a variável *num\_bus* da tabela de rotas. O Fluxograma (apresentado na Figura 29) descreve o processo completo de manutenção de rotas do P-DSDV.

Com esta nova tabela de roteamento, os nós do protocolo P-AOMDV são capazes de ordenar as rotas em suas tabelas em ordem crescente, tendo como parâmetro para a ordenação



**Figura 29: Fluxograma do processo de descobrimento de rotas do P-AOMDV.**

o número de nós que pertencem ao BMVA. Caso duas rotas tenham o mesmo número de nós do BMVA, terá prioridade aquela que apresentar o menor número de saltos para o destino. Ressalta-se que o AOMDV original cria no máximo três rotas disjuntas e livres de laço entre dois nós quaisquer, em cada processo de descoberta de rotas. Outra modificação realizada foi o aumento do número de rotas possíveis, uma vez que o novo protocolo mantém até dez rotas disjuntas entre origens e destinos. A Tabela 12 ilustra os dados da tabela de rotas de um nó qualquer do P-AOMDV. Conforme pode ser observado neste exemplo, as rotas são ordenadas prioritariamente pelo número de nós pertencentes ao BMVA, caso este número seja o mesmo, a rota é ordenada pelo número de saltos ao destino.

A alteração do cabeçalho da mensagem RREP pode gerar uma sobrecarga no tráfego da rede, assim como a alteração da tabela de roteamento pode gerar a necessidade de mais espaço

**Tabela 12: Informações da tabela de rotas de um nó do P-AOMDV.**

Destination	Sequence Number	Advertised hop count	Next hop	Num bus	Hop count
100	2	1683	3	5	8
			40	5	9
			51	4	7
			12	3	6
			33	2	7

para armazenamento. Porém, as VANETs possuem menos restrições de *hardware* em relação às demais redes ad hoc, como as MANETs, por exemplo, pois são implementadas em veículos, os quais não possuem restrição de energia, suportando assim um *hardware* mais potente. Cabe lembrar que nenhum pacote novo foi criado, por isso qualquer sobrecarga gerada é pequena, sendo compensada com a melhora de diversas métricas de desempenho.

## 6.2 AVALIAÇÃO DO P-AOMDV UTILIZANDO SIMULADOR DE REDE

A avaliação do P-AOMDV utilizando um simulador de rede consiste em verificar o quanto o conjunto P-AOMDV/BMVA pode melhorar métricas de conectividade e de desempenho, como a taxa de entrega e a taxa de rota ativa (Seção 6.2.2). Para isso, o conjunto foi avaliado através de simulações usando o *Network Simulator (NS)* versão 2.35 (NS2, 2015). As avaliações são feitas por meio de comparações entre as seguintes situações:

- Sem o BMVA e com o AOMDV original (sem BMVA);
- Com o BMVA e com o AOMDV original (com BMVA);
- Com o BMVA e com o P-AOMDV (com BMVA e P-AODV).

Quando realiza-se comparações entre as situações sem BMVA e com BMVA, espera-se que as situações com BMVA apresentem um melhor desempenho. Quando realiza-se comparações entre as situações com BMVA e com BMVA e P-AOMDV, espera-se que as situações com BMVA e P-AOMDV apresentem um desempenho superior.

### 6.2.1 AMBIENTE DE SIMULAÇÃO

As simulações de rede buscam examinar a proposta em dois cenários. Em ambos os cenários a rede criada para a simulação é uma área retangular de 2000m x 500m dividida em

quatro regiões: 1, 2, 3 e 4, onde a região 4 representa as vias expressas do BMVA (ver topologia da rede na Figura 19). No Cenário 1, existem cinco veículos distribuídos na região 1 e cinco veículos na região 3, além de 15, 25, 35, 45 ou 55 veículos distribuídos por todo o ambiente de simulação (regiões 1, 2, e 3). Os veículos da região 1 se comunicam aleatoriamente com os veículos da região 3, fazendo com que as mensagens passem necessariamente pelas regiões 2 e 4. Neste cenário, os veículos comuns transmitem seus sinais de radiofrequência em um raio de 300m (TOOR et al., 2008; JOCHLE et al., 2012) e os ônibus do BMVA em um raio de 500m (considera-se que, devido à ausência de obstáculos entre os ônibus, o alcance de comunicação é maior). Desta forma, o grau de conectividade para a rede em questão é  $g_c = 99\%$ . No Cenário 2, a rede é a mesma, porém com 35 veículos distribuídos nas regiões 1, 2 e 3. Neste novo cenário, os veículos comuns transmitem seus sinais de rádiofrequência em um raio de 300m, e os ônibus do BMVA em um raio de 100m, 300m e 500m.

No Cenário 1 foram realizadas simulações sem o BMVA, com o BMVA e com o BMVA em conjunto com o P-AOMDV. No Cenário 2, o objetivo é estudar o desempenho da rede com a variação do raio de transmissão dos ônibus do BMVA, portanto, apenas simulações com o BMVA e com o P-AOMDV/BMVA foram feitas. Nas simulações onde o BMVA é utilizado, ele é configurado com a mesma densidade observada no cenário real (7 veículos/km).

Além disso, em ambos os cenários, todos os veículos se deslocam seguindo o modelo de movimentação estabelecido pelo VanetMobiSim, com velocidades de até 54 km/h. O padrão de tráfego consiste de conexões com taxa de bits constante (CBR) considerando o protocolo UDP. O modelo de propagação de rádio é o *twoRay ground* (GAST, 2002), enquanto a camada MAC segue as especificações IEEE 802.11p (IEEE, 2007). As simulações são realizadas por 600 segundos e todos os resultados apresentados são médias de 35 simulações com o mesmo modelo de tráfego, mas com diferentes cenários de mobilidade. Para estas simulações o intervalo de confiança considerado é de 95%. Os parâmetros configurados nas simulações estão resumidos na Tabela 13.

## 6.2.2 MÉTRICAS

O conjunto P-AOMDV/BMVA foi avaliado com base nas seguintes métricas:

- *Taxa de entrega dos pacotes (TEP)*: é a razão entre os pacotes de dados entregues ao destino pela quantidade de pacotes de dados enviados pela origem, para cada origem e destino;
- *Taxa de rota ativa (TRA)*: é a razão entre o tempo de rota ativa pelo tempo de rota ativa

**Tabela 13: Parâmetros de simulação utilizando simulador de rede.**

<b>Parâmetros</b>	<b>Valores(s)</b>
Simulador	NS-2 (2.35)
Protocolo de roteamento	AOMDV, P-AOMDV
Área de simulação	2000m X 500m
Número de veículos	15,25,35,45,55
Densidade do BMVA	7 ônibus/km
Modelo de mobilidade	<i>VanetMobiSim</i>
Raio de alcance dos veículos comuns	300m
Raio de alcance dos ônibus do BMVA	100m, 300m, 500m
Velocidade máxima dos veículos comuns	40km/h
Velocidade máxima do BMVA	54km/h
Padrão de tráfego	UDP/CBR com 2 mensagens/s
Conexões simultâneas	5
Tempo de simulação	600s
Modelo de propagação de rádio	<i>twoRay ground</i>
Especificações da camada PHY/MAC	IEEE 802.11p

mais o tempo de descoberta de rotas, para cada origem e destino. Entende-se por tempo de rota ativa o tempo em que a origem está transmitindo dados, e por tempo de descoberta, o tempo em que a origem está descobrindo uma rota;

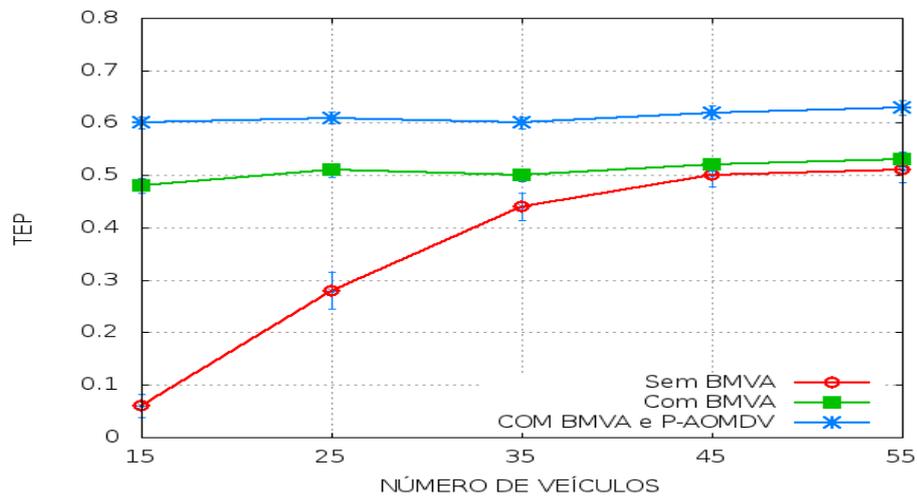
- *Taxa de quebra de rotas (TQR)*: é a razão entre o número de pacotes de roteamento gerado por quebra de rotas pela quantidade de pacotes de dados recebidos, para cada origem e destino;
- *Taxa de perda de pacotes de dados por rota indisponível (TPP)*: é a razão entre o número de pacotes de dados descartados por rota indisponível pelo número de pacotes de dados transmitidos, para cada origem e destino.

Com as métricas TRA e TQR pretende-se avaliar o desempenho do P-AOMDV/BMVA em relação à conectividade da rede, enquanto que com as métricas TEP e TPP pretende-se verificar se a conectividade reflete no desempenho da rede. Espera-se o aumento das taxas TEP e TRA sempre que o conjunto BMVA/P-AOMDV estiver presente na rede, assim como a redução das taxas TQR e TPP.

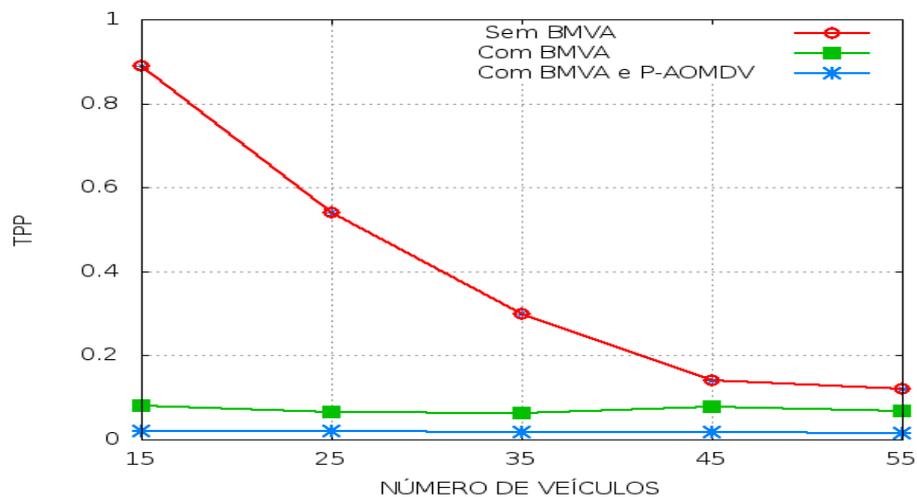
### 6.2.3 RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

As Figuras 30 e 31 apresentam os resultados obtidos para a taxa de entrega e taxa de perda de pacotes versus o número de veículos na rede para o Cenário 1. É possível notar

que a taxa de entrega aumenta com o acréscimo do número de veículos na rede e a taxa de perda de pacotes diminui. Contudo, utilizando o BMVA, foi possível obter melhores resultados, com maior relevância para os casos onde existem até 25 veículos, fato que demonstra a importância do *backbone* em redes com pouca conectividade. Os resultados foram significativamente melhores onde o conjunto P-AOMDV/BMVA foi utilizado, com destaque para o fato do ganho (aumento da taxa de entrega e diminuição da perda de pacotes de dados) ser constante, independentemente do número de veículos. Este fato pode ser observado uma vez que o P-AOMDV prioriza as rotas mais confiáveis, ou seja, aquelas que possuem uma quantidade maior de ônibus pertencentes ao BMVA, conseguindo deste modo manter a conectividade entre a origem e o destino por um tempo maior e, conseqüentemente, obtendo mais pacotes entregues e menos pacotes descartados por rotas indisponíveis.



**Figura 30: Cenário 1 - Taxa de entrega dos pacotes de dados.**

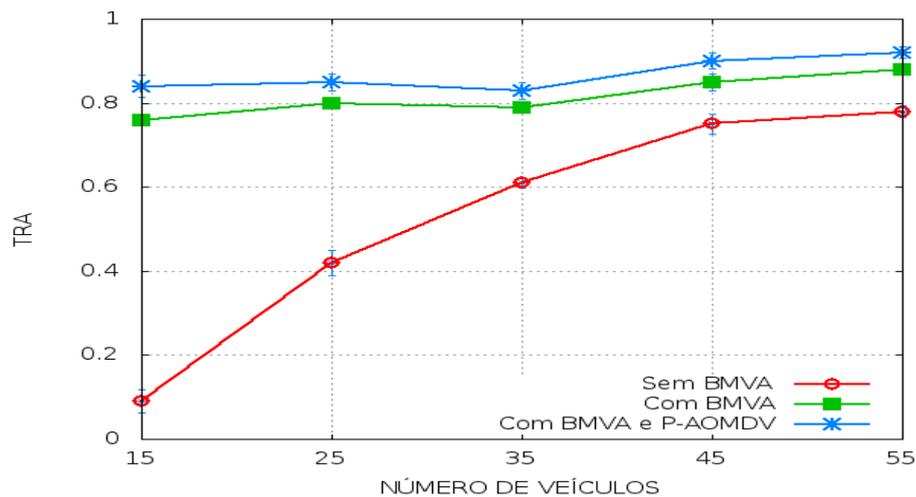


**Figura 31: Cenário 1 - Taxa de perda de pacotes de dados.**

Observa-se na Figura 32 que a taxa de rota ativa aumenta com o acréscimo do número

de veículos na rede (Cenário 1). Entretanto, conforme esperado, obteve-se melhores resultados onde foram utilizados o BMVA ou o conjunto P-AOMDV/BMVA, com maior ênfase para o conjunto, que foi capaz de apresentar ganhos significativos. Tais ganhos estão relacionados ao fato do P-AOMDV escolher rotas mais confiáveis, tendo como consequência destas escolhas rotas com um tempo de duração maior.

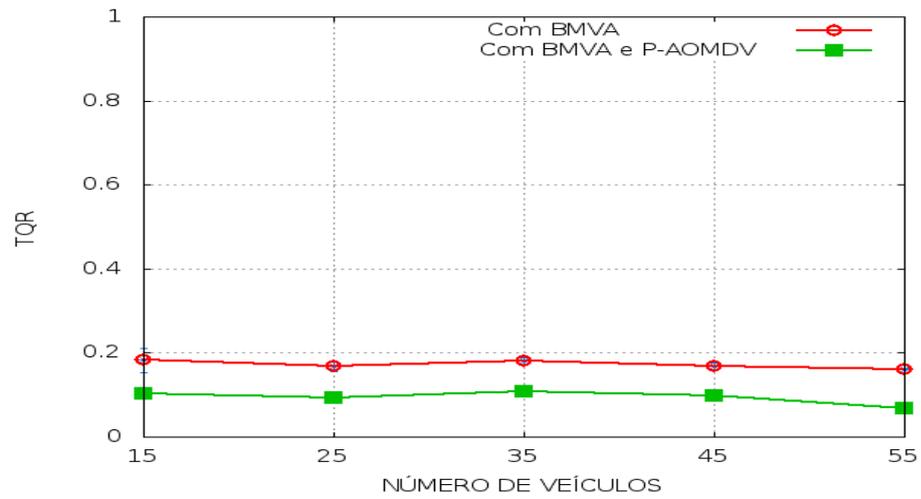
Na Figura 33 pode-se observar a taxa de quebra de rotas (Cenário 1). Nota-se que o conjunto P-AOMDV/BMVA reduziu a taxa de quebra, visto que ele é capaz de aumentar o tempo de rota ativa. Neste gráfico, comparou-se apenas os casos onde o BMVA foi utilizado (com o BMVA e BMVA em conjunto com o P-AOMDV). Os resultados sem o BMVA foram excluídos porque em alguns cenários de mobilidade (os resultados são médias de 35 cenários diferentes) o destino não recebeu pacotes de dados, tornando a taxa de quebra de rotas sem sentido nestes casos.



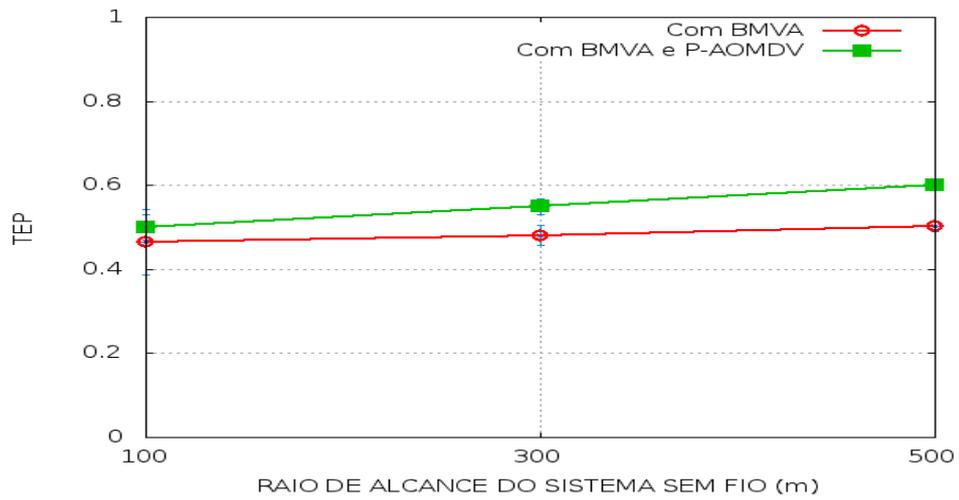
**Figura 32: Cenário 1 - Taxa de rota ativa.**

As Figuras 34 e 35 apresentam os resultados obtidos para a taxa de entrega e taxa de perda de pacotes versus o raio dos ônibus do BMVA para o Cenário 2. É possível notar que a taxa de entrega aumenta com o acréscimo do raio dos ônibus do BMVA, enquanto a taxa de perda de pacotes diminui. Onde o conjunto P-AOMDV/BMVA foi utilizado, os resultados foram significativamente melhores (a taxa de entrega aumentou e a de perda de pacotes diminuiu). Este fato pode ser observado pois quanto maior o raio, maior é a conectividade no BMVA e, conseqüentemente, maior o aproveitamento do P-AOMDV na seleção das rotas (rotas com maior conectividade entre origem e destino).

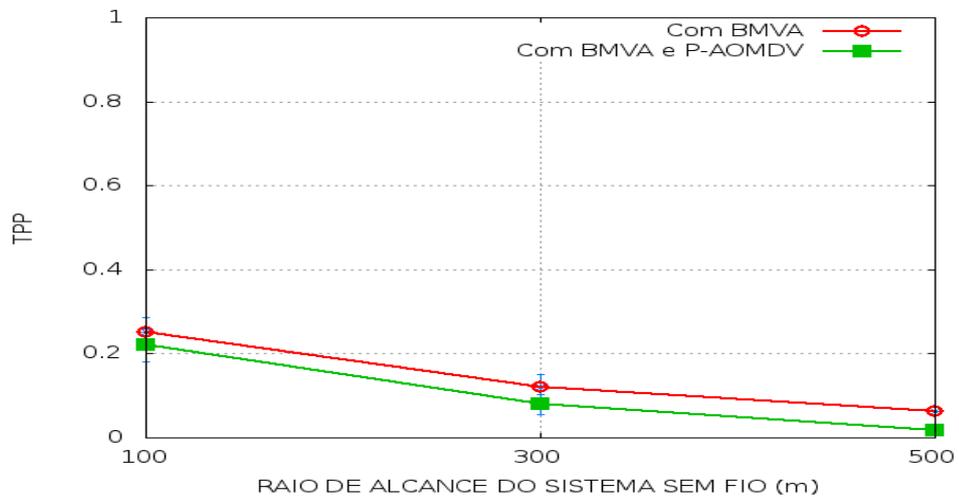
Observa-se na Figura 36 que a taxa de rota ativa aumenta com o acréscimo do raio dos ônibus do BMVA (Cenário 2). Entretanto, conforme esperado, obteve-se melhores resultados onde foi utilizado o conjunto P-AOMDV/BMVA, com destaque para os casos onde o raio dos



**Figura 33: Cenário 1 - Taxa de quebra de rotas.**



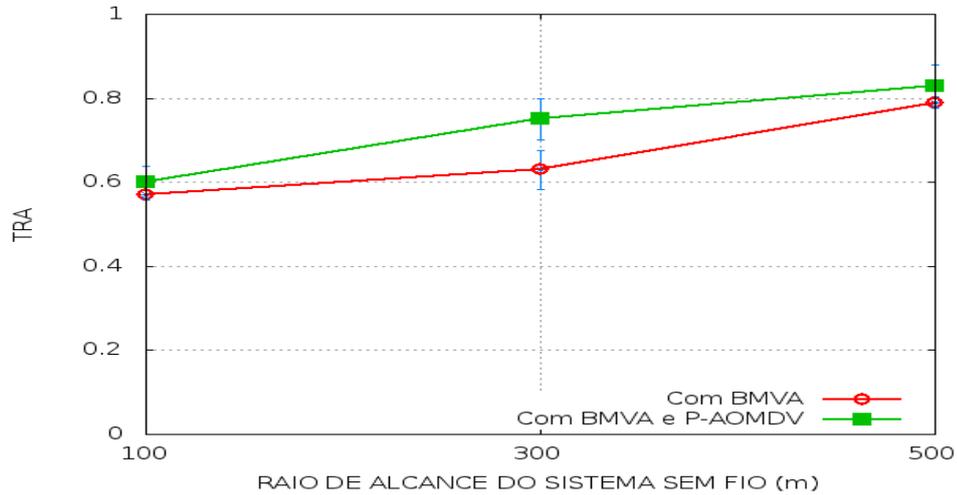
**Figura 34: Cenário 2 - Taxa de entrega dos pacotes de dados.**



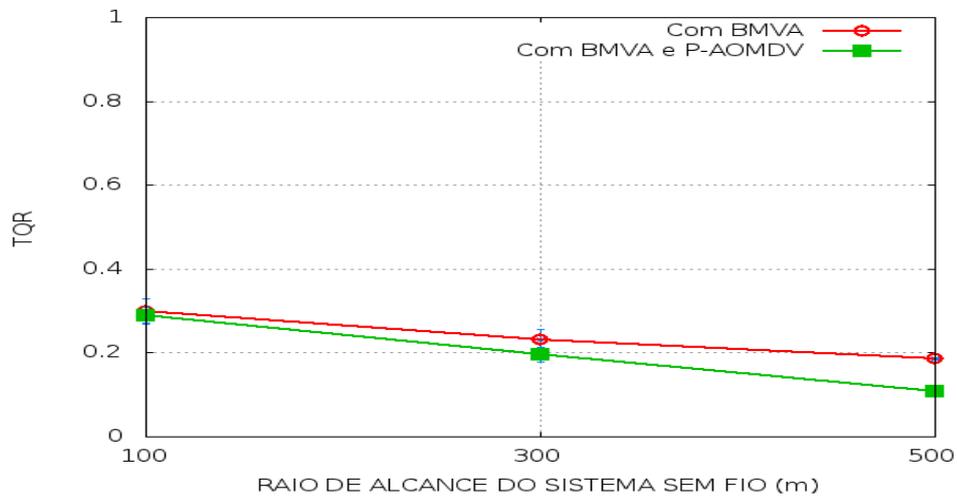
**Figura 35: Cenário 2 - Taxa de perda de pacotes de dados.**

ônibus do BMVA é maior.

Na Figura 37, pode-se observar a taxa de quebra de rotas (Cenário 2). Nota-se que o conjunto reduz a taxa de quebra com o aumento do raio, visto que ele é capaz de aumentar o tempo de rota ativa nos mesmos casos.



**Figura 36: Cenário 2 - Taxa de rota ativa.**



**Figura 37: Cenário 2 - Taxa de quebra de rotas.**

Com estes resultados fica comprovado que o P-AOMDV é capaz de atuar em conjunto com o BMVA para prover conectividade e aumentar o desempenho da rede, melhorando significativamente as métricas taxa de entrega dos pacotes, taxa de rota ativa, taxa de quebra de rotas e taxa de perda de pacotes de dados.

## 7 O PROTOCOLO P-DSDV

O *Priority Destination-Sequenced Distance Vector Routing Protocol* (P-DSDV) é uma modificação do protocolo DSDV. Ele foi desenvolvido para atuar em conjunto com o BMVA no momento em que os nós estão descobrindo as rotas, possuindo assim a capacidade de construí-las realizando uma decisão custo e benefício entre as métricas número de saltos para o destino e número de ônibus expressos pertencentes à rota. Neste protocolo, as mensagens trafegam por rotas que possuem um equilíbrio entre estas duas métricas, apresentando desta forma um melhor desempenho (maior conectividade e maior confiabilidade). A modificação foi realizada principalmente no processo de manutenção/atualização das rotas do DSDV.

O DSDV é um protocolo tipo *Distance-Vector*, ao qual são acrescentados números de sequência. No DSDV, os nós da rede mantêm uma tabela de rotas com todos os destinos disponíveis, o número de saltos para alcançar o destino e o número de sequência associado. O número de sequência é usado para distinguir rotas velhas de novas, evitando assim a formação de laços (*loops*). A manutenção das tabelas de rotas é feita por meio do envio periódico de mensagens de atualização, informando se ocorreram alterações nas tabelas de roteamento. Quando os nós recebem as mensagens de seus vizinhos, eles comparam o número de sequência recebido com o número de sequência das suas próprias tabelas. Se este número for maior (mais recente), a atualização é feita independente de outros parâmetros. Se os números forem iguais, é utilizada a rota com a menor métrica (menor número de saltos para o destino) (PERKINS; BHAGWAT, 1994).

O recebimento de mensagens com o mesmo número de sequência é comum, uma vez que todos os nós fazem a difusão das mensagens de atualização por *broadcast*. Conforme pode ser observado no exemplo da Figura 38, o nó *D* realiza o envio periódico de uma mensagem de atualização contendo informações sobre sua tabela de rotas. O nó *H* recebe a mensagem enviada por *D* primeiramente via nó *F*, realizando na sequência a atualização de sua tabela de rotas, uma vez que possui um número de sequência menor armazenado. Em seguida, *H* recebe a mensagem enviada por *D* via nó *G*, porém neste caso a rota não foi atualizada, pois a mensagem de atualização possui o mesmo número de sequência da rota previamente armazenada.

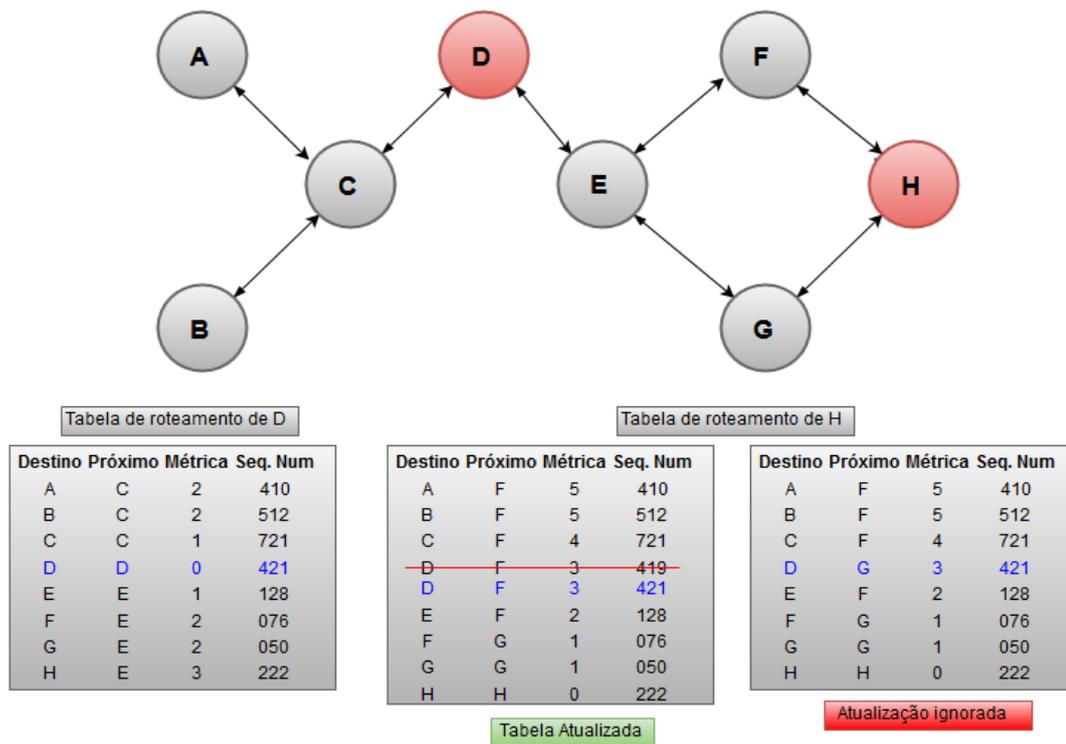


Figura 38: Recebimento de uma mensagem de atualização com o mesmo número de seqüência.

## 7.1 PROCESSO DE MANUTENÇÃO/ATUALIZAÇÃO DAS ROTAS DO P-DSDV

O processo de manutenção de rotas do P-DSDV é semelhante ao do DSDV, os nós enviam periodicamente a seus vizinhos mensagens de atualização contendo informações sobre suas tabelas de rotas (variáveis com o endereço do nó destino, número de saltos, número de seqüência, etc).

A tabela de rotas do P-DSDV possui uma nova variável, chamada *cont\_bus*, cuja função é armazenar a quantidade de ônibus pertencentes ao BMVA que cada uma das rotas possui. A estrutura da tabela de roteamento do DSDV e do P-DSDV é ilustrada pela Tabela 14.

Tabela 14: Estrutura da tabela de roteamento do DSDV e do P-DSDV.

DSDV	P-DSDV
Destino	Destino
Próximo	Próximo
Métrica (Número de saltos)	Métrica (Número de saltos)
Número de seqüência	Número de seqüência
	<i>cont_bus</i>

Deste modo, quando as mensagens de atualização estiverem sendo enviadas pela rede, elas também irão conter a variável *cont\_bus*, a qual será incrementada em uma unidade toda

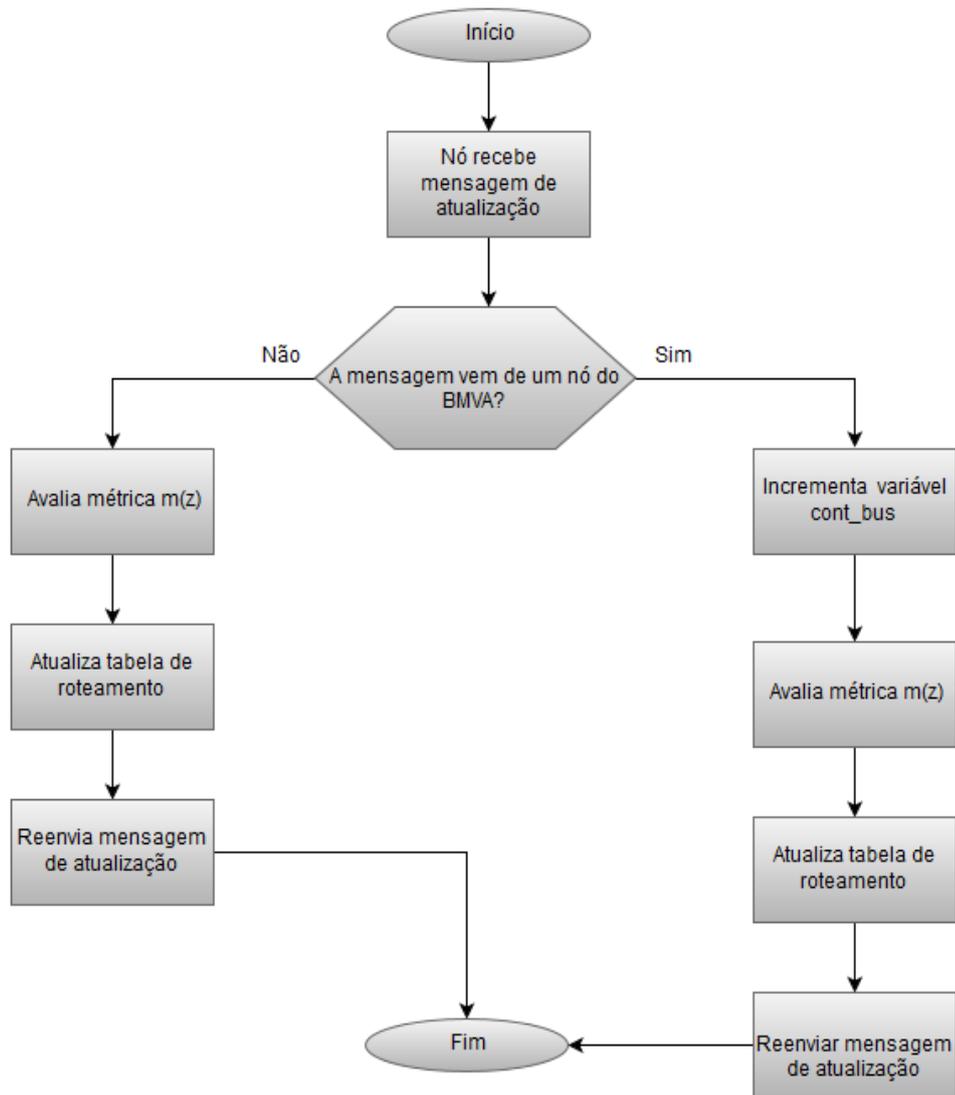
vez que o nó receptor verificar que a mesma está vindo de um ônibus pertencente ao BMVA. O método de incremento da variável *cont\_bus* ocorre da seguinte maneira: o nó recebe a tabela de seu vizinho, verifica se o vizinho é um ônibus do BMVA, atualiza a variável *cont\_bus* (incrementa em uma unidade se necessário), grava as informações na sua tabela de roteamento e reenvia a tabela com as informações atualizadas para seus vizinhos. Assume-se que todos os nós da rede sabem identificar, por meio de um identificador único (ID), quem são os ônibus pertencentes ao BMVA.

Convencionalmente, no momento em que os nós recebem as mensagens de atualização de rotas, comparam os números de sequência (aqueles que possuem em suas tabelas com os que estão vindo nas mensagens de atualização), e se estes números forem iguais, a rota com a menor métrica (menor número de saltos para o destino) é utilizada. Porém, com a nova tabela de roteamento, quando os números de sequência forem iguais, o protocolo P-DSDV irá tomar uma decisão baseado em uma nova métrica ( $m_r(z)$ ) que leva em consideração o número de saltos e o número de ônibus do BMVA. O objetivo da nova métrica é encontrar rotas com bom desempenho, dado que o BMVA é um *backbone* confiável e o número de saltos é importante para o desempenho de protocolos de roteamento. Assim, será selecionada a rota que apresentar o menor valor para a Equação 10

$$m_r(z) = n_b + n_c + z.n_c, \quad (10)$$

onde  $n_b$  é o número de nós pertencentes ao BMVA,  $n_c$  é número de nós comuns (veículos que não pertencem ao BMVA) e  $z$  é uma variável (não negativa) de controle. A variável  $z$  está associada a uma punição aplicada às rotas que tiverem um número maior de nós comuns. Assim, em função do valor de  $z$ , o protocolo poderá utilizar rotas mais curtas e possivelmente menos confiáveis (com um número menor de nós pertencentes ao BMVA) ou rotas mais longas e possivelmente mais confiáveis (com um número maior de nós pertencentes ao BMVA).

O Fluxograma apresentado na Figura 39 descreve o processo completo de manutenção de rotas do P-DSDV.

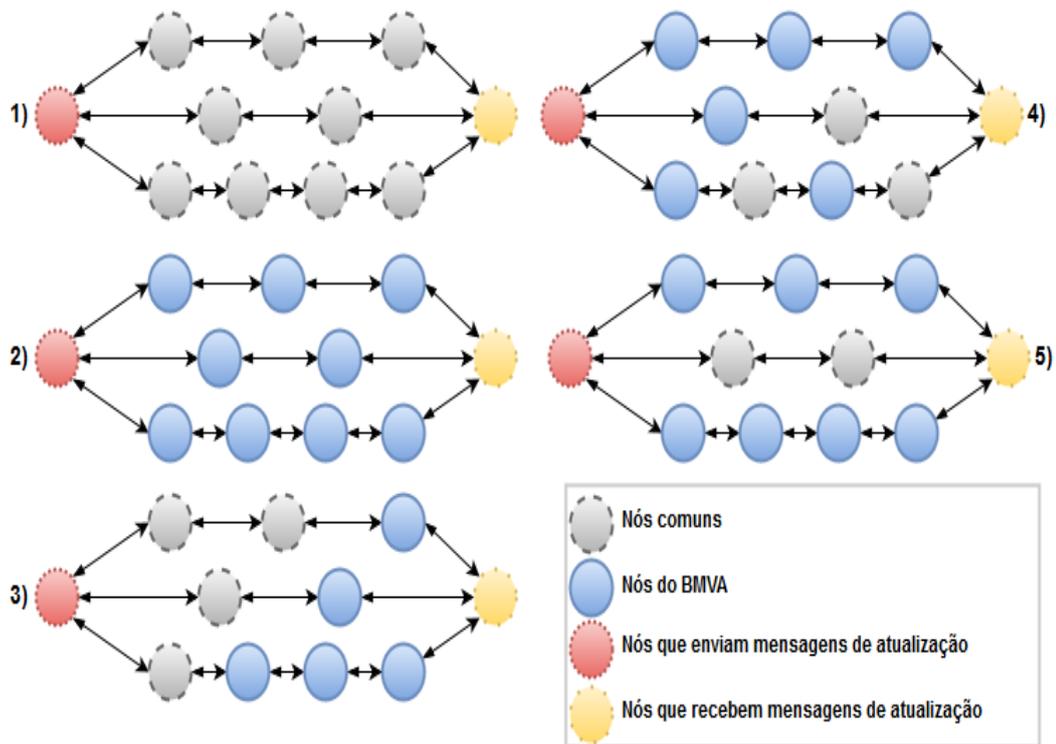


**Figura 39: Fluxograma do processo de manutenção de rotas do P-DSDV.**

## 7.2 ANÁLISE DA MÉTRICA $M_R(Z)$

Conforme pode ser observado na Figura 40, a métrica  $m_r(z)$  visa atender todos os cenários topológicos possíveis, a saber:

1. Existir somente nós comuns nas rotas;
2. Existir somente nós do BMVA nas rotas;
3. Existir nós comuns e nós do BMVA em todas as rotas (rotas mistas);
4. Existir rotas somente com nós do BMVA e rotas mistas;
5. Existir rotas somente com nós do BMVA e rotas somente com nós comuns.

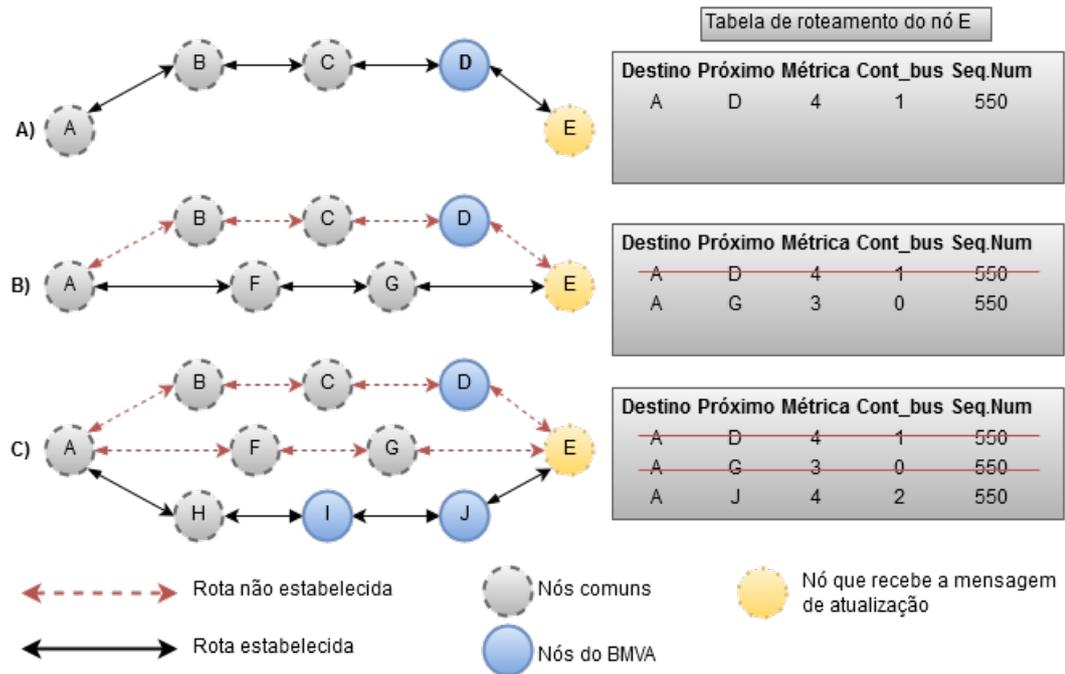


**Figura 40: Cenários topológicos existentes.**

A Figura 41 ilustra um exemplo do processo de atualização de rotas executado pelo protocolo P-DSDV. Neste exemplo, o nó  $E$ , após receber várias cópias de uma mensagem de atualização com o mesmo número de sequência, deve ser capaz de selecionar a rota mais apropriada.

Como pode ser observado na Figura 41, inicialmente o nó  $A$  envia uma mensagem de atualização, a qual chega ao nó  $E$  via nó  $D$  (Fig. 41(A)). Na sequência, o nó  $E$  recebe uma nova mensagem, porém via nó  $G$  (Fig. 41(B)). Ao receber esta nova mensagem, o nó  $E$  aplica a Equação 10 (neste exemplo com  $z = 1,5$ ) para ambas as rotas e compara os resultados. Como a rota via nó  $G$  apresenta o resultado com menor valor, ela é selecionada (a rota antiga é excluída da tabela, a rota nova é adicionada e uma mensagem de atualização de rotas é enviada imediatamente para os nós vizinhos). Por fim, o nó  $E$  recebe a mensagem de atualização via nó  $J$  (Fig. 41(C)), e novamente aplica a Equação 10 para a rota existente na tabela e a rota nova. Neste caso, a nova rota é a que apresenta a melhor métrica (menor valor para Equação 10). Desta forma, a rota utilizada para que o nó  $E$  encontre o nó  $A$  é via nó  $J$  ( $E \rightarrow J \rightarrow I \rightarrow H \rightarrow A$ ).

A Tabela 15 mostra os valores da Equação 10 para as três rotas descritas na Figura 41 (via nó  $D$ ,  $G$  e  $J$ ). Como pode ser notado, a rota onde  $m_r(z)$  assume o menor valor é a rota via nó  $J$ .



**Figura 41:** Exemplo da aplicação do processo de atualização de rotas executado pelo protocolo P-DSDV.

**Tabela 15:** Exemplo da aplicação da Equação 10.

Rota	$n_b$	$n_c$	$z$	$m_r(z)$
Via nó $D$	1	3	1,5	8,5
Via nó $G$	0	3	1,5	7,5
Via nó $J$	2	2	1,5	7,0

A alteração da tabela de roteamento pode gerar a necessidade de mais espaço para armazenamento. Porém, as VANETs possuem menos restrições de *hardware* em relação às demais redes ad hoc, pois são implementadas em veículos, os quais possuem menos restrições de energia e de armazenamento em memória.

### 7.3 AVALIAÇÃO DO P-DSDV UTILIZANDO SIMULADOR DE REDE

A avaliação do P-DSDV utilizando um simulador de rede consiste em verificar o quanto o conjunto P-DSDV/BMVA pode melhorar métricas de desempenho como a taxa de entrega e vazão (Seção 7.3.2). Para isso, o conjunto foi avaliado através de simulações usando o *Network Simulator* (NS) versão 2.35 (NS2, 2015). As avaliações de desempenho foram feitas por meio de comparações entre as seguintes situações:

- Sem o BMVA e com o DSDV original (sem BMVA);
- Com o BMVA e com o DSDV original (com BMVA);
- Com o BMVA e com o P-DSDV (P-DSDV/BMVA).

Quando realiza-se comparações entre as situações sem BMVA e com BMVA, espera-se que as situações com BMVA apresentem um melhor desempenho. Quando realiza-se comparações entre as situações com BMVA e com P-DSDV/BMVA, espera-se que as situações com P-DSDV/BMVA apresentem um desempenho superior.

### 7.3.1 AMBIENTE DE SIMULAÇÃO

As simulações de rede buscam examinar a proposta em três cenários, em todos eles a rede criada para as simulações é uma área retangular de 2000m x 500m dividida em quatro regiões: 1, 2, 3 e 4, com cinco veículos comuns distribuídos na região 1 e cinco veículos na região 3. Os veículos da região 1 se comunicam aleatoriamente com os veículos da região 3, fazendo com que as mensagens passem necessariamente pelas regiões 2 e 4. As regiões 1, 2 e 3 são áreas comuns de uma cidade, e a região 4 representa as vias expressas do BMVA (ver topologia da rede na Figura 19).

No Cenário 1, o alvo é investigar o comportamento da rede com a variação no número de veículos comuns. Assim, a rede possui 15, 25, 35, 45 ou 55 veículos distribuídos pelas regiões 1, 2, e 3 (veículos adicionais aos cinco já existentes nas regiões 1 e 3). Neste cenário, os veículos comuns transmitem seus sinais de radiofrequência em um raio de 300m (TOOR et al., 2008; JOCHLE et al., 2012) e os ônibus do BMVA em um raio de 500m (considerou-se um alcance maior, pois não há obstáculos entre os ônibus). No Cenário 2, o escopo é investigar o comportamento da rede com a variação do raio de alcance dos ônibus do BMVA, portanto os veículos comuns transmitem os sinais de radiofrequência em um raio de 300m e os ônibus do BMVA em um raio de 100m, 300m e 500m. Para o Cenário 2 existe um número fixo de 35 veículos distribuídos pelas regiões 1, 2, 3. No Cenário 3, o objetivo é investigar o comportamento da rede com a variação da taxa de transmissão (4, 8, 16, 32 ou 64 mensagens por segundo). Para o Cenário 3, existe um número fixo de 35 veículos distribuídos pelas regiões 1, 2 e 3, e os veículos comuns transmitem seus sinais de radiofrequência em um raio de 300m e os ônibus do BMVA em um raio de 500m.

Além disso, todos os veículos se deslocam seguindo o modelo de movimentação estabelecido pelo VanetMobiSim, com velocidades de até 54 km/h. Nas simulações que envolvem

os ônibus pertencentes ao BMVA, considerou-se 7 ônibus/km. O padrão de tráfego consiste de conexões com taxa de bits constante (CBR) considerando o protocolo UDP. O modelo de propagação é o *twoRay ground* (GAST, 2002), enquanto as camadas PHY/MAC seguem as especificações IEEE 802.11p (IEEE, 2007). As simulações são realizadas por 600 segundos e todos os resultados apresentados são médias de 35 simulações com o mesmo modelo de tráfego, mas com diferentes cenários de mobilidade. Para estas simulações o intervalo de confiança considerado é de 95%. Os parâmetros configurados nas simulações estão resumidos na Tabela 16.

**Tabela 16: Parâmetros de simulação utilizando simulador de rede.**

Parâmetros	Valores(s)
Simulador	NS-2 (2.35)
Protocolo de roteamento	DSDV, P-DSDV
Área de simulação	2000m X 500m
Número de veículos	15,25,35,45,55
Densidade no BMVA	7 Ônibus/km
Modelo de mobilidade	<i>VanetMobiSim</i>
Raio de alcance dos veículos comuns	300m
Raio de alcance dos ônibus do BMVA	100m, 300m, 500m
Velocidade máxima dos veículos comuns	40km/h
Velocidade máxima do BMVA	54km/h
Padrão de tráfego	UDP/CBR com 4,8,16,32,64 mensagens/s
Conexões simultâneas	5
Tempo de simulação	600s
Modelo de propagação de rádio	<i>twoRay ground</i>
Especificações da camada MAC/PHY	IEEE 802.11p

### 7.3.2 MÉTRICAS

O conjunto P-DSDV/BMVA foi avaliado com base nas seguintes métricas:

- *Taxa de entrega de pacotes (TEP)*: é a razão entre os pacotes de dados entregues ao destino pela quantidade de pacotes de dados enviados pela origem, para cada origem e destino;
- *Vazão dos dados (VDD)*: é a razão entre quantidade de dados transferidos entre dois nós pelo intervalo de tempo em que permanecem conectados, para cada origem e destino;
- *Sobrecarga do protocolo de roteamento (SPR)*: é a razão entre o número de pacotes de roteamento transmitidos pela quantidade de pacotes de dados recebidos, para cada origem

e destino. Em pacotes enviados através de múltiplos saltos, cada salto conta como uma transmissão.

Com as métricas TEP, VPD e SPR pretende-se avaliar o conjunto P-DSDV/BMVA com relação ao desempenho da rede. Espera-se o aumento das taxas TEP, VPD e SPR sempre que o conjunto BMVA/P-DSDV estiver presente na rede.

### 7.3.3 RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

As Figuras 42 e 43 apresentam os resultados obtidos para a taxa de entrega e a vazão versus o número de veículos na rede (Cenário 1). Comparando-se os casos onde o BMVA foi utilizado com os casos onde o BMVA não foi utilizado, é possível notar que a taxa de entrega e a vazão apresentam resultados superiores na maioria das vezes em que o BMVA é utilizado (com 15, 25, 35 e 45 veículos), sendo que a maior diferença é para 15 veículos, fato que demonstra a importância do BMVA em redes com pouca conectividade. Ressalta-se que nos casos com o BVMA (com infraestrutura móvel confiável), ou sem BMVA (sem infraestrutura móvel confiável), o DSDV original considera sempre os caminhos mais curtos.

Os resultados são significativamente melhores onde o conjunto P-DSDV/BMVA é utilizado, com destaque para o aumento da taxa de entrega e da vazão independentemente do número de veículos comuns. Este fato decorre da confiabilidade do BMVA, independentemente do número de veículos, o que proporciona condições para que o P-DSDV possa priorizar rotas com melhor desempenho. Além disso, em alguns casos, o P-DSDV/BMVA com  $z = 0,5$  apresenta melhores resultados em relação a  $z = 1,5$ , o que significa que as rotas curtas com a presença de ônibus do BMVA tendem a ser melhores (quanto maior o  $z$ , maior a probabilidade do protocolo escolher rotas considerando apenas os ônibus pertencente ao BMVA). Além disso, nota-se que a redução do desempenho global (a partir de 25 veículos) é um comportamento padrão do protocolo DSDV (DUA et al., 2012).

Observa-se na Figura 44 que a sobrecarga do protocolo de roteamento aumenta com o número de veículos para todos os casos. Quando o BMVA está presente, além de existir mais veículos, a disseminação das tabelas de roteamento ocorre por áreas maiores da rede, aumentando com isso a sobrecarga, mesmo com uma quantidade maior de pacotes de dados entregues. Quando o conjunto P-DSDV/BMVA está presente, a sobrecarga fica ainda maior, sendo que cada vez que uma rota é modificada por passar pelo BMVA, uma mensagem de atualização é imediatamente enviada na rede.

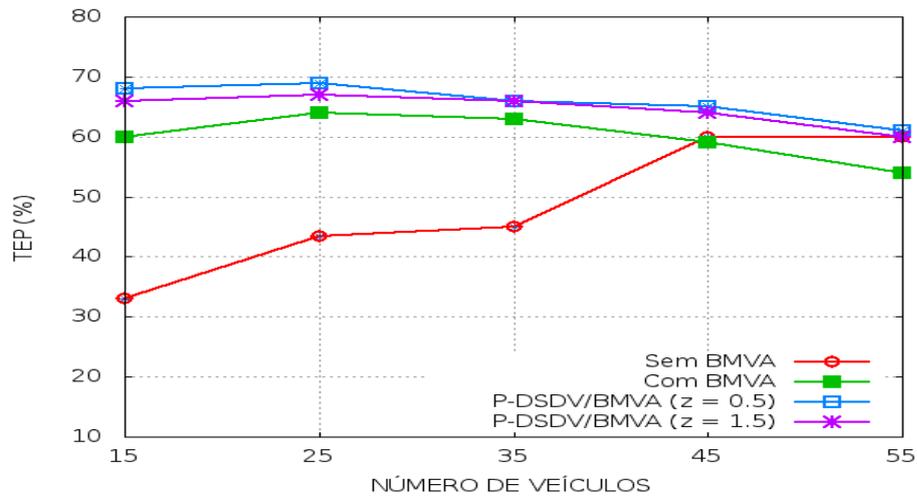


Figura 42: Cenário 1 - Taxa de entrega dos pacotes.

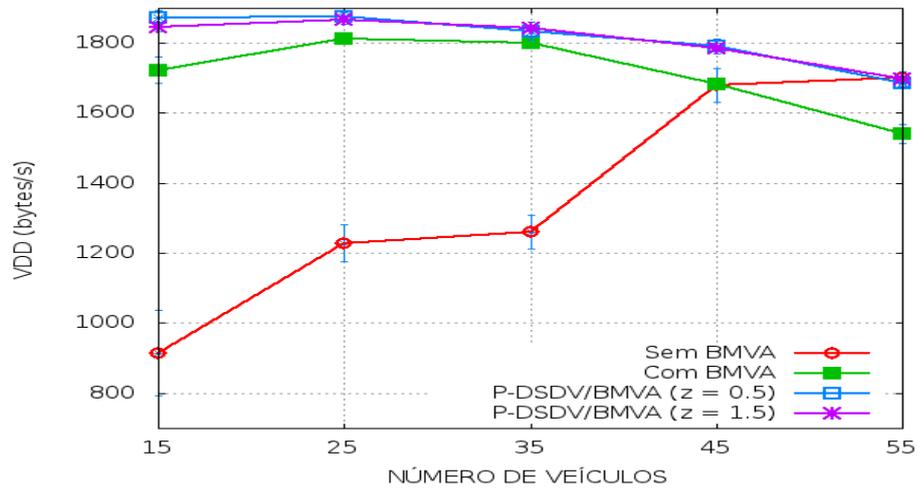


Figura 43: Cenário 1 - Vazão dos dados.

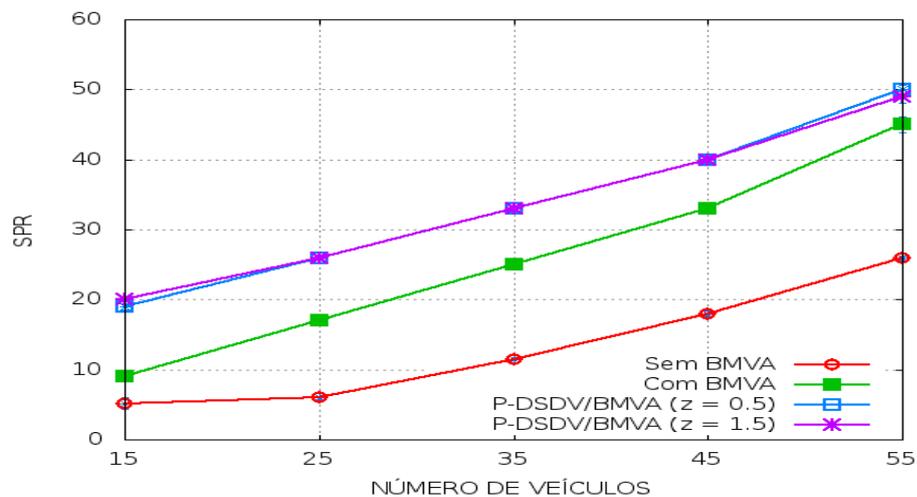
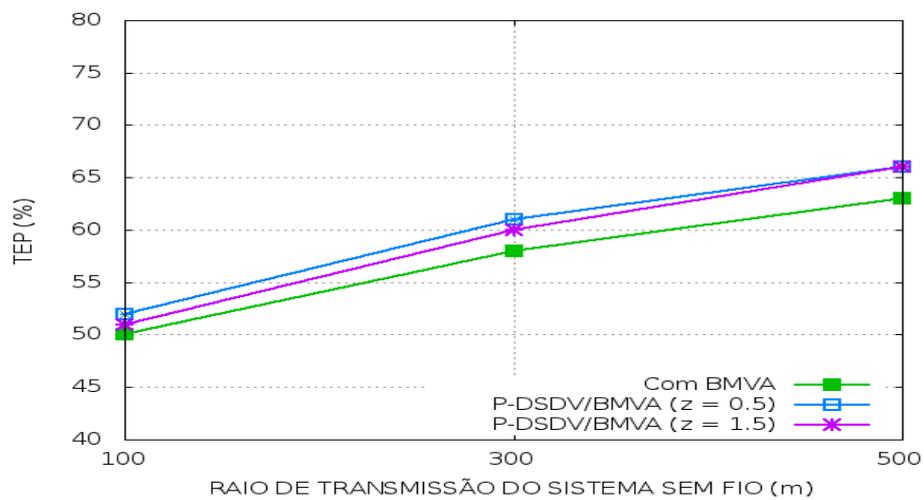
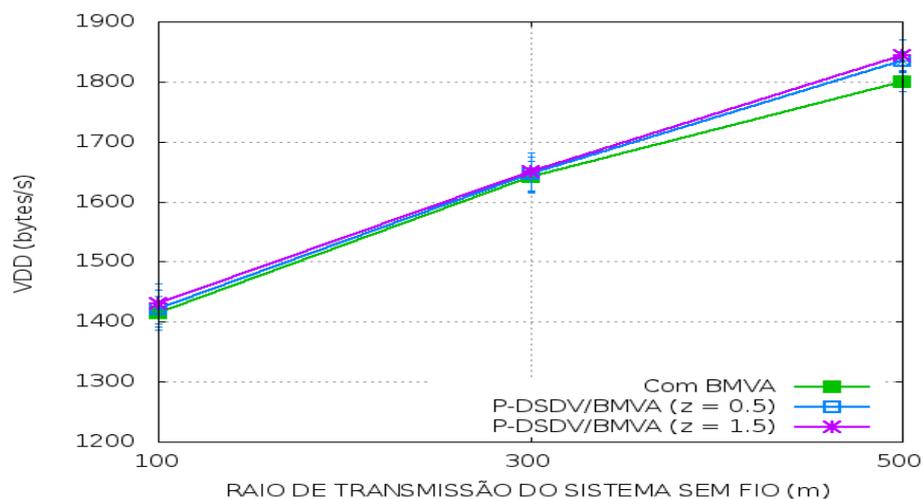


Figura 44: Cenário 1 - Sobrecarga do protocolo de roteamento.

As Figuras 45 e 46 apresentam os resultados obtidos para a taxa de entrega e a vazão versus o raio de alcance dos ônibus do BMVA (Cenário 2). Como o objetivo é verificar o comportamento da rede com a variação do raio de alcance dos ônibus do BMVA, não foram realizadas simulações sem o BMVA. É possível notar que a taxa de entrega e a vazão aumentam com o acréscimo do raio dos ônibus do BMVA. Este fato pode ser observado pois quanto maior o raio de alcance, maior é a conectividade no BMVA e, conseqüentemente, maior o aproveitamento do P-DSDV na seleção das rotas. Entretanto, onde o conjunto P-DSDV/BMVA foi utilizado, os resultados foram ainda melhores (a taxa de entrega e a vazão aumentam quando comparadas aos demais casos).



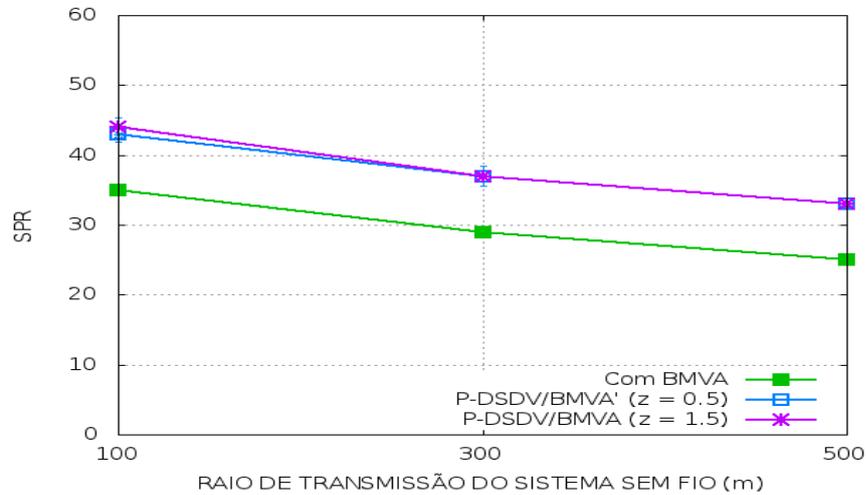
**Figura 45: Cenário 2 - Taxa de entrega dos pacotes.**



**Figura 46: Cenário 2 - Vazão dos dados.**

Observa-se na Figura 47 que a sobrecarga do protocolo de roteamento diminui com o acréscimo do raio dos ônibus do BMVA, pois quanto maior a conectividade, menor é a ne-

cessidade de atualização das tabelas de roteamento. Entretanto, conforme esperado, quando o BMVA ou o conjunto BMVA/P-DSDV estão presentes, a sobrecarga é maior.



**Figura 47: Cenário 2 - Sobrecarga do protocolo de roteamento.**

As Figuras 48 e 49 apresentam os resultados obtidos para a taxa de entrega e a vazão versus a taxa de transmissão (Cenário 3). Neste cenário comparam-se apenas as seguintes situações: com BMVA e P-DSDV/BMVA com  $z = 0.5$  (resultados anteriores já mostraram o comportamento da rede sem o BMVA e do parâmetro  $z$ ). Com o aumento da taxa de transmissão é possível notar que a taxa de entrega diminui (Fig. 48) e a vazão aumenta (Fig. 49). Contudo, o P-DSDV/BMVA obteve melhores resultados independentemente da taxa de transmissão. Este comportamento é observado uma vez que ao priorizar rotas confiáveis, o P-DSDV é capaz de manter o desempenho mesmo com uma sobrecarga extra de mensagens na rede. A taxa de entrega diminui, porque os descartes por congestionamento e *buffer overflow* aumentam acentuadamente.

Observa-se na Figura 50 que a sobrecarga do protocolo de roteamento diminui com o aumento da taxa de transmissão, e a sobrecarga extra gerada pelo P-DSDV tende a se tornar inexistente após 16 mensagens/s. Tal comportamento pode ser observado já que o aumento do número de mensagens de dados enviadas implica diretamente no aumento do número de mensagens de dados recebidas, mas não implica necessariamente no aumento das mensagens de roteamento.

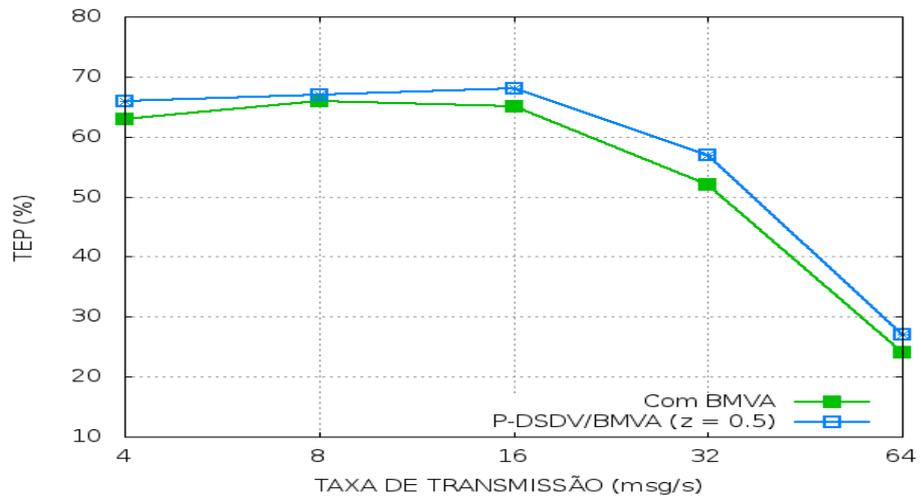


Figura 48: Cenário 3 - Taxa de entrega dos pacotes.

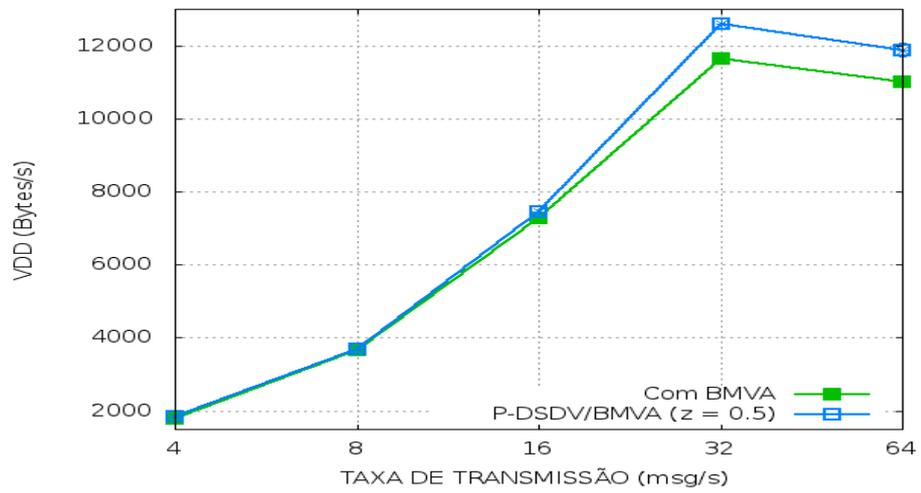


Figura 49: Cenário 3 - Vazão dos dados.

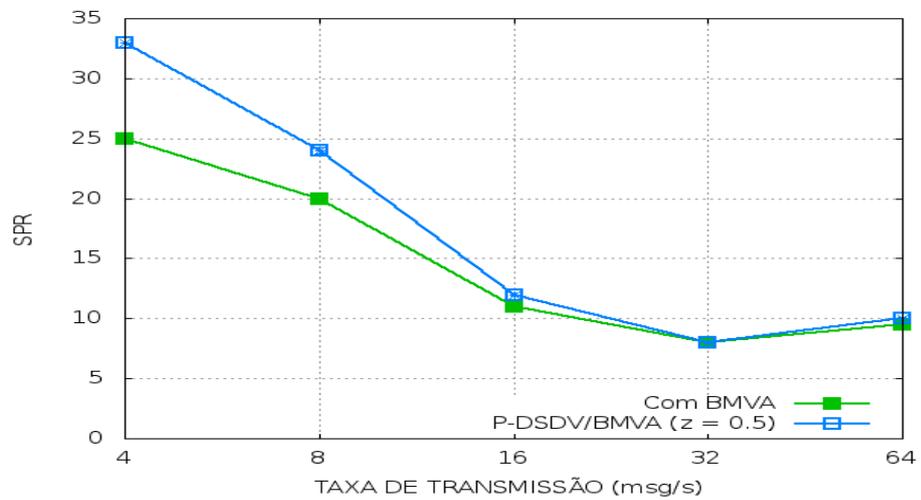


Figura 50: Cenário 3 - Sobrecarga do protocolo de roteamento.

Com estes resultados fica comprovado que o P-DSDV é capaz de atuar em conjunto com o BMVA para aumentar o desempenho da rede, melhorando as métricas taxa de entrega e vazão.

## 8 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho apresentou o BMVA e um conjunto de novos protocolos de roteamento. O BMVA é uma rede de transporte de dados ad hoc móvel formada pelos ônibus expressos da rede de transporte coletivo urbano da cidade de Curitiba, cuja função é prover conectividade e favorecer a troca de mensagens entre os veículos em uma determinada região. O conjunto de novos protocolos trata-se da adaptação de protocolos clássicos para explorar a conectividade fornecida pelo BMVA.

Para mostrar a viabilidade do BMVA em relação ao grau de conectividade inter-veicular dos ônibus, foram realizadas análises estatísticas com dados reais, o desenvolvimento de um modelo analítico e avaliações por meio de simulações. As análises estatísticas foram realizadas considerando ou não o sentido dos deslocamentos dos ônibus. Quando considerou-se o sentido com três ou mais linhas trafegando na via, atingiu-se um grau de conectividade inter-veicular superior a 95%. Quando desconsiderou-se o sentido, o grau de conectividade inter-veicular foi ainda maior, atingindo medidas superiores a 99%. Além disso, realizou-se o ajuste de curvas, cujo objetivo foi encontrar a distribuição de densidade de probabilidade que melhor represente a distância inter-veicular. Os resultados obtidos indicaram que a distribuição de Weibull não pode ser rejeitada, podendo caracterizar analiticamente a distância inter-veicular.

O desenvolvimento de um modelo analítico para a distância inter-veicular, considerando a superposição de linhas de ônibus, permitiu determinar analiticamente o número de linhas que se faz necessário para obter um certo grau de conectividade de acordo com o raio de transmissão do sistema sem fio. O referido modelo apontou, por exemplo, que são necessárias 7 linhas para obter-se um grau de conectividade de 96% quando o raio de transmissão é de 300m.

As simulações utilizando um gerador de tráfego veicular comprovaram a possibilidade de criar ambientes de testes que reproduzem as características observadas nos estudos experimentais e analíticos, mantendo um grau de conectividade necessário para o funcionamento do sistema.

Para a construção dos novos protocolos, três diferentes protocolos clássicos foram mo-

dificados, entre eles dois reativos (um de caminho único e outro de multicaminhos) e um proativo. Inicialmente foi apresentado o P-AODV, um protocolo proativo capaz de reconhecer o BMVA. Ele foi desenvolvido para atuar em conjunto com o *backbone* no momento em que os nós estão descobrindo as rotas, possuindo assim a capacidade de construí-las priorizando os ônibus. Neste protocolo, a origem conhece apenas um caminho para o destino, sendo que a métrica utilizada para construção deste caminho é limitada ao número de saltos, ou seja, apesar do protocolo considerar os nós do BMVA para a tomada de decisão de roteamento, estes nós só são ponderados caso o caminho formado seja o menor possível.

Em seguida foi apresentado o P-AOMDV, outro protocolo proativo capaz de reconhecer o BMVA. Tal protocolo pode descobrir diversas rotas entre a origem e o destino, permitindo assim que os nós tenham uma visão ampla da rede. Além disso, toma decisões de roteamento levando em consideração métricas únicas não atreladas ao número de saltos, como por exemplo, o número de ônibus pertencentes ao BMVA que determinada rota possui.

Por último, o protocolo P-DSDV foi apresentado, o qual possui a capacidade de construir rotas realizando uma decisão custo e benefício entre diferentes métricas, como por exemplo, o número de saltos para o destino e o número de ônibus pertencentes à rota. Neste protocolo, as mensagens trafegam por rotas que possuem um equilíbrio entre estas duas métricas. Além disso, este novo protocolo contribuiu significativamente para a integração de tecnologia entre protocolos de roteamento e o BMVA, tendo em vista que ele é reativo (outros protocolos testados com o BMVA são proativos).

Cada um dos novos protocolos pode ser utilizado para uma finalidade específica. O P-AODV e o P-AOMDV, por exemplo, podem ser utilizados para cenários de alta mobilidade, onde o objetivo é a rápida adaptação às variações das condições dos enlaces da rede. O P-AOMDV possui ainda a vantagem de possuir múltiplas rotas, sendo indicado para aplicações que necessitam minimizar a latência do processo de descoberta de rotas e a sobrecarga de roteamento. O P-DSDV, por manter as tabelas de rotas de todos os nós sempre atualizadas, é indicado para cenários de baixa densidade e mobilidade, onde as aplicações tenham como prioridade uma latência baixa.

Simulações de rede mostraram que o BMVA e os novos protocolos podem prover infraestrutura e aumentar o desempenho de métricas como a taxa de entrega e a vazão dos pacotes de dados.

As principais contribuições deste trabalho de doutorado são:

- Estruturação de uma rede de transporte de dados ad hoc móvel que preserva a inde-

pendência de infraestrutura utilizando linhas regulares de ônibus em operação em vias exclusivas;

- Estruturação de um *backbone* de roteamento ad hoc móvel que preserva a independência de infraestrutura utilizando linhas regulares de ônibus em operação em vias exclusivas;
- Estruturação de ambientes de simulação que refletem o comportamento real dos ônibus em operação em vias exclusivas;
- Descoberta da distribuição de densidade de probabilidade que melhor caracteriza a distância inter-veicular dos ônibus que circulam pelas vias exclusivas e expressas;
- Desenvolvimento de um modelo que permite determinar analiticamente o número de linhas de ônibus que se faz necessário para obter um certo grau de conectividade de acordo com o raio de transmissão do sistema sem fio;
- Estruturação e desenvolvimento de protocolos de roteamento que levam em consideração o *backbone* para tomar decisões de roteamento.

## 8.1 ARTIGOS PUBLICADOS E SUBMETIDOS

Nesta seção são descritos os artigos publicados e submetidos. Foram três artigos publicados e um submetido em periódicos internacionais com qualis entre B2 e A1 (área de avaliação engenharias IV). Além disso, um artigo foi publicado no Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais. Os artigos publicados e submetidos compreendem todas as fases deste trabalho, as quais são:

- Rede de transporte de dados *ad hoc* móvel (BMVA);
- O Protocolo P-AODV;
- O Protocolo P-AOMDV;
- O Protocolo P-DSDV.

### 8.1.1 ARTIGOS PUBLICADOS

- Improving VANETs Connectivity with a Totally Ad Hoc Living Mobile Backbone. *Journal of Computer Networks and Communications*, v. 2015, p. 1-14, 2015.

- Increasing Connectivity in VANETs Using Public Transport Backbones. Revista IEEE América Latina, v. 13, p. 3421-3431, 2015.
- P-AOMDV: Um protocolo de roteamento para comunicação V2V baseado na infraestrutura de transporte público. In: XXXIV Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais, 2016, Santarém-PA. (SBrT 2016), 2016. v. 1. p. 197-201.
- P-AOMDV: An improved routing protocol for V2V communication based on public transport backbones. Transactions on Emerging Telecommunications Technologies (Online), v. 4, p. 4, 2016.

### 8.1.2 ARTIGO SUBMETIDO

- The P-DSDV routing protocol for V2V communications over an Urban Mobile Backbone. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, outubro, 2016.

## 8.2 SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS

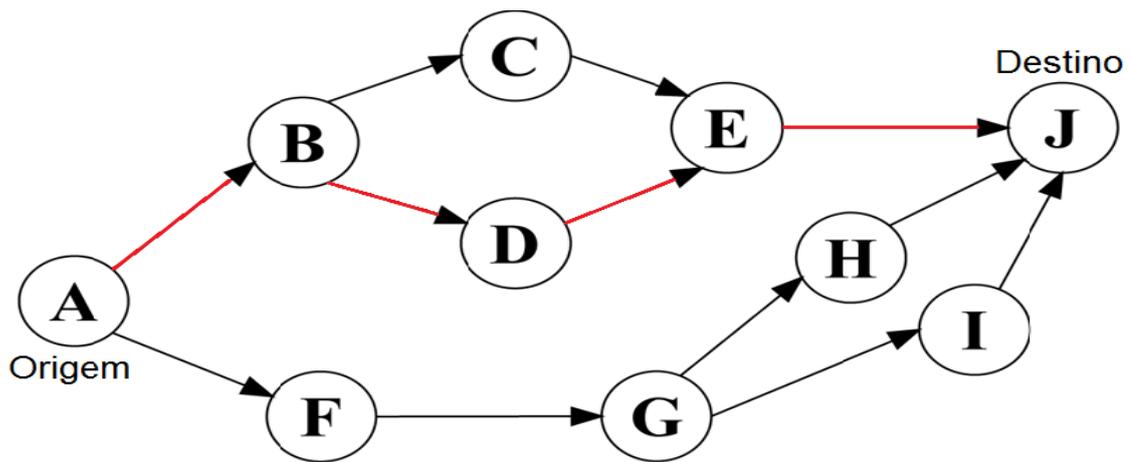
Existem diversos outros aspectos, não considerados nesta tese, que podem ser investigados em trabalhos futuros. Como sugestão, pode-se realizar estudos focados no aprimoramento do protocolo P-AOMDV, tornando-o capaz de tomar decisões de roteamento priorizando métricas de conectividade (P-AOMDV estendido).

### 8.2.1 P-AOMDV ESTENDIDO

Nas VANETs, a conectividade da rede é dependente dos seguintes fatores: densidade em determinado ponto, velocidade dos deslocamentos dos veículos, sentido dos deslocamentos e raio de alcance dos dispositivos móveis (RAYA; HUBAUX, 2005). Assim, da mesma forma que podem existir áreas nas quais um veículo mantém um grande número de conexões, também podem existir áreas com pouca ou nenhuma conectividade. Potanto, é importante a existência de protocolos capazes de tomar decisões de roteamento considerando a conectividade da rede.

O P-AOMDV estendido deve descobrir múltiplas rotas entre a origem e o destino, mas utilizar como primeira opção aquela que obtiver o maior grau de conectividade, as outras somente devem ser utilizadas caso a primeira apresente falha. A Figura 51 ilustra o cenário em estudo.

Como pode ser notado na Figura 51, o nó de origem  $A$  descobriu quatro rotas para o destino  $J$ , as quais são:  $(A - B - C - E - J)$ ,  $(A - B - D - E - J)$ ,  $(A - F - G - H - J)$  e



**Figura 51: Topologia do protocolo proposto.**

( $A - F - G - I - J$ ). Assume-se que a rota ( $A - B - D - E - J$ ) é a que possui o maior grau de conectividade, sendo desta maneira a rota que deve ser utilizada para a transferência dos dados.

Para que o protocolo possa descobrir a rota com o maior grau de conectividade, ele deve ser capaz de determinar em cada nó de cada rota uma métrica apropriada. As métricas consideradas podem envolver: densidade, velocidade, sentido, raio de alcance, tipo do nó.

Após, deve propagar este(s) valor(e)s até a origem, a qual vai atribuir um peso para cada rota, tendo como base os pesos parciais atribuídos para cada métrica(s) em cada um dos nós. O valor de cada métrica pode ser obtido ou calculado de uma maneira diferente, conforme descrito a seguir:

- **Densidade:** a densidade pode ser calculada de acordo com o número de pacotes de roteamento que um nó recebe e envia. Quanto mais pacotes de roteamento um nó receber e enviar, mais densa é a área da rede que ele está localizado.
- **Velocidade:** a velocidade instantânea pode ser obtida naturalmente de cada veículo, ou a velocidade média pode ser calculada durante certo intervalo de tempo. Nas VANETs, quanto maior a velocidade maior é a probabilidade da ocorrência de quebras de rotas.
- **Sentido:** os sentidos dos deslocamentos dos veículos podem determinar a sua orientação (norte, sul, leste, oeste, etc). De acordo com a orientação dos veículos, é possível determinar se os mesmos estão se aproximando ou se afastando e como consequência determinar se a conectividade está aumentando ou diminuindo. Em VANETs V2V, existe um grande desafio em determinar o sentido sem o uso de infraestrutura. Por isso, propõe-se que cada veículo tenha uma bússola junto ao dispositivo sem fio, a qual determinará sua direção.
- **Raio de alcance:** o raio de alcance de cada veículo pode ser obtido pela camada de

roteamento por meio da camada de enlace. Cada veículo pertencente à rede pode ter um dispositivo sem fio com um raio de alcance diferente. Quanto maior o raio de alcance, menor é a probabilidade da rota ser quebrada.

- **Tipo do nó:** existem dois tipos de nós identificados na rede, os comuns e os pertencentes ao BMVA, bastando desta forma capturar o seu tipo.

## REFERÊNCIAS

- AHMED, S.; KANERE, S. S. Skvr: Scalable knowledge-based routing architecture for public transport networks. In: **Proceedings of the 3rd International Workshop on Vehicular Ad Hoc Networks**. 2006. p. 92 – 93.
- ALVES, J. J.; ALBINI, L. C. P. Um protocolo de roteamento resistente a ataques blackhole sem detecção de nós maliciosos. **XXX Simpósio Brasileiro de Telecomunicações, Brasília**, 2012.
- ALVES, R. S. et al. Uma análise experimental da capacidade de redes ad hoc veiculares. In **XXVI Simpósio Brasileiro de Telecomunicações, (SBrT'08)**, 2008.
- BANGNAN, X.; SVEN, H. The role of ad hoc networking in future wireless communications. **International Conference on Communication Technology**, v. 02, p. 1353 – 1358, 2003.
- BARBA, C. T. et al. Smart city for vanets using warning messages, traffic statistics and intelligent traffic lights. **Intelligent Vehicles Symposium, IEEE**, p. 902–907, 2012.
- BENSLIMANE, A. Optimized dissemination of alarm messages in vehicular ad-hoc networks (vanet). In: **High Speed Networks and Multimedia Communications**. 2004. v. 3079, p. 655–666.
- BETTSTETTER, C. On the minimum node degree and connectivity of a wireless multihop network. In: **Proceedings of the 3rd ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking & Computing**. 2002. p. 80 – 91.
- BISHT, A.; KUMAR, B.; MISHRA, S. Efficiency evaluation of routing protocols for vehicular ad-hoc networks using city scenario. In: **Computer Communication and Informatics (ICCCI), 2012 International Conference on**. 2012. p. 1 – 7.
- BLUM, J.; ESKANDARIAN, A.; HOFFMAN, L. Intelligent transportation systems. **IEEE. Performance characteristics of inter-vehicle ad hoc networks**, v. 1, p. 114–119, 2003.
- BUREAU, U. **Topologically integrated geographic encoding and referencing**. 2015. Disponível em: <[www.census.gov/geo/www/tiger/](http://www.census.gov/geo/www/tiger/)>. Acesso em: janeiro, 2015.
- BURGESS, J. et al. Maxprop: Routing for vehicle-based disruption-tolerant networks. In: **INFOCOM 2006. 25th IEEE International Conference on Computer Communications. Proceedings**. 2006. p. 1–11.
- BUSSAB, O. D. W.; MORETTIN, A. P. **Estatística Básica, 5th. Saraiva**. 2006.
- CAMP, T.; BOLENG, J.; DAVIES, V. A survey of mobility models for ad hoc network research. **Wireless communications mobile computing (WCMC): special issue on mobile ad hoc networking: research, trends and applications**, v. 2, p. 483 – 502, 2002.

- CHEN, Y. et al. A cross-layer AOMDV routing protocol for V2V communication in urban vanet. **2009 Fifth International Conference on Mobile Ad-hoc and Sensor Networks**, p. 353 – 359, 2009.
- CLAUSEN, T.; JACQUET, P. Optimized link state routing protocol (OLSR). **RFC 3626, IETF Network Working Group**, 2003.
- COX, D. R.; SMITH, L. W. On the superposition of renewal processes. **Biometrika**, v. 41, p. 91–99, 1954.
- DUA, M. et al. Performance evaluation of AODV, DSR, DSDV mobile ad-hoc protocols on different scenarios: An analytical review. **International Journal of Advances in Computing and Information Technology**, p. 26 – 45, 2012.
- DUNN, P. F. **The Art of Computer Systems Performance Analysis**. : 1st. McGraw-Hill, 2004.
- FIORE, M. et al. Understanding vehicular mobility in network simulation. In: **Mobile Adhoc and Sensor Systems, 2007. MASS 2007. IEEE International Conference**. 2007. p. 1 – 6.
- GAST, M. S. **802.11 Wireless Networks**. : O'Really, 2002.
- HARRI, J.; FILALI, F.; BONNET, C. Mobility models for vehicular ad hoc networks: a survey and taxonomy. **Communications Surveys Tutorials, IEEE**, v. 11, p. 19 – 41, 2009.
- HOQUE, M.; HONG, X.; DIXON, B. Analysis of mobility patterns for urban taxi cabs. In: **Computing, Networking and Communications (ICNC), 2012 International Conference on**. 2012. p. 756 – 760.
- HYNDMAN, R. J.; FAN, Y. Amer. stat. 50. **Sample Quantiles in Statistical Packages**, p. 361 – 365, 1996.
- IEEE. Urban multi-hop broadcast protocol for intervehicle communication systems wireless lan medium access control (mac) and physical layer (phy) specifications. **The Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). ISO/IEC 8802-11:1999(E)**, 1999.
- IEEE. Draft amendment for wireless access in vehicular environments (WAVE). **IEEE Std. P802.11p/D3.0**, 2007.
- JAIN, R. **The Art of Computer Systems Performance Analysis**. : NewYork, NY, USA: John Wiley and Sons, 1991.
- JIANG, D.; DELGROSSI, L. IEEE 802.11p: Towards an international standard for wireless access in vehicular environments. **IEEE Vehicular Technology Conference (VTC-Spring)**, p. 2036 – 2040, 2008.
- JOCHLE, T. et al. Efficiency analysis of geocast target region specifications for vanet applications. **Vehicular Networking Conference (VNC), IEEE**, p. 250 – 257, 2012.
- KARNADI, F.; MO, Z. H.; LAN, K. chan. Rapid generation of realistic mobility models for vanet. In: **Wireless Communications and Networking Conference, 2007.WCNC 2007. IEEE**. 2007. p. 2506 – 2511.

- KORKMAZ, G. et al. Urban multi-hop broadcast protocol for inter-vehicle communication systems. In: **Proceedings of the 1st ACM International Workshop on Vehicular Ad Hoc Networks**. 2004. p. 76 – 85.
- KRAJZEWICZ, D. et al. Sumo (simulation of urban mobility), an open-source traffic simulation. **4th Middle East Symposium on Simulation and Modelling (MESM2002)**, p. 183 – 187, 2002.
- LI, C.; WANG, L. Z. M. Connectivity-sensed routing protocol for vehicular ad hoc networks: Analysis and design. **International Journal of Distributed Sensor Networks**, v. 2015, n. 649037, 2015.
- LI, F.; WANG, Y. Routing in vehicular ad hoc networks: A survey. **Vehicular Technology Magazine, IEEE**, v. 2, n. 2, p. 12–22, 2007.
- LIU, G. et al. A routing strategy for metropolis vehicular communications. **Pringer Berlin Heidelberg**, p. 134–143, 2004.
- LIU, L.; WANG, Z.; JEHNG, W.-K. A geographic source routing protocol for traffic sensing in urban environment. In: **Automation Science and Engineering, 2008. CASE 2008. IEEE International Conference on**. 2008. p. 347–352.
- LIU, N. et al. PVA in VANETs: Stopped cars are not silent. **IEEE, INFOCOM**, p. 431 – 435, 2011.
- MAHAJAN, A. et al. Urban mobility models for vanets. **2nd workshop on next generation wireless networks**, 2007.
- MAOWAD, H.; SHAABAN, E. Efficient routing protocol for vehicular ad hoc networks. **Networking, Sensing and Control (ICNSC), 9th IEEE International Conference**, p. 209–215, 2012.
- MARINA, M. K.; DAS, S. R. Ad hoc on-demand multipath distance vector routing. **SIGMOBILE Mob. Comput. Commun. Rev.**, v. 6, n. 3, p. 92 – 93, 2002.
- MEYER, P. L. **Probabilidade - Aplicada a Estatística. 1st. S.A.** 1999.
- MOHAMMAD, A. H.; XIAOYAN, H.; BRANDON, D. Efficient multi-hop connectivity analysis in urban vehicular networks. **Vehicular Communications**, v. 1, n. 2, p. 78 – 90, 2014.
- NAMBOODIRI, V.; GAO, L. Prediction-based routing for vehicular ad hoc networks. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, p. 2332 – 2345, 2007.
- NAUMOV, V.; GROSS, T. Connectivity-aware routing (car) in vehicular ad-hoc networks. In: **INFOCOM 2007. 26th IEEE International Conference on Computer Communications. IEEE**. 2007. p. 1919–1927.
- NS2. **The network simulator**. 2015. Disponível em: <<http://www.isi.edu/nsnam>>. Acesso em: janeiro, 2015.
- PERKINS, C. E.; BHAGWAT, P. Highly dynamic destination-sequenced distance-vector routing (DSDV) for mobile computers. **SIGCOMM Comput. Commun. Rev.**, v. 24, n. 4, p. 234 – 244, 1994.

- PERKINS, C. E.; ROYER, E. M. Ad-hoc on-demand distance vector routing. **Proceedings of the Second IEEE Workshop on Mobile Computer Systems and Applications**, p. 90 – 100, 1999.
- PIÓRKOWSKI, M. et al. Trans: Realistic joint traffic and network simulator for vanets. **SIG-MOBILE Mob. Comput. Commun. Rev.**, v. 12, p. 31–33, 2008.
- RAO, S. et al. GPSR-L: Greedy perimeter stateless routing with lifetime for VANETs. In: **ITS Telecommunications, 2008. ITST 2008. 8th International Conference on**. 2008. p. 299–304.
- RAYA, M.; HUBAUX, J.-P. The security of vehicular ad hoc networks. In: **Proceedings of the 3rd ACM Workshop on Security of Ad Hoc and Sensor Networks**. 2005. p. 11 – 21.
- ROYER, E. M.; CHAI-KEONG., T. Review of current routing protocols for ad hoc mobile wireless networks. **IEEE. Personal Communications**, p. 46 – 55, 1999.
- SOMMER, C.; GERMAN, R.; DRESSLER, F. Bidirectionally coupled network and road traffic simulation for improved ivc analysis. **Mobile Computing, IEEE Transactions**, v. 10, p. 3–15, 2011.
- TALEB, T. et al. A stable routing protocol to support its services in vanet networks. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, v. 56, n. 6, p. 3337 – 3347, 2007.
- TALOOKI, V. N.; ZIARATI, K. Performance comparison of routing protocols for mobile ad hoc networks. **Asia Pacific Conference, APCC' 06**, p. 1 – 5, 2006.
- TAYLOR, J. R. **An Introduction to Error Analysis: The Study of Uncertainties in Physical Measurements**. : University Science Books, 1997.
- TOOR, Y. et al. Vehicle ad hoc networks: applications and related technical issues. **IEEE Communications Surveys Tutorials**, v. 10, n. 3, p. 74 – 88, 2008.
- URBS. **URBS Curitiba**. 2015. Disponível em: <[www.urbs.curitiba.pr.gov.br](http://www.urbs.curitiba.pr.gov.br)>. Acesso em: janeiro, 2015.
- UZCATEGUI, R.; MARUM, G. WAVE: A tutorial. **Communications Magazine, IEEE**, v. 47, p. 126 – 133, 2009.
- VANETMOBISIM. **VanetMobiSim**. 2015. Disponível em: <<http://vanet.eurecom.fr>>. Acesso em: janeiro, 2015.
- VIRIYASITAVAT, W.; TONGUZ, O.; BAI, F. Network connectivity of vanets in urban areas. In: **Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks, 2009. SECON '09. 6th Annual IEEE Communications Society Conference on**. 2009. p. 1 – 9.
- WISITPONGPHAN, N. et al. On the routing problem in disconnected vehicular ad hoc networks. **IEEE, INFOCOM**, p. 2291 – 2295, 2007.
- XIANG, Z.; JIAN, W.; JIANG, W. An improved AOMDV routing protocol for V2V communication. **Intelligent Vehicles Symposium**, p. 1115 – 1120, 2009.
- XU, F. et al. Utilizing shared vehicle trajectories for data forwarding in vehicular networks. **IEEE, INFOCOM**, p. 441 – 445, 2011.

ZHAO, J.; CAO, G. Vadd: Vehicle-assisted data delivery in vehicular ad hoc networks. In: **INFOCOM 2006. 25th IEEE International Conference on Computer Communications. Proceedings.** 2006. p. 1–12.

## APÊNDICE A – ESTUDOS EXPERIMENTAIS

Os estudos experimentais promovem a caracterização da distância inter-veicular com a finalidade de conhecer a conectividade entre os ônibus no BMVA. A caracterização desta distância é alcançada por uma análise espaço-temporal dos movimentos reais dos ônibus. A análise temporal é realizada em relação a um dado instante de tempo ( $t_j$ ), no qual pode ocorrer ou não o deslocamento espacial do ônibus avaliado. O deslocamento espacial está relacionado com as posições ocupadas pelos ônibus, baseadas em um sistema de coordenadas geográficas (latitude, longitude e altitude), no instante de tempo ( $t_j$ ).

Com as posições geográficas dos ônibus observadas durante o intervalo de tempo ( $\Delta t$ ), pode-se calcular o valor das distâncias entre eles para diversos instantes de tempo pré-estabelecidos. Assim, obtidas as posições geográficas de dois ônibus  $P1 = (\theta_1, \lambda_1)$  e  $P2 = (\theta_2, \lambda_2)$  em coordenadas de latitude  $\theta$  e longitude  $\lambda$  sobre o globo terrestre de raio  $R$ , durante o intervalo de tempo  $\Delta t = (t_n - t_0)$ , pode-se calcular a distância  $d_\Delta$  entre eles para os instantes de tempo  $(t_0, \dots, t_n)$  por meio da Equação 11 (HOQUE et al., 2012).

$$d_\Delta = R \cdot \cos^{-1}[\sin(\theta_1)\sin(\theta_2) + \cos(\theta_1)\cos(\theta_2)\cos(\lambda_1 - \lambda_2)] \quad (11)$$

Caso as informações sobre as coordenadas geográficas observadas durante o intervalo de tempo ( $\Delta t$ ) sejam atualizadas de forma independente para cada ônibus, pode ocorrer um erro no cálculo da distância  $d_\Delta$ . Assim, se as coordenadas geográficas de um ônibus  $L$  são enviadas no instante de tempo ( $t_j$ ) e a de seu vizinho  $M$  no instante de tempo ( $t_{j+k}$ ), pode ocorrer um deslocamento de  $L$  durante o intervalo de tempo  $((t_{j+k}) - (t_j))$ , que deve ser previsto no cálculo da distância inter-veicular.

Para obter os dados reais a fim de realizar a caracterização da distância inter-veicular, selecionou-se duas áreas representativas com 2 quilômetros de extensão de uma via expressa (Av. Marechal Floriano Peixoto), na cidade de Curitiba. A primeira área (Área 1) corresponde a uma região central, e a segunda área (Área 2), corresponde a uma região periférica (bairro)

distante dos terminais de ônibus. A Companhia de Urbanização da Cidade de Curitiba forneceu acesso as informações sobre as coordenadas geográficas de todos os ônibus, atualizadas independentemente para cada um deles, em intervalos de dois minutos. Tais informações foram coletadas durante todo o período de circulação, que se estende de 05h30min às 23h59min. Seguindo o modelo do transporte urbano de Curitiba, os ônibus foram agrupados por linhas, as quais operam sempre em uma via pré-determinada.

As observações foram realizadas por cinco dias úteis consecutivos em fevereiro de 2014, considerado e desconsiderando o sentido dos movimentos dos ônibus. Os horários de coletas de dados foram divididos em quatro classes com base nos grupos de horários propostos pela URBS (URBS, 2015) – 05h:30min às 08h:30min (faixa horária 1), 08h:31min às 16h:30min (faixa horária 2), 16h:31min às 19h:30min (faixa horária 3), e 19h:31min às 23h:59min (faixa horária 4) – pois como pode ser observado na Tabela 17, de acordo com a faixa horária existe um número fixo de ônibus que atuam nas linhas que circulam na via selecionada. Nota-se que a caracterização da distância inter-veicular no BMVA pode ser avaliada de acordo com o sentido dos deslocamentos, número de linhas e horário de circulação. Na sequência são apresentadas análises envolvendo todos estes elementos.

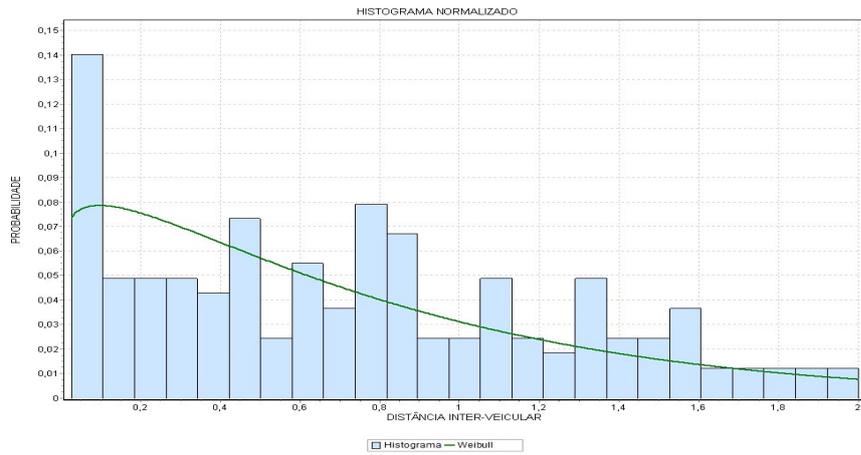
**Tabela 17: Número de ônibus que atuam em cada uma das faixas horárias.**

<b>Linha</b>	<b>Num. Ônibus (faixa horária 1)</b>	<b>Num. Ônibus (faixa horária 2)</b>	<b>Num. Ônibus (faixa horária 3)</b>	<b>Num. Ônibus (faixa horária 4)</b>
500	14	18	11	10
502	15	24	11	16
503	12	21	12	12
602	11	21	14	13
550	14	18	14	10
206	12	24	12	11
505	13	21	13	12
507	14	21	12	8
508	15	18	11	10

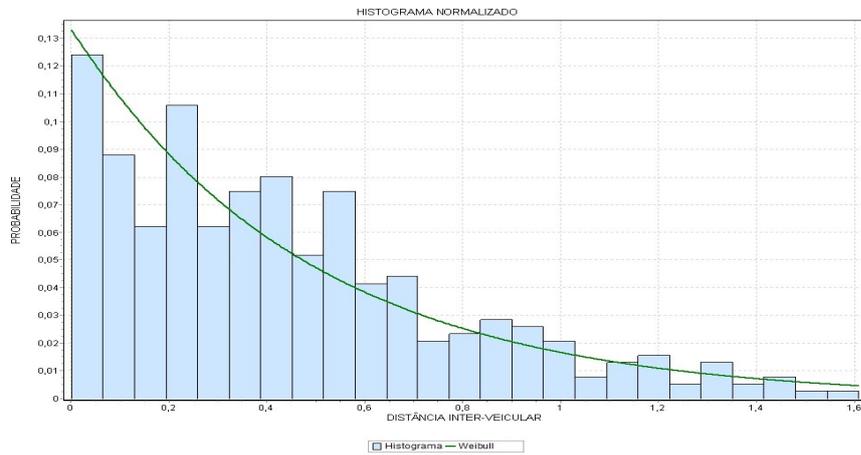
#### A.1 ANÁLISE CONSIDERANDO O SENTIDO DO MOVIMENTO DOS ÔNIBUS

As Figuras 52, 53, 54 e 55 apresentam a distância inter-veicular na forma de histogramas normalizados para *Área 2*. Os dados são apresentados com uma, três, cinco e sete linhas de ônibus trafegando em um único sentido da via, na faixa de horário das 16h31m às 19h30m.

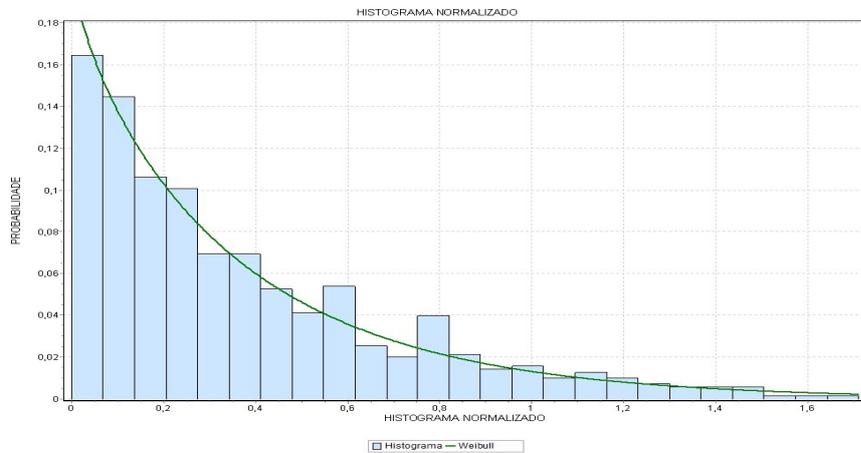
Nota-se nos histogramas normalizados (Figuras 52, 53, 54 e 55) que à medida que cresce o número de linhas que circulam na via reduz-se a distância inter-veicular. Com uma



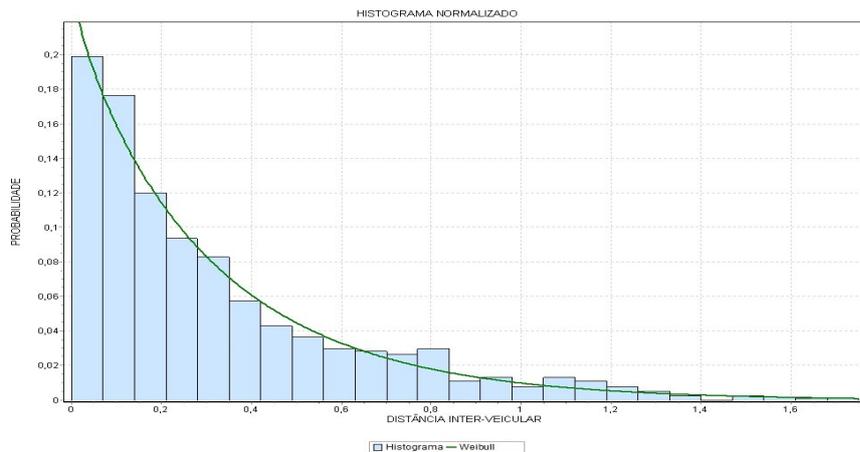
**Figura 52:** Histograma normalizado para a distância inter-veicular com uma linha, considerando o sentido dos movimentos dos ônibus, na faixa de horário das 16h31m às 19h30m.



**Figura 53:** Histograma normalizado para a distância inter-veicular com três linhas, considerando o sentido dos movimentos dos ônibus, na faixa de horário das 16h31m às 19h30m.



**Figura 54:** Histograma normalizado para a distância inter-veicular com cinco linhas, considerando o sentido dos movimentos dos ônibus, na faixa de horário das 16h31m às 19h30m.



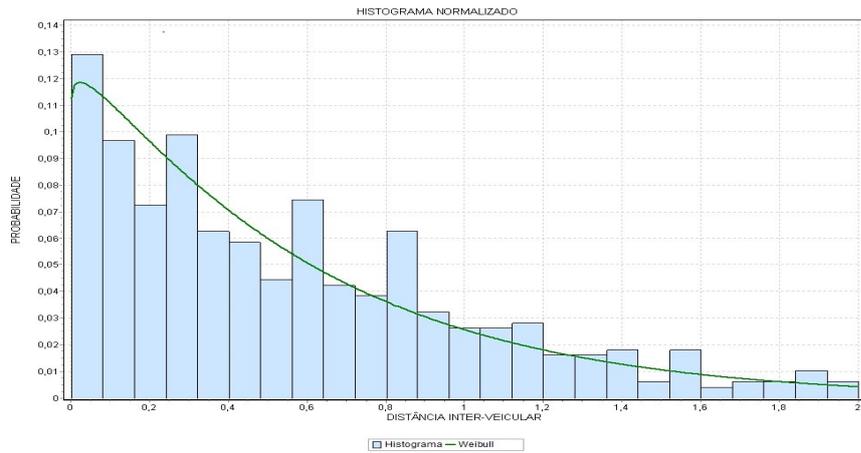
**Figura 55: Histograma normalizado para a distância inter-veicular com sete linhas, considerando o sentido dos movimentos dos ônibus, na faixa de horário das 16h31m às 19h30m.**

única linha (Figura 52), observa-se porcentagem significativa de ônibus com distâncias maiores que um quilômetro (aproximadamente 28%). Nos histogramas com, três, cinco e sete linhas (Figuras 53, 54 e 55), percebe-se gradativamente uma diminuição das distâncias maiores que um quilômetro, chegando a aproximadamente 5% com sete linhas. Em todos os casos observa-se também a curva da densidade de probabilidade teórica que melhor caracteriza o comportamento da distância inter-veicular (item B.3).

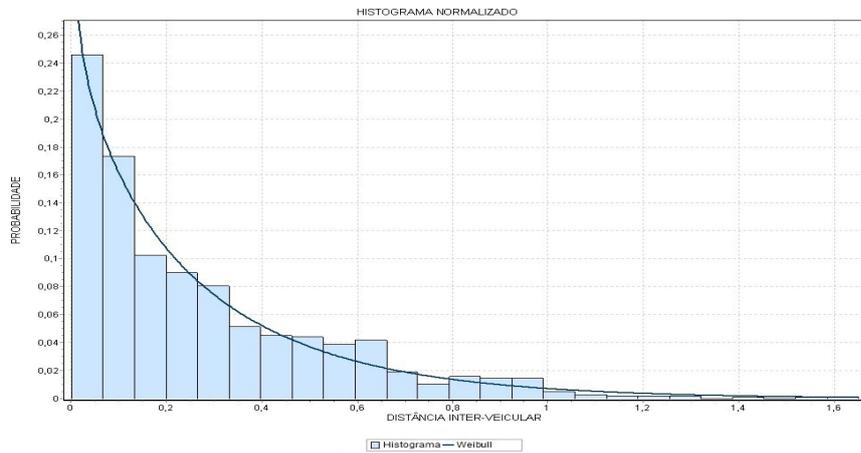
## A.2 ANÁLISE DESCONSIDERANDO O SENTIDO DO MOVIMENTO DOS ÔNIBUS

As Figuras 56, 57, 58 e 59 apresentam a distância inter-veicular na forma de histogramas normalizados para *Área 2*. Os dados são apresentados com uma, três, cinco e sete linhas circulando nos dois sentidos da via, nas faixas de horários das 16h31m às 19h30m.

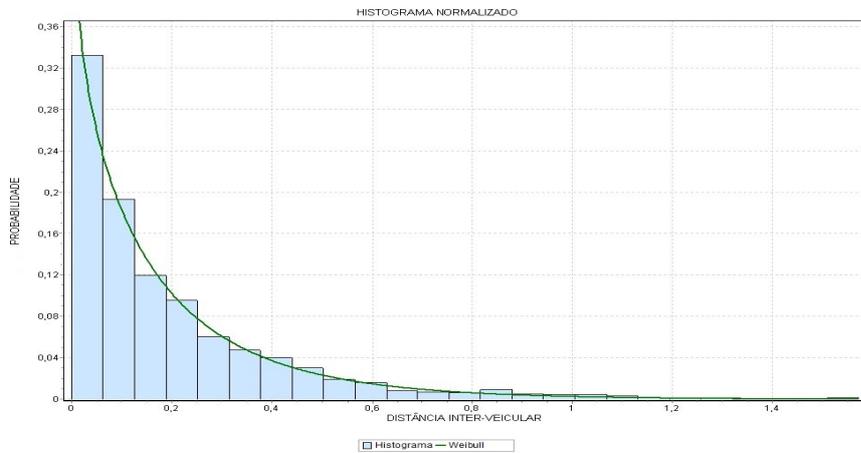
Nota-se nos histogramas normalizados (Figuras 56, 57, 58 e 59) que à medida que cresce o número de linhas que circulam na via reduz-se a distância inter-veicular. Com uma única linha (Figura 56), observa-se que aproximadamente 17% das distâncias são maiores que um quilômetro. Nos histogramas com três, cinco e sete linhas (Figuras 57, 58 e 59), percebe-se gradativamente uma diminuição das distâncias maiores que um quilômetro, chegando a aproximadamente 1% com sete linhas. Observa-se ainda que a distância inter-veicular média reduz quando se desconsidera o sentido de movimentação dos veículos, como esperado.



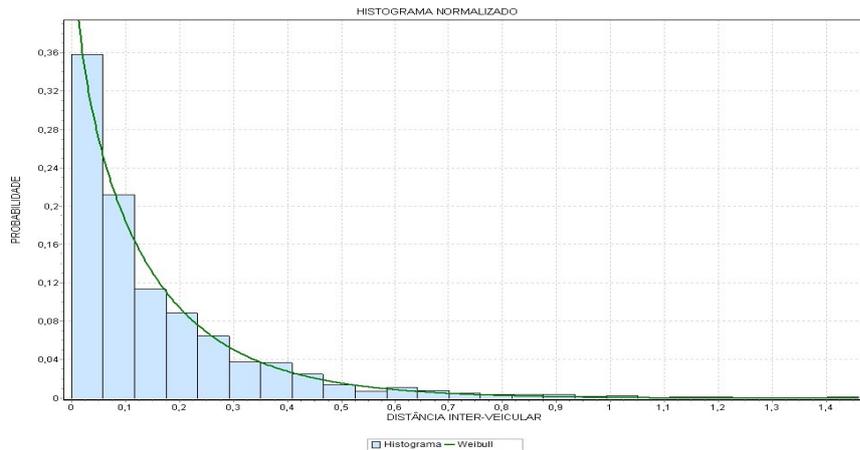
**Figura 56: Histograma normalizado para a distância inter-veicular com uma única linha, desconsiderando o sentido dos movimentos dos ônibus, na faixa de horário das 16h31m às 19h30m.**



**Figura 57: Histograma normalizado para a distância inter-veicular com três linhas, desconsiderando o sentido dos movimentos dos ônibus, na faixa de horário das 16h31m às 19h30m.**



**Figura 58: Histograma normalizado para a distância inter-veicular com cinco linhas, desconsiderando o sentido dos movimentos dos ônibus, na faixa de horário das 16h31m às 19h30m.**

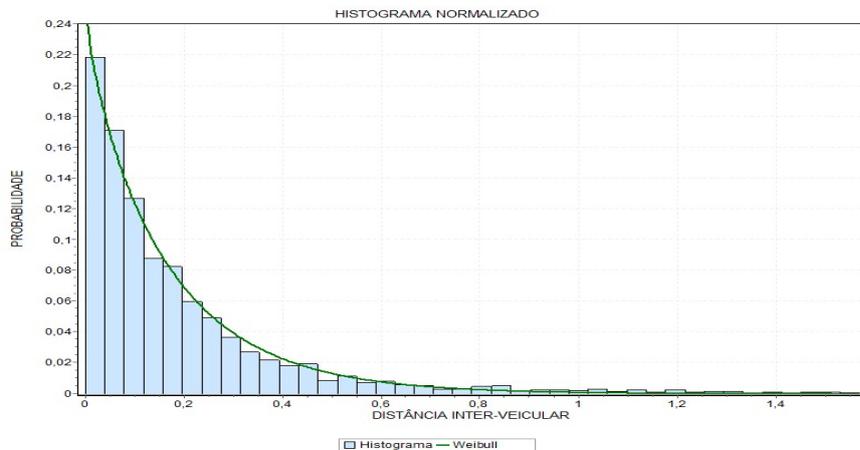


**Figura 59:** Histograma normalizado para a distância inter-veicular com sete linhas, desconsiderando o sentido dos movimentos dos ônibus, na faixa de horário das 16h31m às 19h30m.

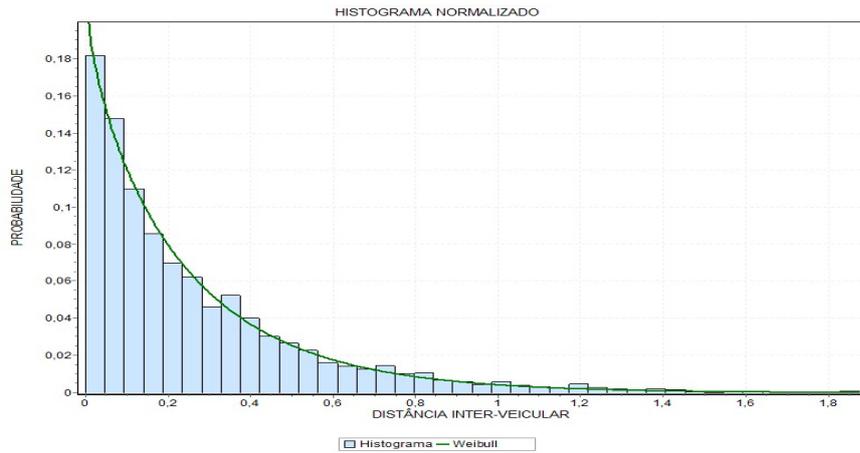
### A.3 ANÁLISE CONSIDERANDO A FAIXA DE HORÁRIO

As Figuras 60, 61, 62 e 63 apresentam a distância inter-veicular na forma de histogramas normalizados para *Área I*. Os dados são apresentados com três linhas circulando nos dois sentidos da via nas seguintes faixas de horários: 05h30min às 08h30min, 08h31min às 16h30min, 16h31min às 19h30min e 19h31min às 23h59min.

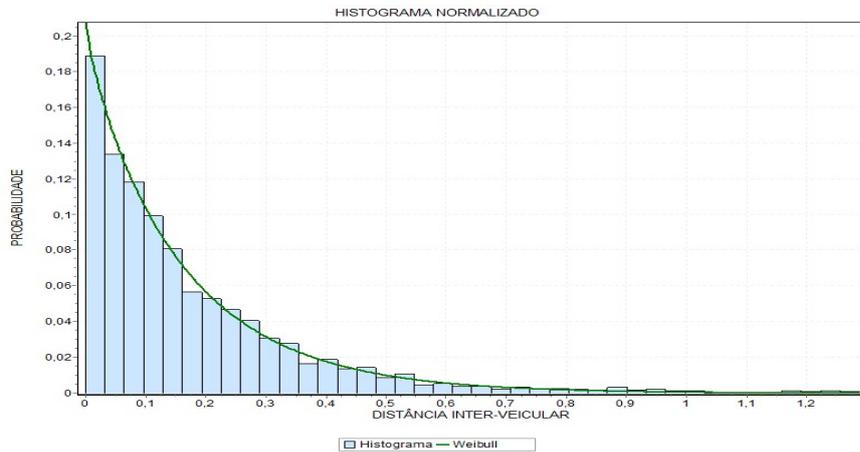
Nota-se nos histogramas normalizados (Figuras 60, 61, 62 e 63), que em todas as faixas de horários as distâncias inter-veiculares são, em sua maioria, menores do que um quilômetro. No pior caso (Figura 63) e no melhor caso (Figura 62), apenas 4,8% e 0,47% das distâncias são, respectivamente, maiores do que um quilômetro.



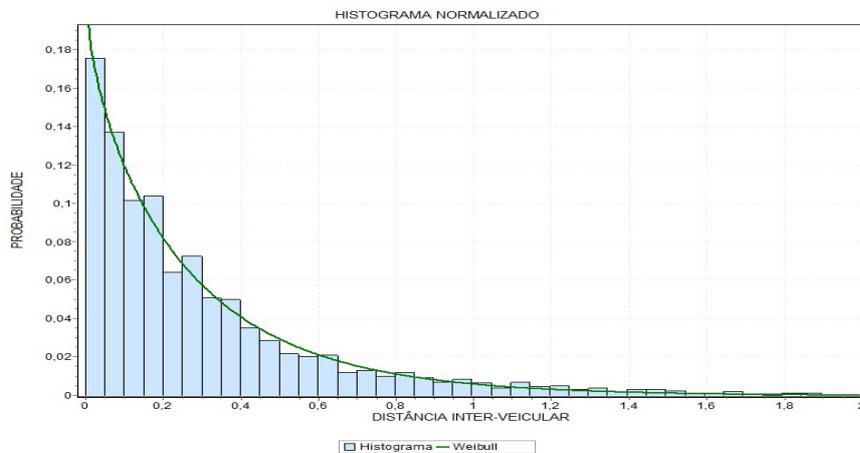
**Figura 60:** Histograma normalizado para a distância inter-veicular com três linhas, desconsiderando o sentido dos movimentos dos ônibus, na faixa de horário das 05h30m às 08h30m.



**Figura 61:** Histograma normalizado para a distância inter-veicular com três linhas, desconsiderando o sentido dos movimentos dos ônibus, na faixa de horário das 08h31m às 16h30m.



**Figura 62:** Histograma normalizado para a distância inter-veicular com três linhas, desconsiderando o sentido dos movimentos dos ônibus, na faixa de horário das 16h31m às 19h30m.



**Figura 63:** Histograma normalizado para a distância inter-veicular com três linhas, desconsiderando o sentido dos movimentos dos ônibus, na faixa de horário das 19h31m às 23h59m.

## APÊNDICE B – ESTUDO ANALÍTICO

O estudo analítico tem como objetivo realizar análises estatísticas dos dados reais para a autocorrelação, média e variância da distância inter-veicular, além de determinar o grau de conectividade e fazer o ajuste de curvas.

### B.1 MÉDIA, VARIÂNCIA E GRAU DE CONECTIVIDADE

Nesta seção são apresentados os cálculos para a média e variância das distâncias inter-veiculares e para o grau de conectividade (Tabelas 18 e 19). Os cálculos são realizados para um conjunto representativo dos histogramas exibidos nas sessões A.1, A.2. Os histogramas selecionados são os que apresentam resultados para uma, duas, três, cinco e sete linhas, considerado e desconsiderando o sentido dos movimentos dos ônibus (ambos), na faixa de horário das 16h31m às 19h30m.

**Tabela 18: Resultado da Média, Variância e o Grau de conectividade considerando o sentido dos movimentos dos ônibus.**

<b>Número de Linhas</b>	<b>Média (km)</b>	<b>Variância (km<sup>2</sup>)</b>	<b>Grau de conectividade (%)</b>
Uma	0,77	0,49	71,5
Três	0,47	0,22	91,75
Cinco	0,38	0,16	93,75
Sete	0,32	0,11	94,86

Notam-se em ambas as tabelas que à medida que cresce o número de linhas que circulam na via reduz-se a distância média e aumenta-se o grau de conectividade entre os ônibus do BMVA. Na Tabela 18 é possível verificar que a partir de três linhas trafegando na via, a distância média entre os ônibus fica abaixo dos 500 metros e o grau de conectividade passa dos 91%. Na Tabela 19 os valores são ainda melhores, com três ou mais linhas trafegando, a distância média entre os ônibus fica abaixo de 300 metros e o grau de conectividade passa dos 98%, chegando 99,33% com sete linhas.

**Tabela 19: Resultado da Média, Variância e o Grau de conectividade desconsiderando o sentido dos movimentos dos ônibus.**

Número de Linhas	Média (km)	Variância (km <sup>2</sup> )	Grau de conectividade (%)
Uma	0,56	0,31	83,5
Três	0,27	0,07	98,74
Cinco	0,18	0,04	99,01
Sete	0,15	0,02	99,33

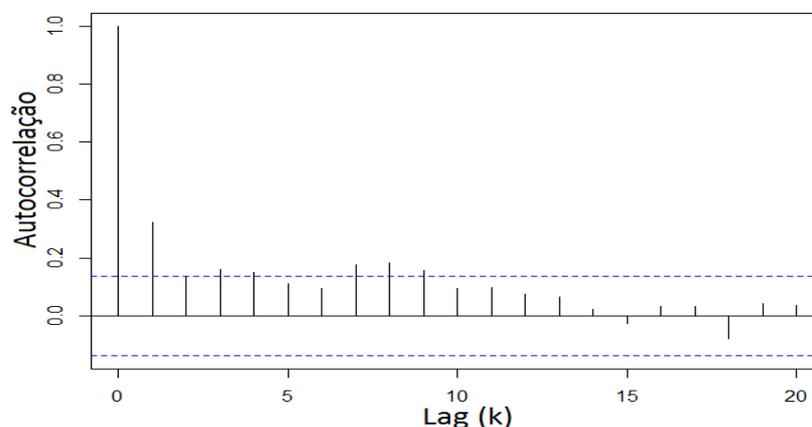
## B.2 AUTOCORRELAÇÃO

Por meio da autocorrelação (DUNN, 2004) é possível analisar a ocorrência de dependências temporais entre amostras. Ela é definida pela medida que indica o quanto o valor da instância de uma variável aleatória pode influenciar suas instâncias vizinhas no tempo. Assim, a autocorrelação de uma variável aleatória  $X(t)$ , dependente do tempo  $t$ , com média  $\mu$ , é formalmente definida pela Equação 12

$$R(k) = \frac{E[(X_t - \mu)(X_{t+k} - \mu)]}{\sigma^2}, \quad (12)$$

onde  $E[\ ]$  representa o valor médio,  $k$  é o valor do deslocamento no tempo (*lag*) e  $\sigma$  é a variância da variável  $X(t)$ .

A Figura 64 apresenta a autocorrelação da distância inter-veicular medida de uma única linha na faixa de horário das 16h31m às 19h30m. A linha analisada recebe a denominação de *linha 550* pela Companhia de Urbanização da Cidade de Curitiba. Com a análise da referida figura é possível verificar ausência de dependência temporal, uma vez que a autocorrelação apresenta valores não significativos em relação ao deslocamento temporal.



**Figura 64: Autocorrelação da distância inter-veicular.**

### B.3 AJUSTE DE CURVAS

O ajuste de curva consiste em encontrar a distribuição de densidade de probabilidade que melhor represente, ou se ajuste, à distância inter-veicular. A distribuição encontrada pode auxiliar pesquisadores a compreender melhor a mobilidade veicular, além de poder ser utilizada para criação ou parametrização de modelos de mobilidade que almejem simular movimentos reais de ônibus expressos em uma cidade.

Os histogramas normalizados para a distância inter-veicular, apresentados nas seções A.1, A.2 e A.3, foram comparados a diversas distribuições de probabilidade ajustadas aos dados reais, como a distribuição Gama, Lognormal, Normal, Weibull, etc (MEYER, 1999; BUSSAB; MORETTIN, 2006; JAIN, 1991).

Para realizar tal comparação foi necessário ajustar os parâmetros das distribuições comparadas. O estimador da máxima verossimilhança (*Maximum Likelihood Estimation* (MLE)) (MEYER, 1999; BUSSAB; MORETTIN, 2006; JAIN, 1991) foi utilizado para eleger os parâmetros mais corretos. De posse dos dados coletados para a distância inter-veicular, realizou-se uma avaliação de hipóteses por meio do teste Pearson's chi-square (TAYLOR, 1997). Os resultados obtidos indicam que a distribuição de Weibull não pode ser rejeitada (ao nível de significância de 1%) para os casos analisados, podendo caracterizar analiticamente a distância inter-veicular.

As Tabelas 20 e 21 exibem os valores de  $\alpha$  e  $\beta$  e *P-value* para o referido conjunto de histogramas. Onde  $\alpha$  e  $\beta$  são parâmetros responsáveis por definir a escala e a forma gráfica das funções, enquanto o *P-value* define o nível de significância do teste.

**Tabela 20: Valores de  $\alpha$ ,  $\beta$  e *P-value* considerado o sentido dos movimentos dos ônibus.**

Número de Linhas	$\alpha$	$\beta$	P-value
Uma	1,15	0,81	0,140
Três	1,00	0,47	0,021
Cinco	0,95	0,37	0,058
Sete	0,97	0,31	0,140

**Tabela 21: Valores de  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $P$ -value desconsiderando o sentido dos movimentos dos ônibus.**

<b>Número de Linhas</b>	$\alpha$	$\beta$	<b>P-value</b>
Uma	1,10	0,60	0,253
Três	0,96	0,26	0,011
Cinco	0,91	0,18	0,013
Sete	0,91	0,14	0,012

## APÊNDICE C – ANÁLISE QQ-PLOT

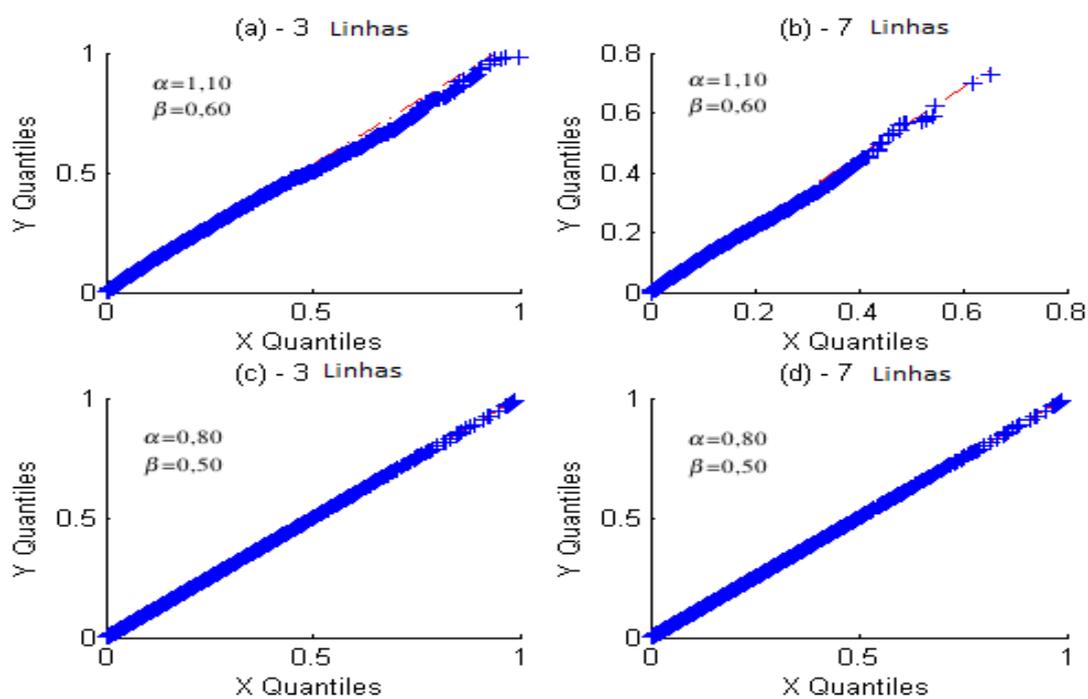
De acordo com Cox (COX; SMITH, 1954), a densidade exata da superposição de  $n$  processos de renovação independentes e identicamente distribuídos em equilíbrio é:

$$f_Y(y) = -\frac{d}{dy} \left[ S_X(y) \left\{ \int_y^\infty \frac{S_X(u)}{\mu_X} du \right\}^{n-1} \right],$$

onde  $S_X(x) = 1 - F_X(x)$  é a função sobrevivente (*survivor function*) de cada componente do processo. Infelizmente, quando cada processo individual segue uma distribuição de Weibull, a integral resulta em uma função gama incompleta, tornando assim difícil a obtenção de expressões algébricas tratáveis.

Nesta seção é feita uma análise de gráficos QQ-Plot, obtidos por simulação, com o objetivo de validar o modelo analítico proposto para a distribuição da superposição de processos (veja a Seção 4.3.1). Um gráfico QQ-Plot é um gráfico do quantil amostral versus o quantil esperado sob a hipótese de uma dada distribuição de probabilidade (HYNDMAN; FAN, 1996).

Para as análises realizou-se simulações da superposição com  $n = 3$  linhas de ônibus, considerando que cada processo individual segue a distribuição de Weibull com  $\alpha=1,10$  e  $\beta=0,60$  (Fig 65 (a) e (b)) e com  $n = 7$  linhas de ônibus com  $\alpha=0,80$  e  $\beta=0,50$  (Fig 65 (c) e (d)). Conclui-se que o modelo proposto retrata a situação simulada.



**Figura 65:** Análise QQ-Plot ( $Y$  é o quantil amostral e  $X$  é o quantil segundo uma distribuição de Weibull).

## APÊNDICE D – AVALIAÇÃO DO BMVA UTILIZANDO SIMULADOR DE REDE

Após o término dos estudos experimentais e analíticos (Capítulo 4), e antes da definição de um cenário de simulação definitivo (Capítulo 5), foi necessário realizar a avaliação do BMVA utilizando um simulador de rede (em um cenário de simulação provisório), a fim de confirmar se o BMVA pode prover conectividade e aumentar o desempenho da rede. Tal avaliação consistiu em verificar o quanto a infraestrutura provida pelo *backbone* pode melhorar métricas como a taxa de entrega e a vazão dos pacotes de dados. Para isso, foram realizadas simulações usando o simulador *Network Simulator* (NS) versão 2.35 (NS2, 2015) em cenários que utilizam o BMVA e cenários que não o utilizam.

### D.1 AMBIENTE DE SIMULAÇÃO

As redes utilizadas nas simulações são áreas retangulares de 2000m x 1000m e 4000m x 500m com 10, 20, 30, 40, 50 e 60 veículos distribuídos por todo o ambiente de simulação, onde cada um dos veículos transmite seus sinais de rádio frequência em um raio de 500m.

Além disso, os veículos se deslocam seguindo o modelo de movimentação estabelecido pelo VanetMobiSim, com velocidades de até 54 km/h. O padrão de tráfego consiste de conexões (UDP) com taxa de bits constante (CBR) entre 5 pares de nós escolhidos aleatoriamente. O modelo de propagação de rádio é o *twoRay ground* (GAST, 2002), enquanto a camada MAC segue as especificações IEEE 802.11p (IEEE, 2007). As simulações são realizadas por 600 segundos e todos os resultados apresentados são médias de 35 simulações com o mesmo modelo de tráfego, mas com diferentes cenários de mobilidade. Para estas simulações o intervalo de confiança estabelecido é de 95%. Os parâmetros de simulações estão resumidos na Tabela 22.

### D.2 MÉTRICAS

O BMVA foi avaliado com base nas seguintes métricas:

**Tabela 22: Parâmetros de simulação utilizando simulador de rede.**

<b>Parâmetros</b>	<b>Valores(s)</b>
Simulador	NS-2 (2.35)
Protocolo de roteamento	AODV
Área de simulação	2000m X 1000m e 4000m X 500m
Número de veículos	10,20,30,40,50,60
Densidade do BMVA	3,4 ônibus/km
Modelo de mobilidade	<i>VanetMobiSim</i>
Raio de alcance dos veículos e do BMVA	300m, 500m, 750m, 1000m
Velocidade máxima dos veículos	40km/h
Velocidade máxima do BMVA	54km/h
Padrão de tráfego	UDP/CBR com 2 mensagens por segundo
Número de conexões simultâneas	5 conexões
Tempo de simulação	600s
Modelo de propagação de rádio	<i>twoRay ground</i>
Especificações da camada PHY/MAC	IEEE 802.11p

- *Taxa de entrega dos pacotes*: é a razão entre os pacotes de dados entregues ao destino pela quantidade de pacotes de dados enviados pela origem, para cada origem e destino;
- *Vazão*: é a razão entre quantidade de dados transferidos entre dois nós pelo intervalo de tempo em que permanecem conectados, para cada origem e destino;

### D.3 RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

As Figuras 66 e 67 apresentam os resultados obtidos para a taxa de entrega e vazão versus a variação do número de veículos na rede. Tais resultados comparam a taxa de entrega e a vazão de uma rede que utiliza o BMVA e de uma rede que não utiliza. Neste cenário é possível observar redes de dimensões diferentes, cuja finalidade é obter rotas com tamanhos distintos. Em uma rede mais alongada, como é o caso da rede de 4000m X 500m, é possível a existência de rotas com mais saltos entre a origem e o destino em relação a uma rede de 2000m X 1000m. É possível notar na Figura 66 que a taxa de entrega aumenta com o acréscimo do número de veículos na rede com o BMVA e sem o BMVA. Contudo, com o BMVA foi possível obter melhores resultados independentemente do número de veículos na rede, com maior relevância para os casos onde existiam até 30 veículos, fato que demonstra sua importância em redes com pouca conectividade.

Observa-se na Figura 67 que a vazão também aumenta com o acréscimo do número de veículos na rede com o BMVA e sem o BMVA. Entretanto, conforme esperado, nos casos onde o BMVA foi utilizado obteve-se melhores resultados, independentemente do número de

veículos na rede.

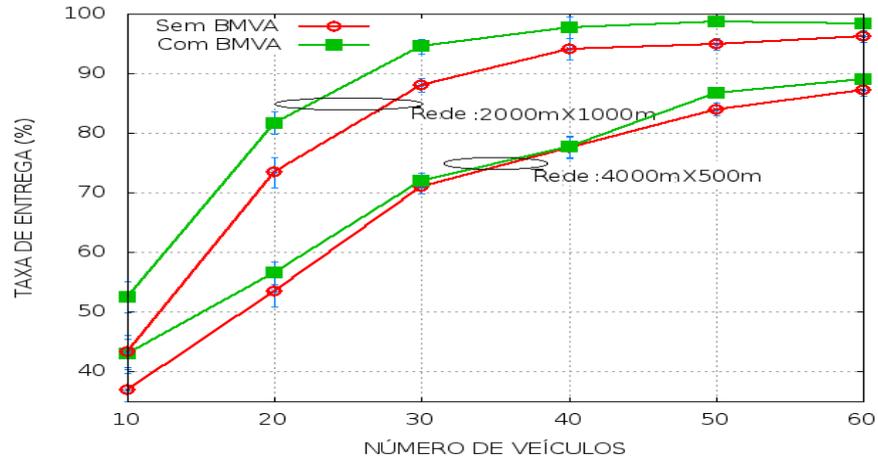


Figura 66: Taxa de entrega versus a variação do número de veículos em uma rede de 2000mX1000m e 4000mX500m.

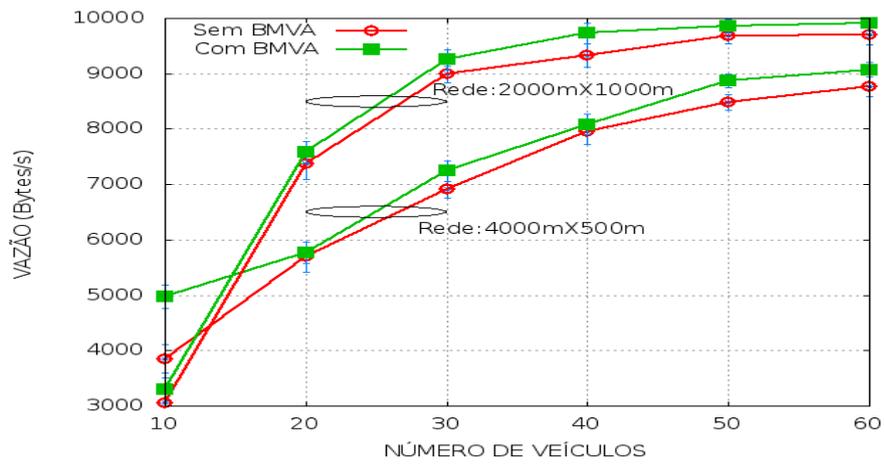


Figura 67: Vazão versus a variação do número de veículos em uma rede de 2000mX1000m e 4000mX500m.