

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE

GABRIEL BACH AMARAL OROFINO

**Uma Análise da Influência do Ambiente de
Propagação Urbano no Desempenho de
Protocolos de Roteamento em Redes Veiculares**

NITERÓI

2020

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE

GABRIEL BACH AMARAL OROFINO

**Uma Análise da Influência do Ambiente de
Propagação Urbano no Desempenho de
Protocolos de Roteamento em Redes Veiculares**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações da Universidade Federal Fluminense como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações. Área de concentração: Sistemas de Telecomunicações

Orientadora:

Dianne Scherly Varela de Medeiros

Co-orientador:

Ricardo Campanha Carrano, Pedro Vladimir Gonzalez Castellanos

NITERÓI

2020

GABRIEL BACH AMARAL OROFINO

Uma Análise da Influência do Ambiente de Propagação Urbano no Desempenho de Protocolos de Roteamento em Redes Veiculares

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações da Universidade Federal Fluminense como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações. Área de concentração: Sistemas de Telecomunicações.

Aprovada em 30 de Outubro de 2020.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dianne Scherly Varela de Medeiros, D.Sc. – Orientador, UFF

Prof. Ricardo Campanha Carrano, D.Sc. – Coorientador, UFF

Prof. Pedro Vladimir Gonzalez Castellanos, D.Sc. – Coorientador, UFF

Prof. Tadeu Nagashima Ferreira, D.Sc. – UFF

Prof. Rodrigo de Souza Couto, D.Sc. – UFRJ

Niterói

2020

Dedicatória.

*Aos que acreditaram e acreditam que é possível crescer,
agradecer ao apoio da minha família que foi companheira
de todas as horas.*

*Agradeço também à minha namorada Letícia que deu
um sentido especial em minha vida e tem proporcionado
momentos de alegria.*

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus que me permitiu e me ajudou a percorrer essa longa estrada.

Agradeço à minha família que sempre esteve ao meu lado me dando incondicional suporte com todo o amor e carinho. Obrigado por tudo.

Agradeço à minha professora orientadora, Dianne Scherly Varela de Medeiros, que além disso se tornou uma grande amiga que sempre acreditou no meu potencial, sempre esteve ao meu lado, até no lado financeiro e me ajudou ao máximo durante toda essa jornada na pós-graduação.

Agradeço aos meus professores Pedro Vladimir Gonzalez Castellanos e Ricardo Campanha Carrano que sempre estiveram ao meu lado, que acreditaram na minha capacidade e me incentivaram a dar continuidade a este trabalho.

Agradeço aos meus colegas e amigos do laboratório, que me ajudaram e me incentivaram a dar continuidade e criar um ambiente maravilhoso de trabalho.

Agradeço à minha namorada por todo apoio, incentivo, atenção, que me ajudou muito a concluir este trabalho. Obrigado pelo seu apoio diário e por ter paciência comigo nas horas difíceis.

Agradeço à Universidade Federal Fluminense e aos professores que tive privilégio de ter aula e me fornecerem esse ambiente agradável e próspero.

Agradeço à CAPES pelo financiamento em forma de bolsa de estudos durante o período do mestrado.

“Quanto mais eu treino mais eu tenho sorte .”
(Arnold Palmer)

Resumo

O projeto de redes veiculares requer um conhecimento aprofundado do comportamento do sinal no sistema, permitindo otimizar o desempenho da rede para cenários específicos. Esta dissertação tem como objetivo analisar a influência dos modelos de propagação (incluindo Espaço Livre, Log-Distância, Dois Raios) no desempenho de uma comunicação veículo para infraestrutura. Para isso, utiliza-se um simulador de redes configurado com base em medidas reais que caracterizam o ambiente de propagação. O desempenho é avaliado por meio de protocolos de roteamento (incluindo AODV, DSDV, DSR, OLSR) e através da análise dos atrasos, do tempo de contato, vazão e da taxa de entrega de pacotes no sistema. Os resultados mostram que o cenário avaliado é melhor descrito pelo modelo Log-Distância. Além disso, existem diferenças entre os valores de atraso, tempo de contato e taxa de entrega de pacotes obtidos quando o veículo se aproxima e se afasta da unidade de estrada (*Road Side Unit*, RSU).

Palavras-chave: Comunicação V2I, Desempenho, Modelos de propagação, Protocolos de Roteamento, Redes veiculares, Simulação de redes.

Abstract

The design of vehicular networks requires in-depth knowledge of signal behavior in the system, allowing the optimization of the network performance for specific scenario. This paper aims to analyze the influence of propagation models (including Free Space, Log-Distance, Two Ray Ground) on the performance of a vehicle-to-infrastructure communication. To this end, we use a network simulator which is configured based on real measurements that characterize the propagation environment. Performance is assessed through routing protocols (including AODV, DSDV, DSR, OLSR) and by analyzing the delays, flow, contact time, and packet delivery rate in the system. The results show that the scenario evaluated is best described by the Log-Distance model. In addition, there are differences on the values of delay, contact time and packets delivery rate obtained when the vehicle moves towards and away from the Road Side Unit (RSU).

Palavras-chave: Network simulation, Performance, Propagation models, Routing Protocols V2I communication, Vehicular networks.

Lista de Figuras

3.1	Modelo de espaço livre. A atenuação do sinal é função apenas da distância percorrida por ele.	12
3.2	Modelo de dois raios. A intensidade do sinal recebido é uma combinação da intensidade do sinal direto e do sinal refletido na superfície terrestre. Adaptado [1].	13
3.3	Paradigmas de comunicação em VANETs. (a) A comunicação V2V ocorre entre as OBUs dos veículos e a (b) comunicação V2I ocorre entre as OBUs e as RSUs. (c) O cenário em que a comunicação ocorre tanto entre as OBUs como entre OBUs e RSUs é conhecido como V2X. Caso haja uso da rede celular, esse paradigma de comunicação passa a ser chamado de C-V2X. Adaptado [2].	16
3.4	A arquitetura WAVE/DSRC define a faixa de frequências usada para comunicação veicular e os protocolos de camada física, camada de enlace e segurança. Adaptado [3].	17
3.5	Os canais DSRC possuem 10 MHz de largura de banda e são separados por uma banda de guarda de 5 MHz. Existem 7 canais, sendo 4 canais para aplicações comuns, 1 para aplicações de serviços de emergência, 1 para controle e 1 para aplicações de segurança pública. Adaptado [3].	18
3.6	Difusão de mensagens com MPR. Em vez de todos os nós inundarem a rede com mensagens, apenas os nós MPRs ficam responsáveis por retransmitir mensagens de controle. Isso diminui o número de mensagens redundantes na rede, reduzindo a sobrecarga de controle. Adaptado [4].	21
4.1	O Túnel Engenheiro Raymundo de Paula Soares possui 2.197 m de extensão com aproximadamente 12 m de largura total. O trajeto da campanha de medição é um trecho em linha reta que possui 1.500 m de comprimento. . .	26
4.2	Diagrama de radiação da antena de transmissão.	27
4.3	Diagrama de radiação da antena de recepção.	27
4.4	Esquema do cenário experimental para obtenção das medidas reais. O transmissor, fixo, envia sinais para o receptor, que se move com uma velocidade aproximadamente constante.	28

4.5	Vista aérea da área aberta. A coleta é feita por um trajeto de 225 m em um ambiente composto por árvores espaçadas, prédios espaçados em um dos lados da via e um corpo d'água do outro lado da via.	29
4.6	Metodologia utilizada para construção da simulação dos Cenários 1 e 2 avaliados neste trabalho. A movimentação dos nós é configurada na etapa de modelagem do tráfego. Em seguida, ocorre a modelagem da rede, com a configuração dos parâmetros da rede e das camadas de interconexão. Por fim, os resultados obtidos são avaliados na etapa de análise dos resultados.	30
4.7	Interfaces gráficas do usuário disponíveis no NS-3 para validação de cenário. Adaptado [5].	33
4.8	Exemplo de arquivo de mobilidade importado no NS-3.	35
5.1	Comparação do perfil de atenuação obtido nos experimentos reais e na simulação realizada no NS-3 para o cenário de Área Aberta, tanto para afastamento quanto para aproximação em relação à RSU. O modelo que apresenta menor erro em relação aos valores medidos é o Log-Distância. . .	41
5.2	Comparação do perfil de atenuação obtido nos experimentos reais e na simulação realizada no NS-3, para o cenário de Túnel, considerando a aproximação e o afastamento em relação à RSU. O modelo que apresenta menor erro em relação aos valores medidos é o Log-Distância.	42
5.3	Comparação entre as vazões obtidas para o cenário de Túnel e de Área Aberta, considerando que o ambiente é descrito por cada modelo de propagação. (a) Na Área Aberta, a vazão alcançada é muito semelhante para todos os modelos. (b) No Túnel, a vazão alcançada é significativamente maior para o modelo Log-Distância. A atenuação tem forte influência na vazão obtida em todos os cenários.	43
5.4	Comparação entre os valores de taxa de entrega de pacotes em relação à distância usando cada modelo de propagação para descrever o cenário de Área Aberta. O comportamento é semelhante para todos os modelos, exceto após ultrapassar uma determinada distância de afastamento, quando a taxa de entrega no ambiente modelado por Espaço Livre torna-se ligeiramente maior.	44
5.5	Comparação entre os valores de taxa de entrega de pacotes em relação à distância usando cada modelo de propagação para descrever o cenário de Túnel. O comportamento é diferente para todos os modelos, sendo que a taxa de entrega é sempre maior para o modelo Log-Distância.	44

5.6	Diferença entre as vazões para cada modelo de propagação no cenário de Túnel com os veículos se movendo com a mesma velocidade e no mesmo sentido. A maior vazão é alcançada pelo protocolo DSDV, independentemente do modelo de propagação que descreve o cenário.	47
5.7	Comparação entre os valores de taxa de entrega de pacotes alcançados pelos diferentes protocolos de roteamento, sob influência de cada modelo de propagação no cenário de Túnel com os veículos se movendo na mesma direção e com a mesma velocidade.	48
5.8	Diferença entre as vazões para cada modelo de propagação com uma velocidade menor	49
5.9	Comparação entre os valores de taxa de entrega de pacotes alcançados pelos diferentes protocolos de roteamento, sob influência de cada modelo de propagação no cenário de Túnel com veículos se movendo na mesma direção, sendo um deles com velocidade menor.	50
5.10	Diferença entre as vazões para cada modelo de propagação com os nós se cruzando no centro do sistema	51
5.11	Comparação entre os valores de taxa de entrega de pacotes alcançados pelos diferentes protocolos de roteamento, sob influência de cada modelo de propagação no cenário de Área Aberta, com os nós se movendo em direções opostas, com mesma velocidade, se cruzando no centro do sistema.	52
5.12	Comparação entre os valores de vazão alcançados pelos diferentes protocolos de roteamento, sob influência de cada modelo de propagação no cenário de Área Aberta com 2 nós, sendo um deles parado no centro do cenário.	53
5.13	Comparação entre os valores de taxa de entrega de pacotes alcançados pelos diferentes protocolos de roteamento, sob influência de cada modelo de propagação no cenário de Área Aberta com dois veículos, sendo um deles parado no centro do cenário.	53
5.14	Comparação entre os atrasos obtidos para aproximação e afastamento, para cada modelo de propagação, utilizando protocolos de roteamento distintos. O cenário é o de Túnel, com 2 veículos se movendo no mesmo sentido e com mesma velocidade.	55
5.15	Comparação entre os atrasos obtidos para aproximação e afastamento, para cada modelo de propagação, utilizando protocolos de roteamento distintos. O cenário é o de Túnel, com 2 veículos se movendo no mesmo sentido e com velocidades diferentes.	59

-
- 5.16 Comparação entre os atrasos obtidos para aproximação e afastamento, para cada modelo de propagação, utilizando protocolos de roteamento distintos. O cenário é o de Área Aberta com 2 veículos se movendo em direções opostas com mesma velocidade e se cruzando no centro do sistema. 62
- 5.17 Comparação entre os atrasos obtidos para aproximação e afastamento, para cada modelo de propagação, utilizando protocolos de roteamento distintos. O cenário é o de Área Aberta, com um veículo se movendo com velocidade constante e outro parado no centro do sistema. 65

Lista de Tabelas

3.1	Modelos de perda de propagação e de desvanecimento implementados no NS-3.28	11
4.1	Parâmetros de configuração da simulação do cenário túnel.	37
4.2	Parâmetros de configuração da simulação do cenário de área aberta.	38
5.1	RMSE e coeficiente de decaimento para afastamento e aproximação em relação à RSU no cenário de Área Aberta.	40
5.2	RMSE e coeficiente de decaimento para afastamento e aproximação em relação à RSU no cenário de Túnel.	41
5.3	Comparação do atraso médio para cada modelo de propagação no afastamento e na aproximação no cenário de Área Aberta.	45
5.4	Comparação do atraso médio para cada modelo de propagação no afastamento e na aproximação no cenário de Túnel.	45
5.5	Comparação do tempo de contato médio para cada modelo de propagação no afastamento e na aproximação no cenário de Área Aberta.	46
5.6	Comparação do tempo de contato médio para cada modelo de propagação no afastamento e na aproximação no cenário do Túnel.	46
5.7	Comparação, no Espaço Livre, do atraso médio para cada protocolo de roteamento no afastamento e na aproximação no cenário (i)	56
5.8	Comparação, no Log Distância, do atraso médio para cada protocolo de roteamento no afastamento e na aproximação no cenário (i)	56
5.9	Comparação, no Dois Raios, do atraso médio para cada protocolo de roteamento no afastamento e na aproximação no cenário (i)	56
5.10	Comparação, no Espaço Livre, do tempo de contato médio para cada protocolo de roteamento no afastamento e na aproximação no cenário (i)	57
5.11	Comparação, no Log Distância, do tempo de contato médio para cada protocolo de roteamento no afastamento e na aproximação no cenário (i)	57
5.12	Comparação, no Dois Raios, do tempo de contato médio para cada protocolo de roteamento no afastamento e na aproximação no cenário (i)	57

5.13	Comparação, no Espaço Livre, do atraso médio para cada protocolo de roteamento no afastamento e na aproximação no cenário (ii)	59
5.14	Comparação, no Log Distância, do atraso médio para cada protocolo de roteamento no afastamento e na aproximação no cenário (ii)	59
5.15	Comparação, no Dois Raios, do atraso médio para cada protocolo de roteamento no afastamento e na aproximação no cenário (ii)	60
5.16	Comparação, no Espaço Livre, do tempo de contato médio para cada protocolo de roteamento no afastamento e na aproximação no cenário (ii) .	60
5.17	Comparação, no Log Distância, do tempo de contato médio para cada protocolo de roteamento no afastamento e na aproximação no cenário (ii) .	60
5.18	Comparação, no Dois Raios, do tempo de contato médio para cada protocolo de roteamento no afastamento e na aproximação no cenário (ii)	60
5.19	Comparação, no Espaço Livre, do atraso médio para cada protocolo de roteamento no afastamento e na aproximação no cenário (iii)	62
5.20	Comparação, no Log Distância, do atraso médio para cada protocolo de roteamento no afastamento e na aproximação no cenário (iii)	63
5.21	Comparação, no Dois Raios, do atraso médio para cada protocolo de roteamento no afastamento e na aproximação no cenário (iii)	63
5.22	Comparação, no Espaço Livre, do tempo de contato médio para cada protocolo de roteamento no afastamento e na aproximação no cenário (iii) .	63
5.23	Comparação, no Log Distância, do tempo de contato médio para cada protocolo de roteamento no afastamento e na aproximação no cenário (iii) .	63
5.24	Comparação, no Dois Raios, do tempo de contato médio para cada protocolo de roteamento no afastamento e na aproximação no cenário (iii)	63
5.25	Comparação, no Espaço Livre, do atraso médio para cada protocolo de roteamento no afastamento e na aproximação no cenário (iv)	65
5.26	Comparação, no Log Distância, do atraso médio para cada protocolo de roteamento no afastamento e na aproximação no cenário (iv)	66
5.27	Comparação, no Dois Raios, do atraso médio para cada protocolo de roteamento no afastamento e na aproximação no cenário (iv)	66
5.28	Comparação, no Espaço Livre, do tempo de contato médio para cada protocolo de roteamento no afastamento e na aproximação no cenário (iv) .	66
5.29	Comparação, no Log Distância, do tempo de contato médio para cada protocolo de roteamento no afastamento e na aproximação no cenário (iv) .	66

5.30	Comparação, no Dois Raios, do tempo de contato médio para cada protocolo de roteamento no afastamento e na aproximação no cenário (iv)	66
------	--	----

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Objetivo	3
1.2	Contribuições	4
1.3	Estrutura do Documento	4
2	Trabalhos Relacionados	5
2.1	Caracterização do Ambiente de Propagação	5
2.2	Desenvolvimento e Avaliação de Protocolos de Roteamento para VANETs	6
3	Propagação e Roteamento em Redes Ad-Hoc Veiculares	10
3.1	Ambiente de Propagação Sem Fio	10
3.1.1	Modelo de Espaço Livre	11
3.1.2	Modelo de Dois Raios	13
3.1.3	Modelo Log-Distância	14
3.2	Redes <i>Ad-Hoc</i> Veiculares	15
3.2.1	Paradigmas de comunicação	15
	Comunicação entre veículos - V2V	15
	Comunicação entre veículo e infraestrutura - V2I	16
	Comunicação de veículos para tudo - V2X	16
3.2.2	Arquitetura WAVE/DSRC	17
3.3	Protocolos de Roteamento para Redes <i>Ad-Hoc</i> Móveis	19
3.3.1	Protocolos de roteamento proativos	19
	OLSR: <i>Optimized Link State Routing</i>	20
	DSDV: <i>Destination Sequence Distance Vector</i>	21
3.3.2	Protocolos de Roteamento Reativos	22

3.3.3	DSR: <i>Dynamic Source Routing</i>	22
3.3.4	AODV: <i>Ad-Hoc On-Demand Distant Vector</i>	23
4	Metodologia de Avaliação da Influência do Ambiente de Propagação na Rede Veicular	25
4.1	Experimentos de medição em campo	25
4.1.1	Cenário 1: Túnel	26
4.1.2	Cenário 2: Área aberta	28
4.2	Simulações	29
4.2.1	Principais simuladores de redes	30
4.2.2	NS-3: Network Simulator 3	32
4.3	Implementação do Cenário Simulado no NS-3	34
	Modelagem do tráfego	34
	Modelagem de rede	35
	Análise dos resultados	38
5	Resultados e Discussão	39
5.1	Caracterização do Ambiente de Propagação Real e Simulado	39
5.1.1	Perfil de atenuação	40
5.1.2	Vazão e taxa de entrega de pacotes	42
5.1.3	Atraso e tempo de contato	44
5.2	Desempenho dos Protocolos de Roteamento de Redes <i>Ad-Hoc</i> Móveis	46
5.2.1	Vazão e taxa de entrega de pacotes	46
	Túnel, configuração (i)	46
	Túnel, configuração (ii)	48
	Área Aberta, configuração (iii)	50
	Área aberta, configuração (iv)	52
5.2.2	Atrasos e tempo de contato	53
	Túnel, configuração (i)	54
	Túnel, configuração (ii)	57

Área aberta, configuração (iii)	60
Área aberta, configuração (iv)	63
6 Conclusão	67
6.1 Trabalhos Futuros	69
Referências	70

Capítulo 1

Introdução

As Redes Ad Hoc Veiculares (*Vehicular Ad Hoc Networks*, VANETs) são um tipo especial de rede sem fio *ad-hoc* móvel (*Mobile Ad-Hoc Networks* - MANETs) que estabelecem conexões entre veículos (*On-Board Units* - OBU) e entre as OBUs e uma infraestrutura implantada ao lado da via (*Road-Side Units* - RSU). A comunicação entre OBUs, ou seja, de um veículo para o outro, define o paradigma de comunicação V2V (*Vehicle-to-Vehicle*), enquanto a comunicação entre OBU e RSU define o paradigma V2I (*Vehicle-to-Infrastructure*). Quando há comunicação V2I e V2V no mesmo cenário, define-se o paradigma V2X (*Vehicle-to-Everything*), que é uma rede híbrida. A comunicação sem fio é o principal componente viabilizador das VANETs, sendo fundamental para a transmissão e recepção dos dados. Apesar da versatilidade da comunicação sem fio, a qualidade da comunicação entre os nós muitas vezes é prejudicada devido à dinamicidade do ambiente veicular e do ambiente de propagação. Essas características são inerentes a essas redes e contribuem para a frequente atualização de rotas que podem levar, inclusive, à ausência de rotas [6]. Além desses fatores, a qualidade da comunicação também pode ser influenciada negativamente pelo compartilhamento do meio por um elevado número de nós.

Devido à complexidade das VANETs, elas continuam a concentrar o interesse de acadêmicos, pesquisadores e entusiastas de setores diretamente relacionados a automóveis, visando o desenvolvimento de aplicações com foco na segurança de passageiros, motoristas e pedestres, no melhoramento de aspectos relacionados ao trânsito, e no entretenimento de passageiros. Uma das possíveis aplicações em VANETs é a prevenção de colisão entre veículos. Essa aplicação pode, por exemplo, avisar aos motoristas e passageiros que seguem em direção a um cruzamento entre estradas, ou mesmo um cruzamento com uma ferrovia, se há perigo de colisão. Este tipo de serviço tem requisito de latência muito baixa, para que o aviso chegue ao destino a tempo de evitar a colisão. Devido à movimentação dos nós, ocorre atualização de rotas frequentemente, o que pode levar a aumentos inesperados da latência e à inexistência de um caminho até o destino. Além disso, a comunicação nessas redes sofre com o efeito Doppler acarretando em degradação de algumas métricas como o *Packet Delivery Ratio* (PDR) [7]. Uma vez que o desempenho das aplicações

depende, fundamentalmente, das características do meio, é importante desenvolver novas tecnologias e novas aplicações que levem em consideração as particularidades do ambiente de comunicação sem fio em redes altamente dinâmicas, como as redes veiculares. O protocolo IEEE 802.11 comumente usado em redes *ad-hoc* sem fio, por exemplo, constitui uma tecnologia que não é adequada para uso nas VANETs, dadas as especificações do serviço [8]. Por isso, o padrão IEEE 802.11p foi desenvolvido juntamente com a arquitetura *Wireless Access in Vehicular Environments / Dedicated Short-Range Communications* (WAVE/DSRC). O padrão IEEE 802.11p define os parâmetros de operação da camada física como largura de banda e faixa de frequência de operação. A faixa de operação é exclusiva (DSRC) [2] e nos Estados Unidos está entre 5,850 GHz e 5,925 GHz, sendo reservada pela *Federal Communications Commission* (FCC) [9]. Já na Europa, a faixa reservada em 2008 pelo *European Telecommunications Standards Institute* (ETSI) ocupa as frequências entre 5,860 GHz e 5,900 GHz.

A implantação das VANETs é especialmente complexa devido às desconexões frequentes provocadas pela influência dos mecanismos de propagação presentes no ambiente e à complexidade da adequação dos protocolos de roteamento para o ambiente dinâmico característico da rede veicular [10]. Os protocolos de roteamento estabelecem rotas temporárias entre nós da rede de acordo com regras específicas, implementadas através de algoritmos [11, 12]. O problema do roteamento nas MANETs já é uma área de pesquisa bem explorada, mas as soluções existentes para MANETs não são diretamente aplicáveis às VANETs, devido às características intrínsecas da rede veicular. O desenvolvimento de aplicações e protocolos adequados ao ambiente das redes veiculares requer conhecimento preciso e prévio de parâmetros importantes que caracterizam o canal de propagação em questão. Assim, o projeto de sistemas inteligentes que promovam a comunicação entre veículos e otimize a utilização dos serviços oferecidos aos passageiros e motoristas requer explorar e estudar as características do ambiente no qual os sistemas devem ser implantados [13].

Para atender aos requisitos desafiadores das VANETs, qualquer solução baseada na arquitetura WAVE/DSRC deve ser dimensionável, robusta, com baixa latência e alta capacidade [14]. Nesse contexto, é importante investigar o comportamento do sistema em diversos tipos de cenários. Isso pode ser feito, por exemplo, através de medições em campo com o objetivo de caracterizar o ambiente de propagação. No entanto, nem sempre é viável realizar essas medições. Devido às condições necessárias para implantar esses sistemas em ambientes reais, como o número de pessoas, incluindo motoristas e pessoal de apoio, e o volume de equipamentos para se realizar esse tipo de análise, acabam se tornando um empecilho relevante para a realização de experimentos em ambientes reais. Uma alternativa às medições em ambientes reais são as simulações, realizadas através de ferramentas computacionais que permitem verificar o comportamento do sistema em diversos tipos de ambientes. Todavia, há uma certa escassez de estudos [15] de comparação e avaliação de desempenho envolvendo protocolos de roteamento em diversos ambientes de

propagação baseados em medições reais, que apresente resultados assertivos e conclusivos sobre o impacto do ambiente no desempenho do protocolo de roteamento utilizado.

Este trabalho avalia o desempenho de protocolos de roteamento de redes *ad-hoc* em ambientes de propagação distintos, através de simulações, em um cenário V2I. A avaliação é feita através de métricas comuns para avaliação de desempenho em redes, como atraso fim-a-fim médio (*Average End-to-End Delay* - E2ED), vazão e taxa de entrega de pacotes (*Packet Delivery Ratio* - PDR). Também utiliza-se como métrica de avaliação a perda de percurso (*Path Loss*, PL), que é a relação entre a potência recebida e a potência transmitida para um determinado canal de propagação, e o tempo de contato, que é a janela de comunicação entre os nós da rede. Os resultados mostram que cada protocolo de roteamento estudado é mais adequado para um determinado ambiente de propagação e, portanto, ao desenvolver aplicações, deve-se levar em consideração o ambiente de propagação antes de definir o protocolo de roteamento utilizado no cenário.

1.1 Objetivo

Esta dissertação possui como objetivo geral avaliar quais protocolos de roteamento para redes sem fio *ad-hoc* possuem melhor desempenho em diferentes ambientes de propagação rádio que modelam um cenário de rede veicular V2I. Para tanto estuda-se e analisa-se o desempenho desses protocolos em três cenários urbanos de comunicação veicular, descritos pelos modelos de propagação de Espaço Livre, Dois Raios e Log-Distância. Os protocolos de roteamento avaliados são AODV (*Ad-hoc On Demand Distance Vector*), DSDV (*Destination-Sequenced Distance-Vector*), DSR (*Dynamic Source Routing*) e OLSR (*Optimized Link State Routing Protocol*). Os modelos são parametrizados com valores reais, baseados em medições em campo. A fim de alcançar o objetivo geral, os seguintes objetivos específicos são propostos:

- Realizar um estudo bibliográfico envolvendo protocolos de roteamento e modelos de propagação em VANETs para ambientes urbanos;
- Customizar um cenário real V2I para ser utilizado no simulador de redes especificado;
- Desenvolver o movimento das entidades a serem analisadas no simulador de redes;
- Desenvolver as interconexões necessárias para a representação real tanto da infraestrutura quanto do veículo em si;
- Desenvolver a simulação, utilizando valores de medições reais obtidos em campo para parametrizar os modelos de propagação utilizados na simulação.

1.2 Contribuições

Este trabalho apresenta como principais contribuições (i) avaliar a influência do sentido do veículo em relação à infraestrutura usando as métricas de desempenho selecionadas e (ii) comparar o desempenho de protocolos de roteamento de redes *ad-hoc* sob influência de ambientes descritos por modelos de propagação distintos.

1.3 Estrutura do Documento

Este trabalho está dividido em seis capítulos. No Capítulo 2, são abordados os trabalhos relacionados. No Capítulo 3, apresenta-se a fundamentação teórica sobre redes *ad-hoc* veiculares, modelos de propagação e protocolos de roteamento de redes *ad-hoc* sem fio. O capítulo 4 descreve a metodologia utilizada para analisar a influência do ambiente de propagação no desempenho dos protocolos de roteamento utilizados. Esse capítulo também descreve o simulador de redes utilizado e a configuração da simulação. O Capítulo 5 mostra os resultados obtidos para os cenários avaliados. Por fim, o Capítulo 6 conclui este trabalho e sugere trabalhos futuros.

Capítulo 2

Trabalhos Relacionados

Este capítulo discute os principais trabalhos relacionados a esta dissertação. Os trabalhos estão divididos em duas seções, de acordo com o tema abordado em cada um. A primeira seção agrupa os trabalhos que focam na caracterização do ambiente de propagação, enquanto a segunda discute os que focam na avaliação e desenvolvimento de protocolos de roteamento para redes veiculares.

2.1 Caracterização do Ambiente de Propagação

A implantação de sistemas e aplicações para redes veiculares requer a investigação do comportamento e do desempenho da rede sob condições impostas pelo ambiente de propagação e pela dinamicidade típica das redes veiculares. Nesse contexto, os modelos de propagação são geralmente empregados em VANETs para prever a perda por propagação existente em vários cenários distintos. Em estruturas viárias como viadutos, passagens inferiores e túneis, a maioria dos modelos de propagação existentes são computacionalmente complexos. Esses modelos se baseiam em medições de campo em faixa de frequência fora da banda de 5 GHz, não sendo adequada para a implantação de VANETs [16, 17]. Apesar da complexidade, os modelos não levam em consideração as consequências da movimentação de veículos grandes como ônibus e caminhões, que constituem um obstáculo à propagação rádio, nem as propriedades geométricas das estruturas viárias. Nesse cenário, Qureshi *et al.* [18] propõem um modelo de propagação computacionalmente barato e com um conjunto mínimo de parâmetros para prever a perda por propagação em túneis rodoviários, considerando uma determinada faixa de frequências e a geometria do túnel.

Benin *et al.* [19] focam também no estudo do ambiente de propagação, porém através de simulações realizadas no *Network Simulator-3* (NS-3). Os autores comparam diversos modelos de propagação existentes no simulador a fim de obter valores padrão para os parâmetros de cada modelo em um esforço para normalizar as simulações de VANETs e fornecer aos pesquisadores a capacidade de utilizar esses modelos como comparação. Dentre

os modelos analisados estão os empíricos, determinísticos e estatísticos, além de modelos de desvanecimento. Galván *et al.* [20] comparam quatro modelos de propagação, Espaço Livre, Dois Raios, Sombreamento Log-Normal e o modelo de Nakagami, em diversos cenários de mobilidade veicular urbana. Para isso são utilizados valores de parâmetros reais aplicados ao mapa da cidade de Curitiba. Boeglen *et al.* [21] descrevem os principais aspectos do canal de propagação rádio em uma VANET, destacando seu papel central na comunicação nesse tipo de rede. Os autores apresentam as diferentes abordagens de modelagem para simular com precisão o canal rádio para uma VANET nos simuladores NS-2 e NS-3. Os autores destacam os efeitos de modelos de propagação de canais realísticos na simulação das VANETs, principalmente em termos de tempo de simulação. Os autores destacam que deve haver um equilíbrio entre o tempo de simulação e o realismo dessa simulação, sendo o realismo expresso como o desempenho de um modelo para simular uma variedade de ambientes de propagação. Para simular com maior precisão os efeitos da propagação do canal sem fio na transmissão de dados, é necessário que a camada física simulada seja compatível com o padrão de transmissão considerado, IEEE 802.11p, e com a arquitetura WAVE/DSRC. Além disso, os autores defendem que os modelos de propagação aplicados devem ser configurados a partir de medições reais, ou usando um software determinístico de rastreamento de raios [22].

Diferentemente dos autores citados anteriormente, Onubogu *et al.* [23] focam em experimentos reais. Os autores apresentam uma caracterização da perda de percurso para comunicações V2V, com base em dados empíricos coletados a partir de uma ampla campanha de medições realizada em linha de visada (*Line-of-Sight* - LoS) e com diferentes densidades de tráfego. O experimento é conduzido em ambiente de propagação V2V urbano, em uma rodovia, usando a frequência de 5,8 GHz. A partir das medições determina-se os parâmetros de dois modelos de propagação para o ambiente de teste.

Em relação à caracterização do ambiente de propagação, este trabalho difere dos trabalhos citados porque correlaciona os resultados obtidos em medições reais para definir os parâmetros de configuração dos modelos de propagação utilizados na simulação do mesmo ambiente da campanha de medição, com o objetivo de obter medidas do desempenho de protocolos de roteamento no cenário em questão. Nenhum dos trabalhos citados analisa a capacidade de transmissão de dados no ambiente estudado.

2.2 Desenvolvimento e Avaliação de Protocolos de Roteamento para VANETs

As VANETs formam a espinha dorsal para a comunicação eficiente entre veículos. No entanto, possuem a desvantagem de serem altamente dinâmicas, levando a desconexões frequentes entre os veículos. Devido às modificações frequentes na topologia da rede, as VANETs constituem um ambiente desafiador para comunicação. Os diversos desafios

existentes precisam ser solucionados para que essas redes sejam amplamente implantadas. O roteamento é um dos principais desafios desse tipo de rede e a comunicação bem-sucedida entre os veículos é fortemente dependente de um protocolo de roteamento eficiente que leve em consideração a dinâmica da rede. Devido à importância do protocolo de roteamento na comunicação, diversos autores desenvolvem novos protocolos e avaliam o desempenho dos protocolos de roteamento nas VANETs. Um fator desafiador na criação de protocolos de roteamento para a VANET é justamente a mudança frequente na topologia da rede. —Wahid *et al.* [24] em seu trabalho discute diversos protocolos de roteamento propostos recentemente, levando em consideração características da topologia da rede, como velocidade dos nós, distância e número de salto entre os nós, modelo de mobilidade dos nós, e características de comunicação na rede como sobrecarga de controle dos protocolos e métricas de desempenho como a taxa de perda de pacotes e latência.

Existem diversos protocolos de roteamento propostos na literatura. Esses protocolos podem ser organizados em diferentes categorias, de acordo com a base da estratégia utilizada, conforme descrito a seguir.

- Protocolos baseados em **Posicionamento Global**: cada nó conhece a sua própria localização e também a de seus vizinhos utilizando um serviço ou sensor de GPS (*Global Positioning System*) [25]. Os nós enviam mensagens curtas indicando suas respectivas posições. Para isso, é necessário o uso de uma rede de satélites que enviam sinais para o receptor, e então, a partir disso, o receptor interpreta esses sinais dizendo onde exatamente o nó está naquele momento. Assim, para o envio e recebimento dessas mensagens tanto o GPS deve possuir uma precisão elevada. Exemplos de protocolos dessa categoria são o GPRS (*Greedy Perimeter Stateless Routing*) [26] e o RLS (*Reactive Location Service*) [27].
- Protocolos baseados em **Topologia**: utilizam a informação do enlace da rede como o número de saltos necessários, o custo do enlace ou até se houver uma queda no enlace, para estabelecer o fluxo de dados entre os nós fonte e destino. Nessa categoria tem-se os protocolos proativos OLSR (*Optimized Link State Routing*) [25] e DSDV (*Destination-Sequenced Distance-Vector Routing*) [28], e os protocolos reativos AODV (*Ad-hoc On-Demand Distance Vector*) [29] e DSR (*Dynamic Source Routing*) [30], que não são específicos para VANETs.
- Protocolos **Oportunistas**: como não há garantia de estabelecimento de caminhos entre nós, é necessário desenvolver protocolos que mantenham os dados em circulação até que algum nó alcance a área de cobertura para que a comunicação seja restaurada. Redes que suportam atrasos na comunicação devido à ausência de rota entre nós são conhecidas como DTNs (*Delay Tolerant Networks*) [31, 32]. Exemplos de protocolos de roteamento desenvolvidos para essas redes são *Prophet* [33], *Epidemic* [34] e *MoVe* (*Moving Vector*) [35].

Muitos protocolos de roteamento propostos para VANETs são baseados em posição. Stalin *et al.* [36] propõem uma classificação para esses protocolos. O GSR (*Geographic Source Routing*) é um dos protocolos de roteamento baseado em posição comumente usado como base para desenvolver outros protocolos de roteamento. Goudarzi *et al.* [37], por exemplo, propõem uma versão aprimorada do GSR que usa o algoritmo da colônia de formigas (*Ant Colony*) para encontrar uma rota com conectividade ótima. Os autores assumem que todo veículo tem um mapa digital completo das ruas, composto por cruzamentos e segmentos de rua, e usam informações incluídas nos pacotes de controle, chamados de formigas. Esses pacotes de controle são usados pelos veículos para calcular um peso para cada segmento de rua proporcional à conectividade de rede desse segmento. Já Mansoor *et al.* [38] avaliam o desempenho de diversos protocolos de roteamento baseados em posição desenvolvidos para VANETs, investigando o impacto das interseções de ruas e rodovias no desempenho dos protocolos.

Assim como Mansoor *et al.*, Taha *et al.* [39] comparam o desempenho de protocolos de roteamento em VANETs. Os autores comparam três protocolos de roteamento de redes *ad-hoc* do ponto de vista de um único nó na rodovia, levando em consideração o padrão de mobilidade e tráfego de voz. Os protocolos comparados são AODV, OLSR e GRP (*Geographic Routing Protocol*). A comparação é feita através da análise de métricas de desempenho comuns, como atraso e taxa de transferência fim-a-fim. Barmada *et al.* [40] também avaliam o desempenho de diversos protocolos de roteamento de redes *ad-hoc* e outros específicos para redes veiculares. Os protocolos avaliados são AODV, DSR, OLSR, DSDV, GPSR, CBRP (*Cluster Based Routing Protocol*) e ZRP (*Zone Routing Protocol*). Os cenários simulados são a área urbana do centro de *Auckland*, Nova Zelândia, na qual os veículos transitam com velocidade máxima de 50 km/h; e uma rodovia, na qual a velocidade máxima é de 100 km/h. Os autores tornam a simulação mais realística utilizando o modelo de Nakagami para simular o desvanecimento na região de *Auckland*. A influência da utilização do modelo de propagação no desempenho dos protocolos é investigada considerando intensidades de tráfego baixa, média e alta. Os resultados mostram que o desempenho da rede utilizando os diversos protocolos varia e depende de vários fatores, incluindo a quantidade e a velocidade de veículos que se comunicam na rede. Naim *et al.* [41] investigam o desempenho dos protocolos AODV, DSDV e DSR levando em consideração diversos parâmetros como a taxa de transferência de dados, o atraso, a taxa de entrega de pacotes e a taxa de perda de pacotes. Além desses, os autores avaliam outros parâmetros não levados em consideração pelos autores citados anteriormente, como a variação do atraso (*jitter*) e as desconexões devido à queda de enlaces. A ideia é encontrar o protocolo que satisfaz as necessidades básicas de um sistema em uma VANET. Os autores mostram que cada protocolo se destaca em um critério diferente.

Voltando o foco para o desenvolvimento de novos protocolos de roteamento, Khoza *et al.* [42] propõem o ACOHRP (*Ant Colony Hybrid Routing Protocol*) com o objetivo de melhorar a qualidade do serviço oferecido em sistemas de transporte inteligentes (*Intelligent*

Transportation Systems - ITS). A proposta é aumentar a eficiência e a confiabilidade da transmissão de mensagens de informação e de tráfego de veículos. O ACOHRP oferece alta eficiência através de uma melhor taxa de entrega de pacotes e de atraso fim-a-fim. Diferentemente, Tahira *et al.* [43] se concentra em propor um melhor esquema de roteamento em redes sem fio heterogêneas para VANETs e melhorar o desempenho em termos de vários parâmetros, como taxa de entrega de pacotes e atraso fim-a-fim. Os protocolos *ad-hoc* utilizados para a análise são o AODV, DSDV e OLSR. A ideia principal é propor uma versão otimizada desses protocolos e torná-los mais eficientes para uso em VANETs, considerando uma área urbana. Stalin *et al.* [36] mostra que a estrutura de uma rede veicular depende do uso de recursos de rede para refletir ainda mais a condição atual do sistema e ajustar o arranjo entre alterações contínuas na topologia da rede e as necessidades de qualidade de serviço (*Quality of Service - QoS*). O trabalho é composto por três estágios: o gerador de cenário VANET, com o intuito de criar cenários de rede e tráfego; formulação da função de custo ponderada; e, por fim, a otimização para identificar a configuração otimizada com base na função de custo ponderado formulada. A abordagem proposta propõe um novo protocolo de roteamento, FA-OLSR (*Firefly Algorithm - Optimized Link State Routing*), que melhora a taxa de entrega de pacotes média, reduz a sobrecarga de controle do protocolo de roteamento e diminui o atraso fim-a-fim.

Diferentemente dos outros autores, Zhang *et al.* [44] propõem o protocolo SAODV (*Secure Ad hoc On-Demand Distance Vector Routing*), baseado no AODV, que utiliza aspectos de redes sociais para escolher as rotas. Os autores analisam o desempenho do protocolo através de simulações, que mostram que o SAODV possui melhor desempenho do que o AODV quanto ao atraso médio de transmissão e à taxa de entrega de pacotes. Usha *et al.* [45] também utilizam um protocolo de rede sem fio *ad-hoc* como base para a proposta. Os autores empregam MMPRs (*Multicast Multi Point Relays*) para minimizar os efeitos negativos da inundação provocada pelo OLSR e maximizar a utilização do canal. Diferentemente dos demais autores, Usha *et al.* se preocupam com a segurança da transmissão, garantindo que somente um conjunto selecionado de nós participe do encaminhamento dos pacotes Hello.

Em relação aos protocolos de roteamento, este trabalho difere dos trabalhos citados pois grande parte desses trabalhos baseiam-se em duas métricas, o atraso fim-a-fim médio e o PDR, enquanto neste trabalho utiliza-se também outras métricas para avaliação do desempenho, como o tempo de contato, vazão, perfil de atraso e de perda de propagação. Além disso, muitos desses trabalhos não utilizam medições feitas em campo para avaliar o canal de comunicação explicitando como esse canal pode influenciar no desempenho dos protocolos de roteamento.

Capítulo 3

Propagação e Roteamento em Redes Ad-Hoc Veiculares

Este capítulo apresenta conceitos fundamentais para a compreensão deste trabalho. Primeiramente, discute-se o ambiente de propagação sem fio, apresentando modelos de propagação comumente usados no estudo de VANETs. Em seguida, apresentam-se os conceitos básicos relacionados às redes veiculares e, por fim, discute-se os protocolos de roteamento considerados neste trabalho.

3.1 Ambiente de Propagação Sem Fio

O canal de radio-propagação móvel influencia de forma severa a transmissão de sinais eletromagnéticos, limitando o desempenho de sistemas de comunicação sem fio. A transmissão do sinal pode ocorrer em linha de visada direta (*Line-of-Sight* - LOS) ou não direta (*Non-Line-of-Sight* - NLOS). A visada direta ocorre apenas quando não há obstrução do sinal enviado do transmissor para o receptor. A modelagem do canal sem fio é muito mais complexa do que a dos meios de transmissão cabeados, o que dificulta a previsibilidade da influência dos diversos mecanismos de propagação sobre o sinal. Outro fator agravante para a transmissão sem fio é a mobilidade dos nós, que provoca desconexões frequentes e modificação de rotas, sofrendo influência do efeito *doppler* e da velocidade relativa entre transmissores e receptores.

Apesar de complexa, a modelagem do canal é essencial para permitir o projeto de sistemas de comunicação sem fio. Para tanto, pode-se realizar medições em campo para permitir a criação de modelos matemáticos que descrevam o canal de forma adequada [1]. O ajuste dos modelos é feito através do refinamento de parâmetros de acordo com o cenário estudado. Os modelos de perda de propagação podem ser classificados em quatro grupos [19]:

- **Determinísticos:** utilizam as equações de Maxwell em conjunto com as leis da

Tabela 3.1: Modelos de perda de propagação e de desvanecimento implementados no NS-3.28

Categoria	Modelo
Determinístico	FixedRSS, Matrix, LogDistance, Friis, TwoRayGround
Empírico	COST231
Estatístico	Random
Desvanecimento	Jakes, Nakagami

ótica geométrica, como reflexão e difração, para estabelecer a previsão da intensidade do sinal recebido para determinada distância e em determinado ambiente;

- **Empíricos:** obtidos a partir de experimentos práticos reais, medidas em campo, nas quais são construídas, ou utilizadas, equações pré-estabelecidas para reproduzir os dados reais;
- **Estatísticos:** baseados em análise de probabilidades, tendo como base a contagem de número de sucessos ou acertos resultantes para um dado número de tentativas. Nesse tipo de modelo, o ambiente é modelado como uma série de variáveis aleatórias;
- **Desvanecimento:** divididos em dois tipos, o desvanecimento lento, que é a variação da intensidade do sinal em função da distância, e o desvanecimento rápido, que diz respeito às flutuações rápidas na amplitude do sinal e ocorrem a distâncias próximas de meio comprimento de onda. Essas variações podem ocorrer em função de fenômenos como a difração e propagação do sinal por múltiplos percursos.

Diversos modelos de propagação estão implementados no simulador de redes *Network Simulator 3* (NS-3) [46]. O NS-3 é um simulador de eventos discretos de código aberto, que facilita o estudo de redes e aplicações, permitindo investigar a influência de diversos mecanismos de propagação na comunicação sem fio. É possível, inclusive, combinar diversos modelos de propagação em um mesmo cenário, tornando a simulação mais fiel à realidade. Neste trabalho, utiliza-se a versão 3.28 do NS-3, que suporta os modelos de propagação, alguns listados na Tabela 3.1. Neste trabalho os modelos utilizados são Espaço Livre, Dois Raios e Log-Distância.

3.1.1 Modelo de Espaço Livre

A perda de propagação em espaço livre [1] é a perda da intensidade do sinal com a distância, considerando transmissão em linha de visada [13]. O modelo de espaço livre, também chamado modelo de *Friis*, é considerado como modelo de referência, pois determina a perda experimentada pelo sinal devida unicamente pela distância entre transmissor e receptor. É dito modelo de referência porque representa um cenário ideal, no qual o sinal perde

potência apenas em função da distância, não levando quaisquer outro fenômeno que possa degradar o sinal no percurso entre transmissor e receptor, conforme mostra a Figura 3.1.

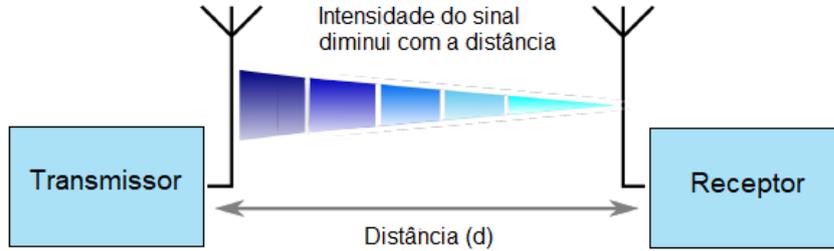


Figura 3.1: Modelo de espaço livre. A atenuação do sinal é função apenas da distância percorrida por ele.

A potência recebida pelo receptor é calculada pela Equação 3.1, em que A_e é a área efetiva da antena receptora e W é a densidade espectral de potência transmitida.

$$P_R = A_e \cdot W \quad (3.1)$$

A área efetiva da antena receptora, A_e , é dada pela Equação 3.2, em que λ é o comprimento de onda e G_R é o ganho da antena de recepção.

$$A_e = \frac{\lambda^2 \cdot G_R}{4 \cdot \pi} \quad (3.2)$$

Uma antena com ganho na transmissão G_T , em espaço livre, com visada direta, possui uma densidade espectral de potência determinada pela Equação 3.3, em que d é a distância entre as duas antenas e P_T é a potência transmitida.

$$W = \frac{P_T \cdot G_T}{4 \cdot \pi \cdot d^2} \quad (3.3)$$

Dessa forma, a Equação 3.1 pode ser reescrita como

$$P_R = \frac{\lambda^2 \cdot G_R}{4 \cdot \pi} \cdot \frac{P_T \cdot G_T}{4 \cdot \pi \cdot d^2} \quad (3.4)$$

Dado que $\lambda = c/f$, em que c é a velocidade da luz no vácuo e f é a frequência do sinal, a Equação 3.4 pode ser reescrita em escala logarítmica de forma a evidenciar a perda de propagação no espaço livre, conforme Equação 3.5, em que d_{km} é a distância em quilômetros e f_{MHz} é a frequência em MegaHertz.

$$PL(d) = 32,44 + 20 \cdot \log(d_{km}) + 20 \cdot \log(f_{MHz}) + G_T + G_R \quad (3.5)$$

3.1.2 Modelo de Dois Raios

O modelo de Dois Raios (*Two-Ray Ground*) é um pouco mais complexo do que o modelo de espaço livre. O modelo considera que sempre há visada entre o transmissor e o receptor, mas parte do sinal é refletida na superfície terrestre. Dessa forma, o modelo de dois raios agrega o efeito provocado pela propagação em múltiplos percursos, descrevendo a intensidade do sinal recebido com base na combinação do sinal direto e do sinal refletido, conforme Figura 3.2. O modelo de dois raios é mais adequado para ambientes que têm poucas obstruções, como áreas rurais e que possui uma distância entre as antenas d maior do que 150 metros [47].

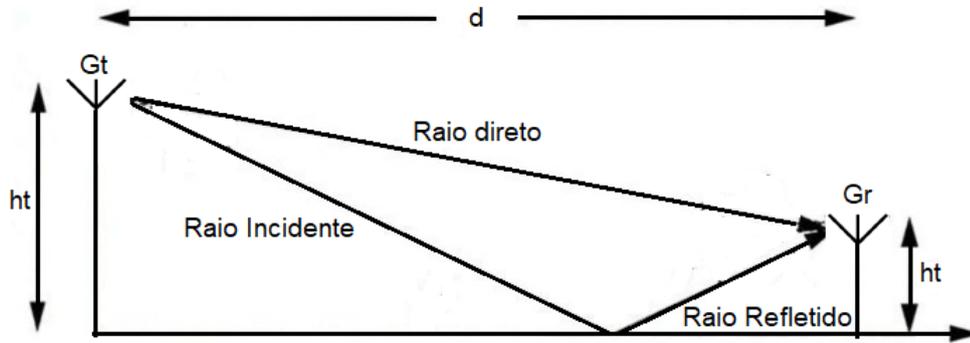


Figura 3.2: Modelo de dois raios. A intensidade do sinal recebido é uma combinação da intensidade do sinal direto e do sinal refletido na superfície terrestre. Adaptado [1]

O modelo de dois raios é baseado na ótica geométrica e leva em consideração a influência dos sinais direto e refletido no percurso entre o transmissor e receptor. A Equação 3.6 define a perda por propagação segundo o modelo de dois raios [48]. A composição dos sinais direto e refletido na antena receptora resulta em um ganho de intensidade do campo elétrico, representado pela razão E_T/E_R , em que E_T é o campo elétrico total na recepção, composto pelo sinal refletido mais o sinal direto e E_R é o campo elétrico do sinal direto. Na equação, d_0 é uma distância de referência, igual a 1 metro e $P(d_0) = -47$ dB. O valor $P(d_0)$ é obtido do modelo de Espaço Livre.

$$PL(d) = P(d_0) + 10 \cdot \gamma \cdot \log(d) - 10 \cdot \log|E_T/E_R|^2 \quad (3.6)$$

Para distâncias longas em relação às alturas das respectivas antenas, isto é, $d \gg h_T, h_R$, em que h_T é a altura da antena transmissora, em metros, e h_R é a altura da antena receptora, em metros, a razão E_T/E_R pode ser aproximada por:

$$\frac{E_T}{E_R} = 2 \cdot \text{sen} \left(\frac{2\pi \cdot h_T \cdot h_R}{\lambda_c \cdot d} \right), \quad (3.7)$$

em que λ_c é o comprimento de onda do sinal transmitido. Sabendo dessa razão, a potência

recebida no modelo de dois raios pode ser reescrita na escala linear conforme Equação 3.8, em que G_T é o ganho de potência da antena transmissora, G_R é o ganho de potência da antena receptora e L é o coeficiente de perda referente ao sistema. A Equação 3.8 não possui a razão E_T/E_R , que é a amortização referente à diferença de fase entre o raio direto e o raio refletido [13]. Essa diferença de fase tem maior influência no perfil de atenuação em curtas distâncias do que para longas distâncias. Isso ocorre porque, para curtas distâncias, a intensidade do raio refletido possui maior relevância em relação ao direto e, devido a inversão de fase, a combinação entre eles se torna destrutiva. Portanto, em curtas distâncias não se pode ignorar o fator de amortização referente à diferença de fase entre os raios refletido e direto.

$$P_R = \frac{P_T G_T G_R (h_t h_r)^2}{L d^4} \quad (3.8)$$

3.1.3 Modelo Log-Distância

O modelo Log-Distância (*Log-Distance*) determina a atenuação média do sinal em função de dois parâmetros, a distância e um coeficiente de decaimento, que varia com o tipo de ambiente [13]. O modelo é definido pela Equação 3.9, em que $P(d_0)$ é a atenuação na distância de referência d_0 , em metros, d é a distância entre as antenas de transmissão e recepção em metros e γ é o coeficiente que determina o decaimento do sinal com a distância. O coeficiente γ ajuda a determinar o tipo de ambiente de propagação.

$$PL(d) = P(d_0) + 10 \cdot \gamma \cdot \log(d/d_0) \quad (3.9)$$

Existe também o modelo 2-Log-Distância, baseado no modelo Log-Distância, mas que considera 2 valores distintos de distância, que definem limiares entre os quais diferentes expoentes são usados. A distância de ponto de quebra (*breakpoint*), d_c , é definida segundo a Equação 3.10 e determina o ponto a partir do qual a Equação 3.9 deixa de ser válida.

$$d_c = \frac{4 \cdot h_T \cdot h_R}{\lambda_c} \quad (3.10)$$

Na Equação 3.10, λ_c é o comprimento de onda do sinal e h_T e h_R são, respectivamente, as alturas das antenas transmissora e receptora. Para distâncias maiores do que d_c , o modelo 2-Log-Distância define a perda de propagação através da Equação 3.11, em que γ_1 e γ_2 correspondem aos coeficientes de decaimento para o primeiro e o segundo limiares de distância, respectivamente.

$$PL(d) = P(d_0) + 10 \cdot \gamma_1 \cdot \log(d_c/d_0) + 10 \cdot \gamma_2 \cdot \log(d/d_0), \quad (3.11)$$

Tanto o modelo de propagação Log-Distância quanto o 2-Log-Distância, são baseados em resultados experimentais. Os modelos Log-Distância e 2-Log-Distância não dependem da frequência do sinal transmitido e dos ganhos das antenas de transmissão e de recepção. Assim, podem ser usados em qualquer tipo de cenário, com uma ressalva para o 2-Log-Distância que é utilizado para ambientes que possuem mais de um tipo de comportamento.

3.2 Redes *Ad-Hoc* Veiculares

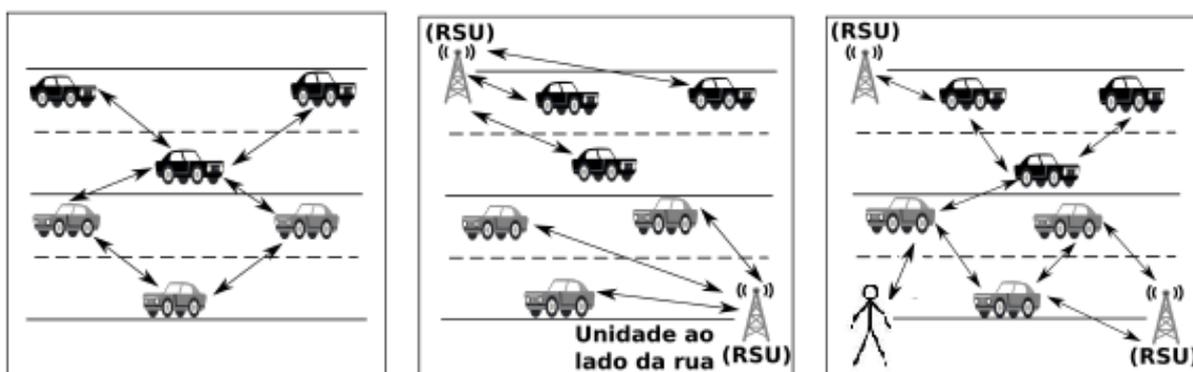
As VANETs se caracterizam pela intensa movimentação dos veículos, que provoca desconexões frequentes devido à alta dinamicidade da topologia da rede que torna o tempo de vida dos enlaces muito curto. A comunicação nesse tipo de rede é desafiadora devido às alterações frequentes de rota e à parca existência de caminhos fim-a-fim. É imprescindível estudar a propagação do sinal nessas redes, visando melhorar a eficiência da comunicação sem fio permitindo o desenvolvimento de aplicações úteis. Por exemplo, a rede veicular pode fornecer serviço de entretenimento e de segurança para motoristas e pedestres, tornando-se uma extensão para acesso à Internet.

3.2.1 Paradigmas de comunicação

A comunicação nas redes veiculares pode ocorrer entre veículos ou entre veículos e a infraestrutura, formando paradigmas de comunicação distintos, que possuem requisitos também distintos. A Figura 3.3 mostra os três paradigmas de comunicação principais: veículo para veículo (*Vehicle-to-Vehicle* - V2V), veículo para infraestrutura (*Vehicle-to-Infrastructure* - V2I) e veículo para tudo (*Vehicle-to-Everything* - V2X). Esse último paradigma vem ganhando cada vez mais importância com o desenvolvimento do 5G, transformando o paradigma V2X em “veículo para tudo através da rede celular” (*Cellular V2X* - C-V2X).

Comunicação entre veículos - V2V

A comunicação V2V se dá de veículo para veículo. Para estabelecer comunicação com veículos a mais de um salto de distância entre eles. Veículos (nós) intermediários devem atuar como roteadores. Com isso, não há necessidade de se ter um elemento centralizador ou gastos com infraestruturas. No entanto, a conectividade depende da densidade da rede e da mobilidade dos nós. Mecanismos de propagação podem interferir no alcance da disseminação das mensagens entre os nós da rede. Além disso, é necessário que os algoritmos de roteamento sejam capazes de lidar com o particionamento da rede e enlaces perdidos, devido à dinamicidade da topologia da rede veicular. Os algoritmos de roteamento devem lidar com esses problemas de maneira rápida e eficaz, a fim de manter a conectividade entre os nós, principalmente no caso de aplicações relacionadas à segurança.



(a) Comunicação V2V.

(b) Comunicação V2I.

(c) Comunicação V2X.

Figura 3.3: Paradigmas de comunicação em VANETs. (a) A comunicação V2V ocorre entre as OBUs dos veículos e a (b) comunicação V2I ocorre entre as OBUs e as RSUs. (c) O cenário em que a comunicação ocorre tanto entre as OBUs como entre OBUs e RSUs é conhecido como V2X. Caso haja uso da rede celular, esse paradigma de comunicação passa a ser chamado de C-V2X. Adaptado [2].

Comunicação entre veículo e infraestrutura - V2I

A comunicação V2I exige a construção de uma infraestrutura, composta por nós fixos, para suportar a comunicação nas redes veiculares. Nesse tipo de comunicação, veículos só trocam informação com a infraestrutura às margens das vias, composta pelas RSUs que podem estar, por exemplo, em postes de iluminação e sinais de trânsito. A comunicação V2I é demasiadamente custosa [49] para implementar se comparada ao V2V, mas é capaz de aumentar a cobertura da comunicação e possibilita a integração com outras redes e sistemas, como a Internet.

Comunicação de veículos para tudo - V2X

A comunicação V2X ocorre em um cenário híbrido no qual coexistem a comunicação V2I e V2V. Inclui-se também a comunicação com outras unidades móveis como pessoas e bicicletas. A inclusão da tecnologia celular nesse cenário origina o C-V2X, que é um termo recente introduzido para tecnologias celulares otimizadas para o transporte de veículos e veículos conectados. O C-V2X inclui um novo modo de operação para as redes veiculares definido pela primeira vez nas especificações do 3GPP *Release* 14 e aprovada em junho de 2017, que permite a comunicação V2V e V2I sem exigir nenhuma cobertura ou assinatura de rede celular [50]. O C-V2x também pode oferecer suporte à comunicação com usuários vulneráveis do cenário veicular, como os pedestres, através da comunicação veículo para pedestres (*Vehicle-to-Pedestrian* - V2P), integrando a tecnologia de comunicação direta em dispositivos móveis pessoais como *tablets* e *smartphones*. A funcionalidade de comunicação direta é usada para oferecer suporte específico a serviços críticos de segurança para reduzir o número de colisões, oferecer suporte à direção autônoma e melhorar o

tráfego de veículos [51].

3.2.2 Arquitetura WAVE/DSRC

O desenvolvimento de aplicações de entretenimento e de segurança para redes veiculares é suportado pela arquitetura WAVE/DSRC (*Wireless Access in Vehicular Environments / Dedicated Short-Range Communications*). A arquitetura WAVE tem como objetivo permitir a interoperabilidade em VANETs [52]. Seu processo de padronização foi iniciado em 2004 pelo IEEE (*Institute of Electrical and Electronic Engineers*) e é composta pelos seguintes padrões de protocolos: IEEE P1609.2, IEEE P1609.3, IEEE P1609.4, IEEE 802.11p. A Figura 3.4 mostra a arquitetura WAVE padronizada pelo IEEE.

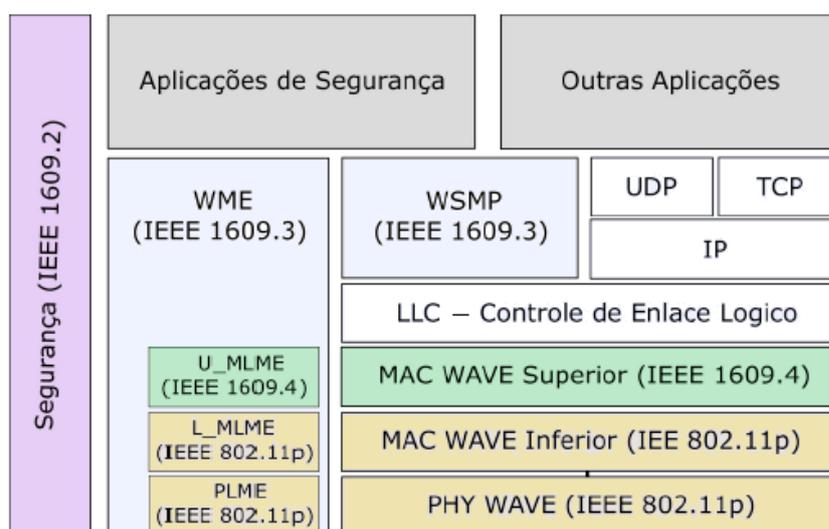


Figura 3.4: A arquitetura WAVE/DSRC define a faixa de frequências usada para comunicação veicular e os protocolos de camada física, camada de enlace e segurança. Adaptado [3].

Em 1999 a *Federal Communications Commission* (FCC) [9], reservou 75 MHz do espectro de frequências, na faixa de 5,850 GHz a 5,925 GHz, para serem utilizados nas comunicações V2I e V2V [9]. Essa faixa de frequências ficou conhecida como DSRC, sendo composta por 7 canais, com 5 MHz de banda de guarda entre eles. Existem 4 canais para serviços, 1 para emergências, 1 para controle e 1 para segurança pública. Os canais DSRC estão ilustrados na Figura 3.5. O objetivo principal para a reserva dessa faixa de frequências e criação de uma nova arquitetura específica para comunicação veicular era melhorar a segurança, envolvendo motoristas, passageiros e pedestres, o fluxo no trânsito de veículos, diminuindo o número de acidentes fatais, ao mesmo tempo em que se garante a interoperabilidade entre os dispositivos.

O padrão **IEEE 802.11p** especifica a subcamada de acesso ao meio (*Medium Access Control* - MAC) inferior e a camada física. Esse padrão é baseado no padrão IEEE 802.11a [53] para redes locais sem fio. O protocolo foi adaptado para o ambiente veicular

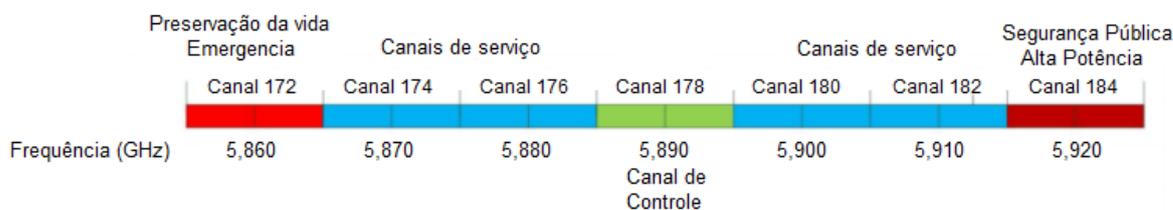


Figura 3.5: Os canais DSRC possuem 10 MHz de largura de banda e são separados por uma banda de guarda de 5 MHz. Existem 7 canais, sendo 4 canais para aplicações comuns, 1 para aplicações de serviços de emergência, 1 para controle e 1 para aplicações de segurança pública. Adaptado [3].

pela ATSM (*American Society for Testing and Materials*), através de alterações na implementação dos serviços da camada física e da camada de enlace. O IEEE 802.11p utiliza metade da banda passante do IEEE 802.11a, sendo igual a 10 MHz. O tempo de contato curto nas redes veiculares é um fator limitante para a comunicação, dificultando o uso do padrão IEEE 802.11 (Wi-Fi) nas VANETs devido à necessidade de associação entre as entidades comunicantes. Assim, o IEEE 802.11p não requer autenticação nem associação para que os nós possam se comunicar. Para tanto, o padrão implementa um identificador coringa para BSS (*Basic Service Set*), que consiste de um simples *Access Point* que suporta um ou mais clientes sem fio, conhecido como BSSID (*BSS Identification*). Essa modificação facilita a comunicação, uma vez que os nós não gastam o tempo de um contato com sobrecarga de autenticação e associação [54].

O IEEE 802.11p especifica o uso de modulação OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) para transmissão do sinal, com taxas que variam de 3 a 27 Mb/s para um espaçamento de canal de 10 MHz e de 6 a 54 Mb/s para um espaçamento de canal de 20 MHz [55]. O OFDM divide a banda total disponível em subportadoras, permitindo a transmissão de múltiplos sinais com uma ocupação espectral menor. As subportadoras são ditas ortogonais porque não há interferência entre os sinais carregados por elas. Como consequência, tem-se que o tempo de cada símbolo é maior, tornando o sinal menos sensível aos ruídos, à multiplicidade de caminhos e à interferência entre símbolos [56, 57]. O OFDM tem como principais vantagens a elevada imunidade a interferências, a implementação eficiente usando FFT (*Fast Fourier Transform*), a baixa sensibilidade a erros de sincronização de relógio e alta eficiência espectral. Já suas desvantagens principais consistem em maior sensibilidade ao efeito *Doppler* e a problemas de desvio de frequência.

O padrão **IEEE 1609.4** especifica a subcamada de acesso ao meio superior. É o padrão que fornece aprimoramentos ao IEEE 802.11, modificando a camada MAC para suportar aplicações WAVE e que permite que sejam utilizados os múltiplos canais de comunicação DSRC. Já o padrão **IEEE 1609.3** especifica serviços relacionados às camadas de rede e de transporte. O padrão estabelece um protocolo de mensagens curtas WAVE (*Wave Short Message Protocol - WSMP*), que é uma possível alternativa aos protocolos TCP e UDP. O padrão também implementa serviços da subcamada de controle de enlace

lógico (*Logic Link Control* - LLC) que foca em prover transmissões mais rápidas e eficientes. Por fim, o padrão **IEEE 1609.2** é responsável por definir formatos e processamento de mensagens seguras. Esse padrão também define as circunstâncias para o uso de trocas de mensagens seguras e como essas mensagens devem ser processadas com base na finalidade da troca.

3.3 Protocolos de Roteamento para Redes *Ad-Hoc* Móveis

As Redes *Ad-Hoc* Móveis (*Mobile Ad-Hoc Networks* - MANETs) possuem topologia dinâmica, uma vez que sempre que um nó se move a topologia da rede pode mudar, inclusive podendo haver perda de contato entre nós antes vizinhos. A necessidade de enviar dados para destinos que estão a múltiplos saltos de distância requer a execução de um protocolo de roteamento. No entanto, a dinamicidade da topologia das MANETs torna o roteamento uma tarefa complexa. As VANETs são um caso especial de MANET na qual os nós são veículos e se movem mais rapidamente, resultando em perdas de contato muito mais frequentes, desconexões e constante mudança na topologia, eliminando rotas que existiam e criando novas rotas.

Pesquisas relacionadas às MANETs são feitas há décadas e resultaram em diversas propostas de protocolos de roteamento, cada um com suas vantagens e desvantagens. No entanto, devido à diferença na dinamicidade das VANETs, os protocolos de roteamento das MANETs não podem ser diretamente aplicados às VANETs. Assim, é necessário desenvolver novos protocolos de roteamento específicos para o cenário das redes veiculares. Vários desses protocolos têm como base o funcionamento dos protocolos de roteamento das MANETs. A complexidade do cenário veicular advém da necessidade de manter e descobrir rotas em uma topologia que se modifica com frequência e de forma não padronizada. Os protocolos de roteamento de redes *ad-hoc* são divididos em três tipos: reativos, proativos e híbridos [58, 59, 60]. Os protocolos de roteamento híbridos possuem características de protocolos reativos e proativos, e visam melhorar a eficiência do roteamento, reduzindo a sobrecarga de controle. Esse tipo de protocolo está fora do escopo desta dissertação e, portanto, não é discutido.

3.3.1 Protocolos de roteamento proativos

Os protocolos de roteamento proativos se caracterizam por ter conhecimento das rotas a todo instante. O cálculo das rotas geralmente usa algoritmos que buscam os caminhos mais curtos. Nos protocolos proativos, cada nó possui uma função proativa, que mantém as informações atualizadas de todas as rotas nas tabelas de roteamento. Além disso há o compartilhamento dessa tabela com os vizinhos através de atualizações periódicas

ou quando há algum tipo de alteração na topologia da rede [61]. Assim, teoricamente cada nó possui rotas disponíveis a qualquer momento para qualquer situação. Isso não é verdade para redes altamente dinâmicas, como as redes veiculares, uma vez que as rotas tornam-se inválidas a todo instante, dificultando a manutenção de uma tabela de roteamento atualizada em todos os momentos. Geralmente as estratégias de roteamento empregadas pelos protocolos proativos são baseadas em protocolos de estado de enlace como o OLSR (*Optimized Link State Routing*), mas também podem ser baseadas em protocolos de vetor de distância como o DSDV (*Destination Sequence Distance Vector*).

OLSR: *Optimized Link State Routing*

O OLSR é um protocolo proativo desenvolvido para redes densas e utiliza informações de estado de enlace [62]. Esse protocolo mantém a tabela de roteamento através da troca de mensagens constante entre vizinhos com informações sobre a rede. Tais mensagens percorrem a rede espalhando a informação para todos os nós. Uma das mensagens que o OLSR possui é o `Hello`, utilizado para descobrir os vizinhos a 1 e 2 saltos de distância. Essa mensagem é enviada periodicamente em todos os enlaces conectados a um nó. A partir da informação de vizinhança obtida, determina-se quem são os nós MPR (*Multi-Point Relay*) para cada transmissor. Então, quando uma informação deve ser atualizada na rede, os pacotes enviados por um nó chegarão a todos os seus vizinhos, mas somente aqueles atribuídos como nó MPR podem retransmitir a informação adiante. Esse processo se repete com os próximos nós que receberem os pacotes. Assim, cada nó receberá apenas uma vez as informações, ou seja, não haverá nós recebendo os pacotes mais de uma vez. A difusão de mensagens pelos MPRs ocorre como ilustrado na Figura 3.6, na qual tem-se 11 nós MPR que são responsáveis pelas retransmissões para difundir as mensagens. Além das mensagens `Hello`, o OLSR também envia mensagens `Topology Control`. Essas mensagens são difundidas pela rede e enviadas periodicamente pelos nós. Apenas os nós MPR podem encaminhar essas mensagens, reduzindo o número de retransmissões na rede e evitando a inundação.

Por ser um protocolo proativo, as rotas são conhecidas para todos os destinos mesmo antes de serem usadas, o que é uma característica dos protocolos de roteamento proativos. Isso faz com que não exista um atraso inicial para descobrir rotas durante o envio do fluxo de pacotes da aplicação, já que a tabela de rotas deve estar atualizada antes de a aplicação enviar dados. O controle de roteamento e o custo de operação, em comparação com os protocolos reativos, em geral são maiores, devido ao compartilhamento e atualização das tabelas dos vizinhos. No entanto a manutenção das tabelas de roteamento com rotas atualizadas a todo instante provoca uma sobrecarga de controle elevada, principalmente em uma rede cuja topologia se modifica com frequência. Dessa forma, sendo um protocolo de estado de enlace, o OLSR exige elevada largura de banda e poder de processamento para descobrir rotas ótimas.

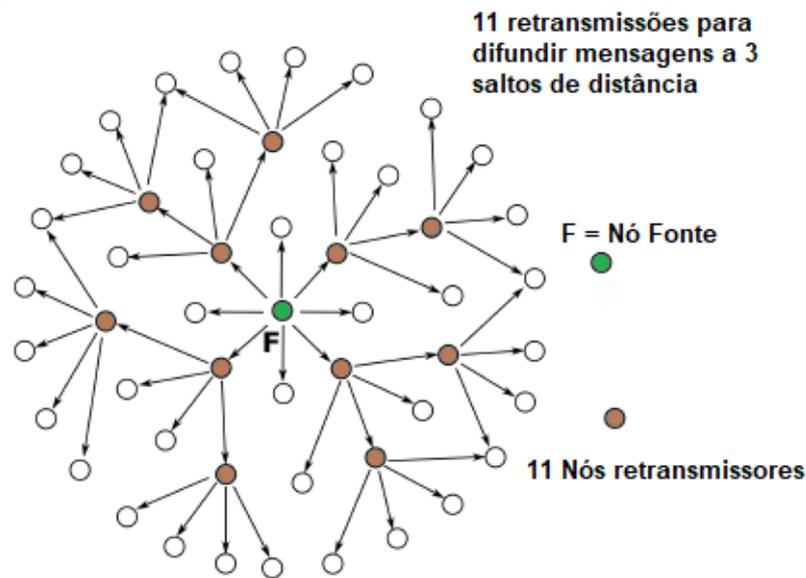


Figura 3.6: Difusão de mensagens com MPR. Em vez de todos os nós inundarem a rede com mensagens, apenas os nós MPRs ficam responsáveis por retransmitir mensagens de controle. Isso diminui o número de mensagens redundantes na rede, reduzindo a sobrecarga de controle. Adaptado [4].

DSDV: *Destination Sequence Distance Vector*

O DSDV é um protocolo proativo que se baseia no algoritmo de vetor de distância de Bellman-Ford [63]. Cada nó precisa transmitir atualizações periódicas para os vizinhos, contendo informações sobre sua tabela de roteamento. As tabelas de roteamento possuem entradas para cada destino e o custo necessário para alcançá-los. As atualizações das tabelas são propagadas por meio de mecanismos de atualização periódica, sendo difundidas para todos os nós da rede. As mensagens difundidas contêm informações de destino, custo para alcançá-lo, número de sequência da mensagem recebida com as informações sobre o destino e número de sequência da mensagem que está sendo transmitida. A rota rotulada com o número de sequência mais recente será sempre utilizada.

Quando os vizinhos do nó transmissor recebem uma atualização, reconhecem que estão a um salto do nó de origem e incluem essa informação em sua tabela de roteamento. A informação é composta pelo vetor de distância, que contém o custo para o nó vizinho. Cada nó armazena o próximo salto da rota para cada destino acessível em sua tabela de roteamento. A rota atual é sempre aquela cuja informação recebida tem o maior número de sequência, ou seja, a informação mais recente. Quando determinado nó descobre que seu nó vizinho não é mais acessível, anuncia a rota para o nó vizinho com uma métrica infinita e um número de sequência uma unidade maior que o número de sequência mais recente da rota, forçando quaisquer nós intermediários a redefinirem suas tabelas de roteamento. Embora o DSDV possua tempo de atraso relativamente baixo para encontrar rotas, posto

que todos os dispositivos sempre tem uma tabela de roteamento atualizada, devido a constante troca de mensagens de controle ocupa banda e gasta energia dos dispositivos envolvidos.

3.3.2 Protocolos de Roteamento Reativos

Os protocolos de roteamento reativos se caracterizam por não possuírem rotas atualizadas para os destinos a todo momento. As rotas são buscadas e atualizadas apenas quando há demanda de comunicação com o destino. Dessa forma, os protocolos de roteamento dessa categoria reagem às demandas de comunicação, buscando rotas até o destino com o qual se deseja comunicar no momento em que a comunicação deve ocorrer. Nesse momento, o nó envia uma mensagem de descoberta de rota e, ao obter a resposta, os nós relacionados àquela rota são adicionados à tabela de roteamento, construindo o caminho para o destino. Após a descoberta de rota, o fluxo de dados pode ser enviado para o destino. Um problema intrínseco aos protocolos de roteamento reativos é o aumento no atraso da comunicação devido à necessidade de descobrir e construir a rota no momento da demanda pela comunicação. No entanto, esses protocolos têm menor sobrecarga de controle e gastam menos largura de banda quando comparados com os protocolos de roteamento proativos [64].

Os protocolos de roteamento reativos são divididos em dois grandes grupos: baseados na fonte, e ponto-a-ponto. Nos protocolos reativos baseados na fonte, a rota por onde os dados irão trafegar é adicionada ao cabeçalho de cada pacote. Apesar de facilitar o encaminhamento dos pacotes, uma vez que todos os nós intermediários da rota são conhecidos e estão em ordem, em redes com múltiplos saltos entre os nós fonte e destino o cabeçalho pode se tornar muito grande comparado ao conteúdo útil do pacote. Nos protocolos reativos ponto-a-ponto, o próximo salto é determinado a cada nó que recebe a mensagem a ser enviada para o destino, isto é, as rotas são descobertas a cada salto, definindo o próximo salto no caminho. Devido a essa característica, os protocolos salto-a-salto são mais adaptáveis a mudanças na topologia. Os dois principais protocolos de roteamento reativos são o AODV (*Ad-Hoc On-Demand Distance Vector*) e o DSR (*Dynamic Source Routing*).

3.3.3 DSR: *Dynamic Source Routing*

O DSR é um protocolo de roteamento reativo baseado na fonte, criado com a intenção de otimizar o uso da largura de banda, eliminando o envio de mensagens periódicas **Hello** para determinar o estado do enlace com vizinhos. Nesse protocolo, evita-se os laços de roteamento usando um identificador para as mensagens **RREQ**. O processo de descoberta de rotas no DSR começa com a demanda de envio de dados para um destino. Então, um pacote **RREQ** é difundido pela rede. Quando um nó recebe esse pacote e esse nó conhece a

rota até o destino específico ou é o destino final, responde a quem solicitou a informação com um pacote **RREP** (*Route Reply*). Cada nó associa um temporizador à rota encontrada. Caso haja ociosidade da rota por um determinado período, ela é excluída. Caso ocorra algum erro na rota, por exemplo, uma falha de enlace, o nó que detecta a falha envia uma mensagem de erro **RERR** (*Route Error*) para o nó fonte. Essas mensagens são usadas no processo de manutenção de rotas. Quando o nó de origem recebe essa mensagem, inicia o processo de busca por rotas alternativas para alcançar o destino. Os nós intermediários que recebem a mensagem **RERR** enviada para a fonte excluem a rota com problema.

O DSR possui, ainda, uma função de “escuta promíscua” (*Promiscuous Listening*), que permite que os nós recebam e processem os pacotes de dados na camada de enlace que não são a eles destinados, para que esses nós possam atualizar as rotas armazenadas com a informação escutada. Assim, os nós processam quadros que não são destinados a eles.

Por ser reativo, O DSR possui um *overhead* relacionado às mensagens de controle muito baixo quando comparado aos proativos. Não há a necessidade de realizar inundações periódicas que gastam energia e ocupam a banda. No entanto o tempo para se estabelecer uma rota poderá ser bem maior, comparando com os proativos, pois todos os caminhos não necessariamente estarão disponíveis a todo o momento. Além desse fator, já que todos os roteadores intermediários em uma rota são armazenados, as tabelas de rotas “cacheadas” podem se tornar extensas em redes grandes.

3.3.4 AODV: *Ad-Hoc On-Demand Distant Vector*

O AODV é um exemplo de protocolo de roteamento reativo ponto-a-ponto que estabelece rotas de acordo com a demanda. O AODV utiliza tabelas *cache* para cada nó, evitando o uso do cabeçalho dos pacotes para transportar informações de rota. O AODV utiliza números de sequência para evitar a ocorrência de laços e envia mensagens *Hello* para avaliar o estado do enlace com nós vizinhos. Caso a mensagem não seja recebida dentro de um determinado intervalo de tempo, considera-se que o enlace está inativo e as rotas que usam aquele enlace devem ser excluídas. Essa avaliação do estado do enlace com os vizinhos é um diferencial do AODV, que contribui para a eliminação rápida de rotas defeituosas devido à perda de comunicação com um vizinho. Quando é necessário o envio de pacotes a um nó destino que não consta em sua tabela de roteamento, inicia-se um processo de redescoberta de rota a partir desse nó. Enquanto a rota não é reconstruída, os pacotes recebidos por esse nó são armazenados. Não encontrando uma nova rota, é enviada uma mensagem **RREP** (*Route Replay*) para o nó de origem e para todos os nós que forem necessários avisando sobre o erro. Um nó, ao receber esse pacote, tem seu *cache* atualizado, de forma a remover de suas rotas armazenadas todas as sub-rotas posteriores às ligações quebradas.

No AODV, um processo de descoberta de rotas é realizado através da inundação de

pacotes RREQ (*Route Requests*). Cada nó possui dois contadores: identificador de *broadcast* e um número de sequência. Sempre que um nó transmissor deseja se comunicar com outro nó para o qual ele ainda não possui alguma entrada relativa a esse nó em sua respectiva tabela de roteamento, ele incrementa o seu número de sequência e inunda a rede com um RREQ. O identificador de *broadcast* é um contador local mantido por cada nó e incrementado sempre quando há a transmissão de um novo pacote RREQ [65]. Porém, além dos problemas por ser um protocolo reativo, o AODV não se adapta bem ao roteamento assimétrico.

Capítulo 4

Metodologia de Avaliação da Influência do Ambiente de Propagação na Rede Veicular

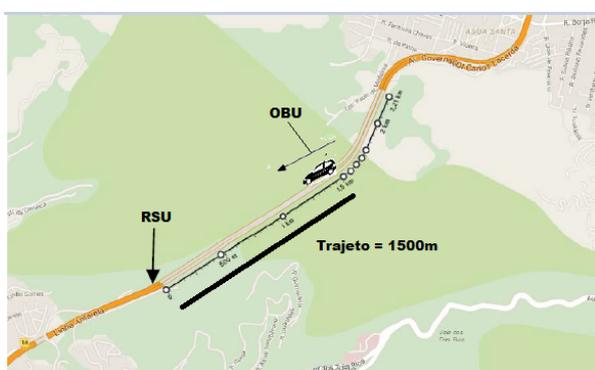
O objetivo deste trabalho é analisar o impacto dos modelos de propagação no desempenho de protocolos de roteamento em uma rede veicular V2I. Para tanto, é necessário entender como as simulações podem auxiliar a avaliação e quais são os principais simuladores existentes. As simulações complementam os experimentos de medição reais, que também precisam ser discutidos. Assim, este capítulo discute o papel das simulações e dos experimentos reais para alcançar os objetivos deste trabalho e, por fim, apresenta a configuração da simulação implementada para avaliar a influência do ambiente de propagação nos protocolos de roteamento.

4.1 Experimentos de medição em campo

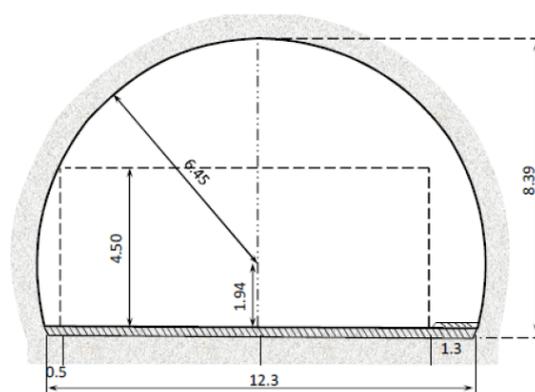
Os experimentos práticos para análise de comunicação em VANETs são escassos [66]. Portanto, esforços para a realização de experimentos de medição em campo são importantes e necessários, e validar simulações se torna uma lacuna que precisa ser melhor aproveitada pelos pesquisadores e entusiastas dessa área. Neste trabalho, avalia-se a comunicação V2I em dois cenários, um túnel e uma estrada, que representam, respectivamente, um ambiente interno (*indoor*) e um ambiente externo (*outdoor*) de propagação. Em ambos os cenários, a frequência de operação utilizada é de 5,8 GHz. É importante analisar os dois cenários para verificar a diferença de desempenho em ambientes de propagação distintos. O cenário de túnel descreve um canal de propagação com forte influência de multipercursos e possui características similares aos valores teóricos obtidos quando se considera o túnel como um guia de onda [67]. Já na área aberta de uma estrada, o canal de propagação sofre principalmente com a influência de reflexões no solo e corpos de água.

4.1.1 Cenário 1: Túnel

A cidade do Rio de Janeiro possui, atualmente, 22 túneis que interconectam diversas áreas da cidade e possuem comprimentos que variam de 182 m até 2.197 m [68]. O Túnel Engenheiro Raymundo de Paula Soares, conhecido popularmente como Túnel da Covanca, é o local escolhido para realizar as campanhas de medição [69]. Esse Túnel é o segundo maior do mundo com 2.197 m de comprimento total com três faixas separadas, cada uma com 4 m de largura. A Figura 4.1(a) mostra uma visão aérea do túnel e a Figura 4.1(b) especifica as dimensões desse túnel [69]. É importante ressaltar que as medições são realizadas no período noturno, e sem tráfego de veículos, de forma a manter uma velocidade constante do veículo para a análise durante todo o percurso.



(a) Vista aérea do túnel.



(b) Dimensões do túnel.

Figura 4.1: O Túnel Engenheiro Raymundo de Paula Soares possui 2.197 m de extensão com aproximadamente 12 m de largura total. O trajeto da campanha de medição é um trecho em linha reta que possui 1.500 m de comprimento.

Na configuração da medição, utiliza-se um sistema fixo de transmissão que faz o papel de RSU, instalado sobre a carroceria de um caminhão, e um veículo com o sistema de recepção todo instalado em seu interior, fazendo o papel de OBU e se movendo com uma velocidade aproximadamente constante, resultando em uma velocidade média de 30 km/h. Uma antena omnidirecional e uma direcional são utilizadas respectivamente para recepção e transmissão. A antena receptora é fixada no teto do veículo com altura de 1,5 m, enquanto a antena transmissora é fixada a uma altura de 5 m. Importante evidenciar que nessa campanha de medições não é utilizado o sistema GPS para a determinação das distâncias. A distância entre cada captura realizada é calculada em função do comprimento total e velocidade de movimento.

Em relação ao sistema de transmissão, são utilizados (i) um gerador de energia, (ii) um gerador vetorial de sinal da Anritsu, modelo MG3710, (iii) uma antena direcional da Iwtech, modelo OIW-5817P090V, (iv) cabos coaxiais e conectores. O gerador de energia serve para fornecer energia para todo o sistema, o gerador vetorial é responsável pela geração do sinal a ser transmitido pela antena. O diagrama de radiação da antena transmissora é

mostrado na Figura 4.2.

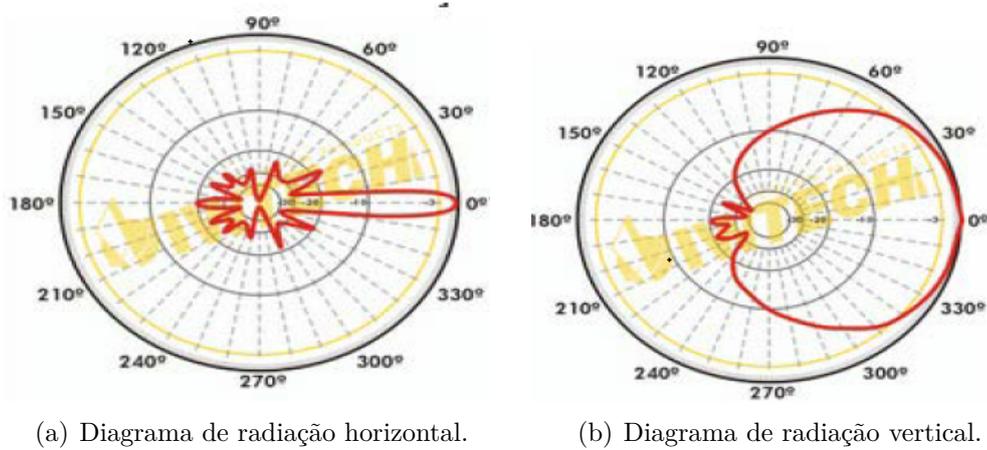


Figura 4.2: Diagrama de radiação da antena de transmissão.

Considerando os ganhos e as perdas de potência no sistema de transmissão, a potência efetivamente radiada (*Effective Isotropic Radiated Power - EIRP*) é calculada conforme Equação 4.1, em que P_{gs} é a potência de saída do gerador de sinais, G_T é o ganho da antena transmissora e L_{cc} é a perda nos cabos e conectores. Para os valores $P_{gs} = 10$ dBm, $G_T = 15$ dBi, e $L_{cc} = 3$ dBm, a EIRP calculada é igual a 22 dBm.

$$EIRP = P_{gs} + G_T - L_{cc} \quad (4.1)$$

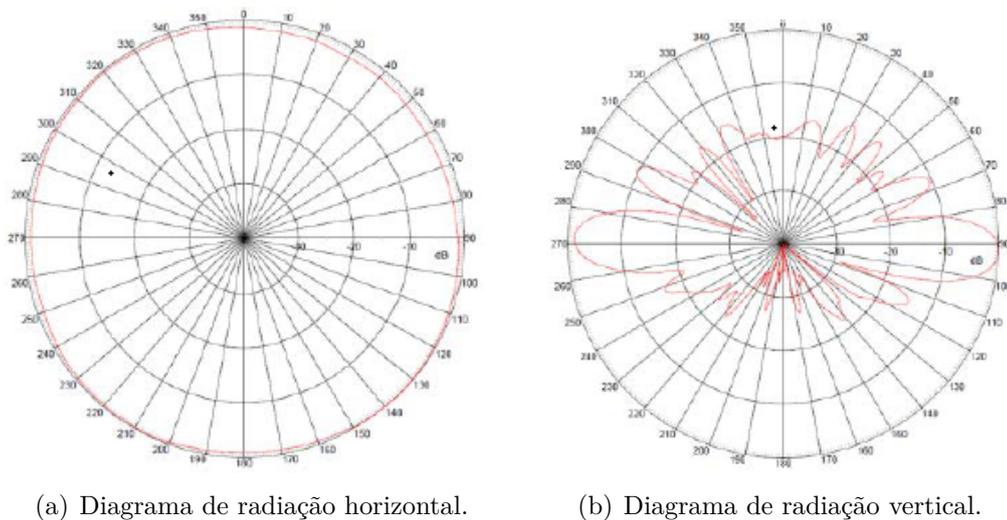


Figura 4.3: Diagrama de radiação da antena de recepção.

Já o sistema de recepção é composto por (i) inversor de 600 W e bateria de 60 Ah/12 V, (ii) analisador vetorial de rede/espectro portátil da Anritsu, modelo MS2034A, (iii) antena omnidirecional da Cisco, modelo AIR-ANT2547V-N, (iv) cabos coaxiais e conectores. O inversor possui como função a inversão de corrente contínua para alternada e assim

alimentar o sistema, o analisador vetorial serve para a leitura da recepção do sinal e a antena omnidirecional serve para a recepção do sinal. O diagrama de radiação da antena receptora é mostrado na Figura 4.3.

Vale explicitar que a utilização de uma antena omnidirecional no sistema de recepção, na campanha de medições V2I é necessária para que os sinais provenientes de multipercursos em relação ao sinal transmitido sejam captados e analisados. A configuração completa dos sistemas de transmissão e recepção está mostrada na Figura 4.4.

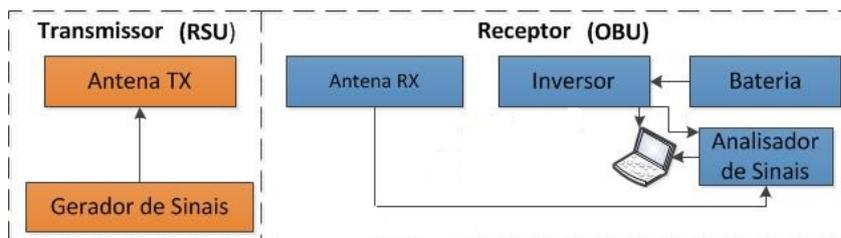


Figura 4.4: Esquema do cenário experimental para obtenção das medidas reais. O transmissor, fixo, envia sinais para o receptor, que se move com uma velocidade aproximadamente constante.

4.1.2 Cenário 2: Área aberta

Em relação à campanha de medições em área aberta, o ambiente é composto por algumas árvores, espaçadas com uma média de 4 m, e há presença de algumas construções em apenas um lado da via, espaçadas com uma média de 30 m. É importante destacar também que existe um grande corpo d'água do outro lado da via. A via em que ocorre a coleta é a Avenida Milton Tavares de Souza, em Niterói, Rio de Janeiro, que está próxima a uma das entradas do campus da Praia Vermelha da Universidade Federal Fluminense. A coleta é feita em um percurso de 225 m, no período diurno, e o tráfego de veículos é reduzido. A Figura 4.5, mostra a vista aérea da área aberta.

A antena do sistema de transmissão é fixada no centro da rota percorrida, em um muro de contenção, estando a aproximadamente 5 metros de altura do nível da rua. O sistema de transmissão representa a RSU nesse cenário. Já o sistema de recepção, que representa a OBU, tem sua antena receptora colocada a 1,5 m acima do nível da rua, instalada sobre o teto do carro. O carro, por sua vez, se move pela avenida com uma velocidade aproximadamente constante, resultando em uma velocidade média de 30 km/h. Assim como nas medições do cenário de túnel, não se utiliza GPS para determinar o posicionamento a cada coleta. A distância entre cada captura é calculada com base no tamanho total do percurso e na velocidade média do veículo.

A configuração de medição dos sistemas de transmissão e recepção é similar ao das medições no túnel. No entanto, no cenário de área aberta são utilizadas antenas omnidirecionais da Anritsu, modelo ANT2547V-N, com ganho de 7 dBi. Considerando

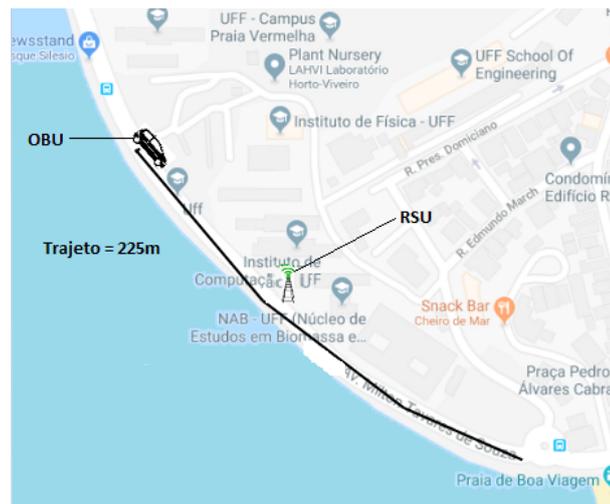


Figura 4.5: Vista aérea da área aberta. A coleta é feita por um trajeto de 225 m em um ambiente composto por árvores espaçadas, prédios espaçados em um dos lados da via e um corpo d'água do outro lado da via.

as perdas e ganhos de potência na transmissão, a potência efetivamente radiada, EIRP, é calculada conforme Equação 4.1. Utilizando os valores $P_{gs} = 11$ dBm, $G_T = 7$ dBi, e $L_{cc} = 2$ dBm, a EIRP calculada é igual a 16 dBm.

4.2 Simulações

A implantação de sistemas reais para realizar pesquisas na área de redes veiculares é cara e complexa, o que muitas vezes torna essa pesquisa inviável. A existência de simuladores que permitem implementar cenários veiculares facilita o desenvolvimento de pesquisas na área. A simulação é uma ferramenta usada para a solução de determinado tipo de problema em uma escala menor, através de uma análise de modelos que descrevem, detalhadamente, o comportamento do sistema simulado, utilizando um software. Atualmente, existem diversos tipos de simuladores em código aberto e bastante utilizados por pesquisadores e entusiastas no assunto, como o *Network Simulator 3* (NS-3)* e o OMNeT++ †.

A metodologia utilizada neste trabalho para construção da simulação dos Cenários 1 e 2 segue três etapas bem definidas. A primeira etapa é a modelagem do tráfego de veículos (mobilidade), que consiste na configuração da movimentação dos nós na rede; a segunda é a modelagem da rede (comunicação), que consiste na configuração dos parâmetros da rede incluindo os modelos de propagação e protocolos de roteamento utilizados; por fim, a terceira é a análise dos resultados gerados pelo simulador, que consiste na avaliação quantitativa dos resultados através das métricas selecionadas. A Figura 4.6 mostra essas etapas de forma ilustrativa, descrevendo as principais características de cada uma delas.

*<https://www.nsnam.org/>

†<https://omnetpp.org/>

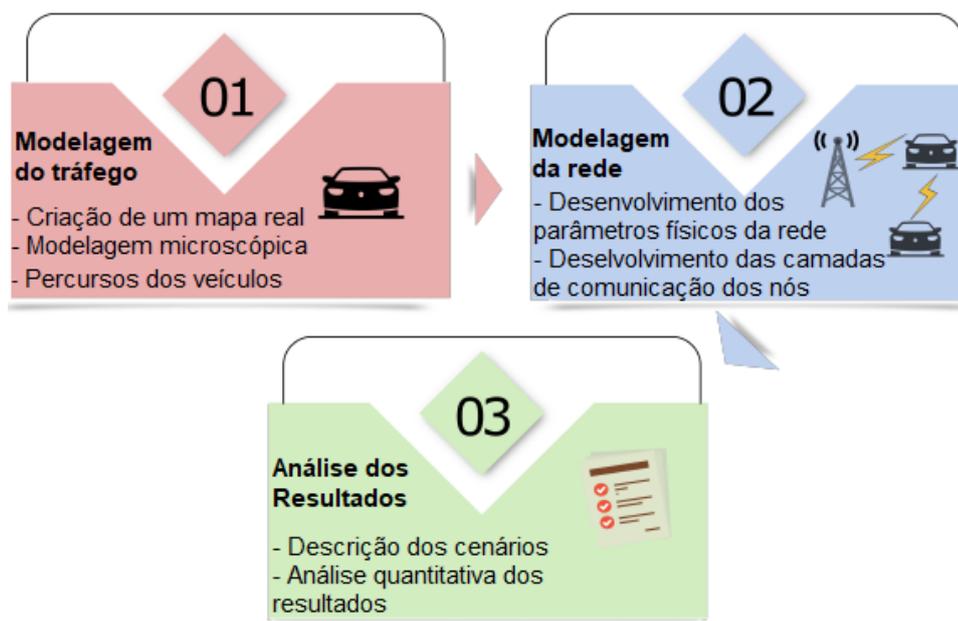


Figura 4.6: Metodologia utilizada para construção da simulação dos Cenários 1 e 2 avaliados neste trabalho. A movimentação dos nós é configurada na etapa de modelagem do tráfego. Em seguida, ocorre a modelagem da rede, com a configuração dos parâmetros da rede e das camadas de interconexão. Por fim, os resultados obtidos são avaliados na etapa de análise dos resultados.

4.2.1 Principais simuladores de redes

Existem diversos simuladores de rede, tanto em código livre como em código proprietário, para a avaliação de vários protocolos de comunicação. O *Network Simulator 2* (NS-2) é um dos simuladores mais usados para avaliação de protocolos de comunicação. O NS-2 [5] é um simulador de eventos discretos, desenvolvido em C++, que se mostra útil no estudo da natureza dinâmica das redes de comunicação e tem como característica importante a universalidade e maturidade dos modelos implementados. A simulação de funções e protocolos de redes com fio e sem fio como algoritmos de roteamento e protocolos da camada de transporte pode ser feita usando o NS-2. Devido à sua flexibilidade e natureza modular, o NS-2 ganhou popularidade na comunidade de pesquisa em rede desde a sua criação em 1989 [70].

O *Global Mobile Information System*, GloMoSim é um ambiente de simulação para redes sem fio em grande escala e redes satelitais [71]. É um simulador de eventos discretos paralelos com a linguagem baseada em *Parsec* [72] e suporta vários tipos de protocolos da camada de enlace de dados, como IEEE 802.11 e CSMA (*Carrier Sense Multiple Access*), assim como algoritmos de roteamento. Além disso, esse simulador permite instâncias *multicast*.

O *Staged Network Simulator*, SNS [73], é um simulador em código aberto desenvolvido pela Universidade de *Cornell* nos Estados Unidos, propõe um conceito de simulação

conhecido como “simulação em estágios”. A simulação em estágios é uma técnica usada para melhorar o desempenho de simuladores em relação ao tempo de execução e à escalabilidade. As simulações de rede em geral são limitadas em tempo de execução e escala devido a cálculos redundantes. O SNS utiliza uma função de armazenamento em cache para salvar os cálculos e evitar a redundância. Esse simulador é baseado no NS-2 e a experiência com a aplicação de simulação em estágios no simulador SNS mostra que o tempo de execução pode ser melhorado na ordem de dezenas de vezes em relação ao NS-2. Além disso, o SNS permite a simulação de redes sem fio com dezenas de milhares de nós. No entanto ele não possui um módulo específico para VANETs.

O *Java in Simulation Time / Scalable Wireless Ad hoc Network Simulator*, JiST/SWANS, é desenvolvido pela Universidade de *Cornell* [74]. O JiST é um mecanismo de simulação de eventos discretos de alto desempenho que é executado sobre uma máquina virtual Java padrão. A plataforma de simulação resultante é eficiente, superando os tempos de execução de simulação altamente otimizados de simuladores amplamente utilizados, como o NS-2. Além disso, o JiST também otimiza o consumo de memória. Já o SWANS é um simulador de rede sem fio escalável, construído sobre a plataforma JiST. Possui recursos semelhantes ao do NS-2 e GloMoSim, mas com uma capacidade de simular redes mais densas. Mesmo com as vantagens que possui em relação a outros simuladores, o JiST/SWANS ainda não supera a popularidade estabelecida pelo NS-2.

O *Georgia Tech Network Simulator*, GTNetS, é desenvolvido pelo Instituto tecnológico de Geórgia [75] nos Estados Unidos. O GTNetS é um ambiente de simulação de rede completo que permite que pesquisadores e entusiastas estudem o comportamento de redes de moderada a grande escala, sob diversos tipos de condições. A filosofia do projeto do GTNetS é criar um ambiente de simulação estruturado da mesma forma que as redes reais. Por exemplo, no GTNetS, há uma separação clara e distinta das camadas da pilha de protocolos. Esse simulador é desenvolvido em C++ e contém alguns dos principais protocolos de redes como o TCP/IP e protocolos da camada de enlace de dados como o IEEE 802.11. O GTNetS não possui modelos para o canal de radiopropagação.

O *OMNeT++* é um simulador de eventos discretos, extensível, modular e orientado a objetos baseado na linguagem C++ [76]. O modelo de funcionamento consiste em módulos hierárquicos, os quais se comunicam uns com os outros através de mensagens. Importante ressaltar que é um *software* de código aberto, para o qual existe um esforço na comunidade de usuários para a melhoria constante e desenvolvimento tanto da interface de simulação, como também das bibliotecas e dos módulos de simulação. A ferramenta possui dois tipos de interface para a execução, sendo uma através de uma interface gráfica e outra através de linha de comando. Para simular uma VANET no OMNeT++, é necessário utilizar o Veins (*Vehicles in Network Simulation*) que é um arcabouço para simulação da rede veicular. o Veins facilita a integração bidirecional entre o OMNeT++ e o SUMO (*Simulation of Urban MObility*, que é responsável pela geração do tráfego de veículos [77]. A necessidade de trabalhar com três ferramentas distintas para a execução de uma simulação em ambiente

veicular pode se tornar limitante devido à exigência de grande poder computacional, dependendo da complexidade do cenário simulado.

Existem, ainda, diversos outros simuladores que não são apresentados nesta seção. Especificamente neste trabalho, utiliza-se o simulador de redes NS-3 devido a sua flexibilidade e versatilidade. Não é possível a integração de um simulador de tráfego para gerir a mobilidade dos nós como no OMNeT++, mas é possível importar um arquivo de mobilidade com o tráfego gerado. O NS-3 é apresentado em detalhes na seção seguinte.

4.2.2 NS-3: Network Simulator 3

O NS-3 é um simulador de redes de eventos discretos, direcionado principalmente para uso educacional e de pesquisa [5]. O NS-3 é um *software* livre, licenciado sob a licença GNU GPLv2. É um projeto iniciado em 2006 e que se mantém atualizado até hoje. Existe um esforço de uma grande comunidade de desenvolvedores para manter o simulador atualizado, sempre implementando novas funcionalidades, aplicações, bibliotecas e módulos de simulação. O NS-3 possui uma interface de execução gráfica (*Graphic User Interface* - GUI) e uma interface de execução por linha de comando (*Command Line Interface* - CLI). A GUI pode ser visualizada de duas maneiras, utilizando o *NetAnim* ou o *PyViz*. Para a execução correta do *NetAnim* é necessário criar um arquivo no formato `.xml` que representa a simulação executada. Esse arquivo é criado automaticamente pelo simulador ao inserir comandos específicos no código do cenário simulado. A interface do *NetAnim* está exemplificada na Figura 4.7(a). Já o *PyViz* é executado diretamente via terminal, sem a necessidade de criar um novo arquivo que contém os passos da simulação. A interface do *PyViz* é mostrada na Figura 4.7(b). Ambas as ferramentas de interface gráfica têm como principal uso a validação do cenário simulado, sendo ferramentas didáticas para visualizar a interação entre os nós e a transferência dos pacotes em cada camada da arquitetura de comunicação, sendo dispensável no desenvolvimento da simulação. A CLI, por sua vez, é essencial para o desenvolvimento da simulação, uma vez que é através dela que o código criado para a simulação é executado de fato.

O NS-3 não é compatível com o NS-2, sendo basicamente um novo simulador. Os dois simuladores são escritos em C++ e algumas funcionalidades do NS-2 são portadas para o NS-3, que, no entanto, não suporta a API (*Application Programming Interface*) do NS-2. O NS-3 se concentra na modelagem dos protocolos da Internet, mas, diferentemente do NS-2, não se limita apenas aos protocolos da Internet, modelando outros tipos de protocolos, como os de redes celulares. O NS-3 é modular, possuindo um conjunto de bibliotecas que podem ser combinadas entre elas e também com bibliotecas de *software* externo. Enquanto algumas plataformas de simulação fornecem aos usuários um ambiente único e integrado de interface gráfica com o usuário, no qual todas as tarefas são executadas, o NS-3 é mais modular nesse sentido. Outros *softwares* de animação externos e ferramentas de análise e visualização de dados podem ser usados em conjunto com o NS-3. No entanto, o

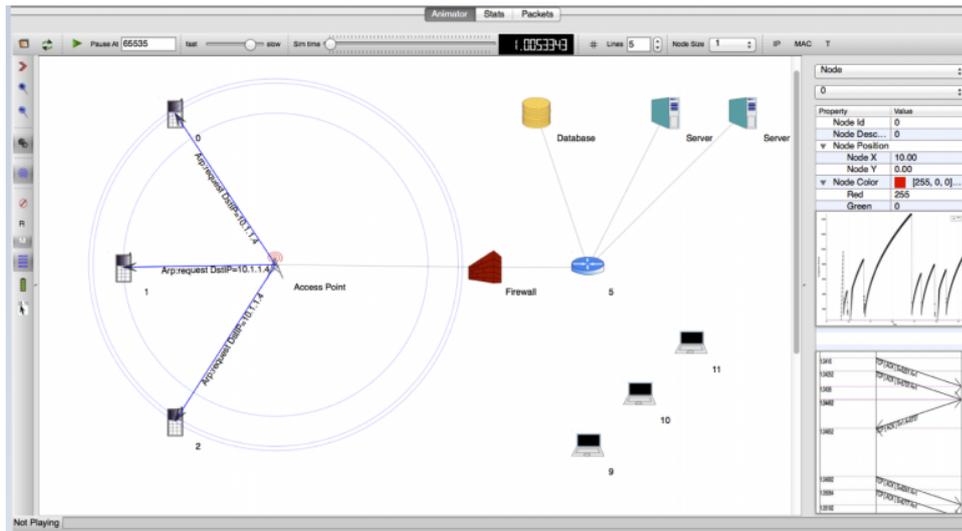
(a) GUI *NetAnim*.(b) GUI *PyViz*.

Figura 4.7: Interfaces gráficas do usuário disponíveis no NS-3 para validação de cenário. Adaptado [5].

desenvolvimento do cenário simulado está restrito à criação de códigos escritos em C++ ou Python, executados através da CLI. Devido às inúmeras dependências de bibliotecas desenvolvidas para Unix, o NS-3 é usado principalmente em sistemas Linux ou MacOS. No entanto existe suporte para *Windows* através de programas capazes de se comportarem como um sistema *Linux*, como o *Windows Subsystem for Linux* ou o *Cygwin*.

O NS-3 é altamente modular e possui diversas funcionalidades e abstrações que facilitam a utilização pelo usuário. No ambiente de simulação, um Nó (**Node**) ou um conjunto de nós (**Node Container**) podem ser entendidos como um computador ou dispositivo de rede. Nos nós devem ser configurados desde a camada física, com a definição de parâmetros importantes como a frequência da portadora, potência de transmissão e limiar de sensibilidade na recepção, até a aplicação, com a definição de parâmetros como tamanho máximo de pacote e a taxa de transmissão. O Canal (**Channel**) é responsável por estabelecer o meio de comunicação entre os nós transmissor e receptor. Existem canais do tipo sem fio ou cabeado. Neste trabalho utiliza-se um canal sem fio descrito por modelos de propagação específicos e que está associada à camada física e de enlace definidas pela arquitetura WAVE.

Os Dispositivos de Rede (**NetDevice**) são responsáveis pela ligação das camadas superiores ao canal de comunicação, através da implementação da camada física no nó. Para realizar a comunicação das aplicações instaladas nos nós de comunicação, é preciso ter associado a esses nós uma pilha de protocolos (**InternetStack**), que implementa os protocolos de camada de rede, IPv4, IPV6, ICMP e os protocolos de roteamento. Por fim, deve-se instalar nos nós as Aplicações (**Application**), que estão no nível do usuário. Existem diversas aplicações cada qual implementada em classes distintas. As aplicações podem ser parametrizadas em relação ao protocolo de camada de transporte utilizado, tamanho de pacote, intervalo entre pacotes, etc.

4.3 Implementação do Cenário Simulado no NS-3

Seguindo a metodologia apresentada na Seção 4.2, o primeiro passo para construir a simulação dos Cenários 1 e 2 avaliados neste trabalho é a modelagem do tráfego, seguida pela modelagem da rede e, por fim, a configuração da simulação.

Modelagem do tráfego

A modelagem é feita de forma automatizada, mas sem uso de ferramentas específicas para a criação de tráfego. Normalmente é necessário definir o posicionamento e a movimentação dos nós, a localização de interseções entre vias, o comprimento dos segmentos de vias, a existência de pessoas, ciclistas e outros veículos que não se comunicam mas constituem obstáculos à comunicação. Para simplificar o cenário, a modelagem de tráfego neste trabalho leva em consideração apenas as características de dimensão da via e a movimentação dos nós que se comunicam. Essa movimentação é criada manualmente, sendo armazenada em um arquivo de mobilidade que reflete a mobilidade existente no experimento real de cada cenário. O arquivo possui um formato específico, conforme mostra a Figura 4.8. O NS-3 permite a importação do arquivo de mobilidade criado, que passa a representar a

movimentação dos nós na simulação.

```
#####
1 $node_(0) set X_ 0.0
2 $node_(0) set Y_ 0.0
3 $node_(0) set Z_ 0.0
4 $node_(0) set X_ 0.0
5 $node_(0) set Y_ 0.0
6 $node_(0) set Z_ 0.0
7 $ns_ at 0.0 '$node_(0) setdest 0.0 0.0 50.4''
8 $ns_ at 1.0 '$node_(0) setdest 1.0 2.0 23.4''
9 $ns_ at 0.0 '$node_(0) setdest 1.0 1.0 20.4''
10 $ns_ at 1.0 '$node_(0) setdest 10.0 10.0 30.4''
#####
```

Figura 4.8: Exemplo de arquivo de mobilidade importado no NS-3.

Existem dois tipos de sintaxe no exemplo de arquivo de configuração mostrado na Figura 4.8. As primeiras 6 linhas mostram a definição da posição inicial de cada nó e as linhas 7 a 10 mostram a definição da movimentação desses nós. Todos os elementos coloridos nessa figura podem ser modificados. Para a posição inicial de cada nó define-se o identificador do nó e as coordenadas x, y e z dessa posição inicial. Na segunda parte do arquivo, a movimentação de cada nó é definida através do tempo em que o movimento ocorre, o identificador do nó, os valores das coordenadas x e y para onde o nó se move, e a velocidade com o que o nó se move, em m/s.

A criação da movimentação dos nós ao longo do tempo é feita através de um *script* Python. Essa movimentação imita o movimento dos nós para cada cenário estudado. Assim, o arquivo é composto pelo movimento de um nó móvel que se aproxima e em seguida se afasta do nó fixo, com velocidade constante igual a 30 km/h. Outro arquivo define a posição inicial do nó fixo e sua ausência de movimentação.

Modelagem de rede

A modelagem da rede é feita através da definição dos protocolos utilizados e dos papéis exercidos por cada nó. Para isso cria-se um código escrito em C++ no qual configura-se os parâmetros da simulação, desde a quantidade de nós na rede até o tipo de aplicação utilizada. A configuração da simulação requer a importação dos módulos imprescindíveis para o correto funcionamento do código, criação dos nós que representam os dispositivos que se comunicam; definição do canal de transmissão indicando os parâmetros importantes como frequência da portadora, potência de transmissão e limiar de sensibilidade na recepção, modelo de propagação e atraso existente no canal; criação dos dispositivos de rede; instalação da pilha de protocolos para atribuição dos endereços IP e utilização de protocolos de roteamento; e configuração e instalação das aplicações executadas nos nós. Na criação das aplicações, define-se qual protocolo de transporte é utilizado, o tamanho do

pacote, o intervalo de tempo entre o envio de pacotes e a quantidade de pacotes enviados. Os protocolos de roteamento proporcionam conectividade em múltiplos saltos, com a seleção de rotas entre dois nós. A interface gráfica é utilizada para validar o cenário, verificando o movimento dos veículos e a transmissão e recepção de pacotes da aplicação.

A simulação realizada neste trabalho é dividida em duas partes. Na primeira, simula-se um cenário V2I com apenas um veículo. Na segunda, o cenário V2I possui 2 veículos. A inserção do segundo veículo tem como objetivo permitir a análise do protocolo de roteamento utilizado. Com essa divisão e a necessidade de simular um cenário de túnel e um cenário de área aberta, são criadas as seguintes combinações para avaliar o desempenho dos protocolos de roteamento sob diferentes condições de propagação:

- Cenário 1, Túnel:
 1. com 1 veículo ao longo dos 1.500 metros que se move com velocidade constante em direção à RSU, se afastando dela após encontrá-la;
 2. com 2 veículos, sendo os dois veículos se movendo no mesmo sentido e com mesma velocidade, com uma distância inicial de 500 metros entre os veículos;
 3. com 2 veículos, sendo os dois veículos em movimento, inicialmente distantes de 500 metros, ambos se movendo no mesmo sentido, mas um com velocidade menor do que o outro;
- Cenário 2, Área aberta:
 1. com 1 veículo ao longo dos 225 metros que se move com velocidade constante em direção à RSU, se afastando dela após passar por ela;
 2. com 2 veículos, sendo um veículo em movimento e um veículo parado no centro do sistema, inicialmente distantes de 62,5 metros;
 3. com 2 veículos, sendo os dois veículos em movimento com a mesma velocidade, mas em sentidos opostos, se cruzando no centro do sistema;

Cada um dos cenários, com suas diversas configurações, é avaliado tanto no sentido da aproximação em relação à RSU quanto no sentido de afastamento. Isso porque em medições experimentais o perfil de atenuação no afastamento difere do perfil de atenuação da aproximação [69]. Assim, espera-se que o desempenho da rede também seja diferente entre os dois sentidos. Os protocolos de roteamento utilizados nas configurações dos cenários são AODV, DSDV, DSR e OLSR. A simulação é executada para cada cenário, com as diversas configurações, alterando o protocolo de roteamento e o modelo de propagação utilizados. São mantidas as configurações padrão dos protocolos de roteamento no NS-3 para redes Ad hoc [78].

Os modelos de propagação utilizados neste trabalho são Espaço Livre, Dois Raios, Log-Distância. Os parâmetros de configuração dos modelos são obtidos a partir de

aproximação a resultados experimentais de campanhas de medição, conforme discute-se no Capítulo 5. A configuração do modelo de Espaço Livre no simulador é modificada para inserir a frequência de operação correta e o valor mínimo, em dB, para a atenuação resultante, usada para distâncias curtas. O modelo Log-Distância não tem a frequência de operação como parâmetro, no entanto, os parâmetros distância de referência, a potência do sinal nessa distância de referência e o coeficiente de atenuação precisam ser configurados. O modelo de Dois Raios implementado no NS-3 usa a fórmula aproximada definida na Equação 3.8, que não possui o parâmetro de amortização referente à diferença de fase entre o raio direto e o raio refletido, afetando diretamente o resultado final do respectivo perfil de atenuação. Essa diferença se perpetua mais visivelmente para pequenas distâncias [13]. O NS-3 explicita que o modelo de Dois Raios conforme definido pela Equação 3.6 não fornece um bom resultado para curtas distâncias devido à oscilação causada pela combinação dos raios direto e refletido no receptor, podendo essa combinação ser construtiva ou destrutiva. Assim, para curtas distâncias se utiliza o modelo de Espaço Livre. O limiar que define qual modelo de fato é utilizado para a perda de percurso no NS-3 é denominado distância de cruzamento, d_{cross} (Equação 4.2), abaixo da qual se utiliza o modelo de Espaço Livre. Na Equação 4.2, λ é calculado como c/f , onde $c = 299.792,458$ m/s é a velocidade da luz no vácuo, e f é a frequência, em Hz, do sinal. Substituindo na Equação 4.2 a altura da antena de recepção utilizada nos experimentos reais, 1,5 metros, e o valor de λ para uma frequência de 5,85GHz, obtém-se um valor para $d_{cross} = 556$ metros.

$$d_{cross} = \frac{4\pi H_t H_r}{\lambda} \quad (4.2)$$

Tabela 4.1: Parâmetros de configuração da simulação do cenário túnel.

Parâmetro	Especificação
Versão do NS-3	3.28
Potência Transmitida	22 dBm
Distância percorrida pelos veículos	1.500 metros
Velocidade média	30 km/h
Tempo de simulação	360 segundos
Tipo de tráfego	UDP
Tamanho do pacote de dados	256 Bytes
Taxa de Transmissão	170,666 Mb/s
Modelos de propagação	Espaço Livre, Dois Raios, 2-Log-Distância
Modulação	OFDM
Protocolos de roteamento	AODV, DSDV, DSR, OLSR
Protocolo de camada de enlace	IEEE 802.11p
Limiar de sensibilidade	-75dBm
Frequência do sinal transmitido	5,850 GHz
Tipo de cenário	Interno

As Tabelas 4.1 e 4.2 resumizam as configurações utilizadas nos cenários de Túnel e Área aberta, respectivamente. Ambos os cenários são baseados na configuração utilizada para as medições experimentais. Vários parâmetros de configuração das simulações são comuns aos dois cenários. É importante ressaltar a substituição do modelo Log-Distância

Tabela 4.2: Parâmetros de configuração da simulação do cenário de área aberta.

Parâmetro	Especificação
Versão do NS-3	3.28
Potência Transmitida	16 dBm
Distância percorrida pelos veículos	225 metros
Velocidade média	30 km/h
Tempo de simulação	30 segundos
Tipo de tráfego	UDP
Tamanho do pacote de dados	256 Bytes
Taxa de Transmissão	170,666 Mb/s
Modelos de propagação	Espaço Livre, Dois Raios, Log-Distância
Modulação	OFDM
Protocolos de roteamento	AODV, DSDV, DSR, OLSR
Protocolo de camada de enlace	IEEE 802.11p
Limiar de sensibilidade	-75dBm
Frequência do sinal transmitido	5,850 GHz
Tipo de cenário	Externo

pelo 2-Log-Distância para o cenário de Túnel, que é evidenciado na Tabela 5.2. Isso é feito porque nesse cenário há dois perfis de atenuação, o que implica em dois valores de coeficientes de atenuação.

Análise dos resultados

No experimento em ambiente real, que consiste em seis campanhas de medições para ambos os sentidos, os dados são coletados através do Analisador de Espectro. Após a coleta os dados salvos são transferidos e pré-processados no *notebook*. Avalia-se então algumas métricas como atraso e relação inter-simbólica. Feito isso, elabora-se um *script* Python para fazer o ajuste do modelo de propagação aos dados obtidos no experimento. Assim, escolhe-se os melhores coeficientes para cada modelo de propagação, em cada sentido e em cada ambiente.

A análise dos resultados da simulação é feita utilizando *scripts* em Python que processam os registros gerados durante a execução da simulação. Cada um dos cenários avaliados possuem seus registros próprios, exportados como arquivos de texto. Os *scripts* recebem os registros gerados como entrada, processam os dados para obter os resultados referentes a cada métrica utilizada. Também são criados *scripts* em Python para a plotagem de gráficos, utilizando a biblioteca *matplotlib* para Python.

Capítulo 5

Resultados e Discussão

O conhecimento relacionado ao comportamento do sinal na faixa de interesse é de suma importância para o planejamento de uma rede de comunicação sem fio. A modelagem do ambiente de propagação facilita o entendimento e a compreensão dos engenheiros responsáveis pelo planejamento do sistema de comunicação. Assim, a caracterização e modelagem da perda de propagação é feita utilizando modelos consagrados na literatura, sendo cada modelo ajustado com seus devidos parâmetros de acordo com os cenários analisados. Existem vários modelos que recorrentemente têm sido empregados na predição da perda de percurso nos ambientes V2I e V2V. Neste trabalho, explora-se os modelos de Espaço Livre, Log-Distância e Dois Raios. Os modelos são ajustados de acordo com os valores experimentais obtidos na campanha de medição. A análise é feita em um cenário de túnel e um cenário de área aberta cada um com configurações distintas, incluindo a quantidade de carros e a direção de movimento desses veículos em relação à RSU. Em cada cenário avalia-se o desempenho de protocolos de roteamento de redes *ad-hoc* já implementados no simulador de redes NS-3, AODV, DSDV, DSR, OLSR. Este capítulo apresenta os resultados referentes à avaliação de desempenho desses protocolos de roteamento. O capítulo também apresenta uma caracterização do ambiente de propagação de acordo com os valores obtidos na campanha de medição.

5.1 Caracterização do Ambiente de Propagação Real e Simulado

A caracterização do ambiente de propagação requer a análise do perfil de atenuação obtido a partir dos valores coletados na campanha de medição. A análise do perfil de atenuação é feita através da comparação entre o cenário V2I real e sua reprodução no ambiente simulado. Em seguida, avalia-se no ambiente simulado a taxa de entrega de pacotes, vazão da rede, atraso fim-a-fim e o tempo de contato entre OBU e RSU, a fim de se obter uma percepção sobre o desempenho que o sistema teria caso fosse implantado no ambiente real

da campanha de medição.

5.1.1 Perfil de atenuação

Os parâmetros dos modelos Log-Distância, Dois Raios e Espaço Livre são ajustados a partir dos valores obtidos nas medições em campo [79]. Esse ajuste é feito individualmente para cada modelo a fim de encontrar os coeficientes de decaimento, γ , adequados, que apresentem a menor raiz do erro quadrático médio (*Root-Mean-Square Error* - RMSE) [48], sendo calculado pela Equação 5.1, em que Pl_i representa a perda no percurso estimado pelo modelo, g_i representa a perda obtida nas medições e N representa a quantidade de amostras de dados. A Tabela 5.1 mostra os coeficientes γ e os respectivos valores RMSE, para o afastamento e aproximação no cenário de Área Aberta. Observa-se que, tanto no afastamento quanto na aproximação, o valor do coeficiente de decaimento para Espaço Livre é $\gamma = 2$. Isso ocorre devido às condições de propagação em visada direta, uma das principais características do modelo de Espaço Livre. Os coeficientes de decaimento mostrados na Tabela 5.1 são usados na configuração dos modelos de propagação na simulação.

$$rmse = \sqrt{\left(\frac{1}{n}\right) \sum_{i=1}^N (Pl_i - g_i)^2} \quad (5.1)$$

Tabela 5.1: RMSE e coeficiente de decaimento para afastamento e aproximação em relação à RSU no cenário de Área Aberta.

Modelo de perda de propagação	Afastamento		Aproximação	
	RMSE	γ	RMSE	γ
Espaço Livre	4,754	2	5,126	2
Dois Raios	5,281	2,15	5,432	2,161
Log-Distância	4,742	2,197	5,032	2,208

A Figura 5.1 mostra uma comparação entre as medições reais e os resultados obtidos, através dos registros da simulação, para o perfil de atenuação utilizando os modelos de Espaço Livre, Dois Raios e Log-Distância conforme implementados no NS-3, no cenário de Área Aberta. Considera-se que a RSU está localizada em $x = 0$, de forma que o veículo se aproxima da RSU à medida em que x se torna menos negativo, e se afasta da RSU à medida em que x se torna mais positivo. Na maior parte do percurso o comportamento do modelo Log-Distância acompanha com menor erro o comportamento dos dados experimentais.

Os coeficientes de decaimento, γ , para o cenário de Túnel são calculados de forma análoga ao cenário de Área Aberta. Os valores obtidos para os coeficientes de decaimento e os respectivos RMSE são mostrados na Tabela 5.2. Os valores obtidos são usados na

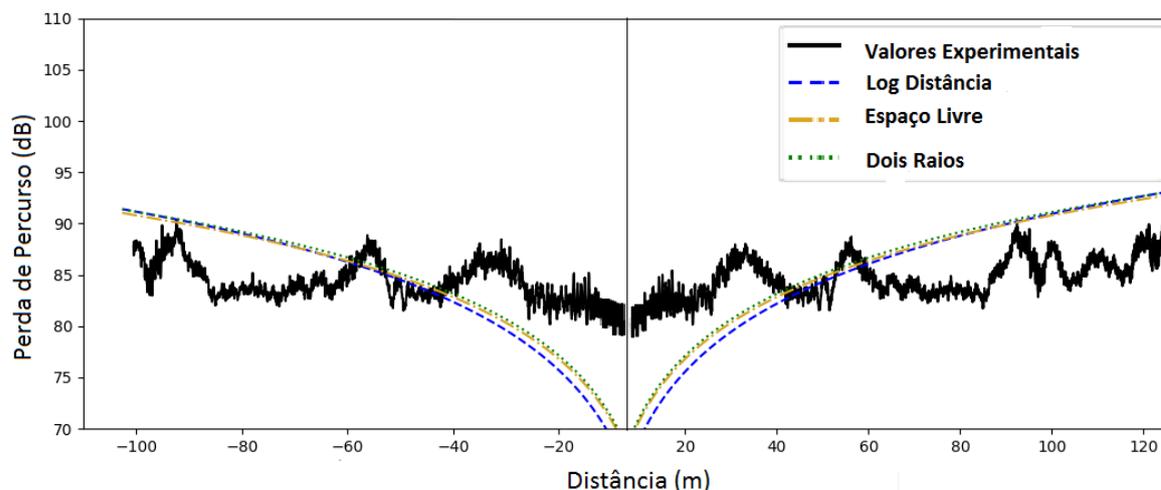


Figura 5.1: Comparação do perfil de atenuação obtido nos experimentos reais e na simulação realizada no NS-3 para o cenário de Área Aberta, tanto para afastamento quanto para aproximação em relação à RSU. O modelo que apresenta menor erro em relação aos valores medidos é o Log-Distância.

configuração dos modelos de propagação na simulação. Observa-se que, tanto para a aproximação quanto para o afastamento, o valor do coeficiente de decaimento para Espaço Livre é $\gamma = 2$. Isso ocorre devido às condições de propagação em visada direta, uma das principais características do modelo de Espaço Livre.

Tabela 5.2: RMSE e coeficiente de decaimento para afastamento e aproximação em relação à RSU no cenário de Túnel.

Modelo de perda de percurso		Afastamento		Aproximação	
		RMSE	γ	RMSE	γ
Espaço Livre		12,320	2	13,125	2
Dois Raios		12,197	1,708	13,077	1,669
Log-Distância	Primeiro limiar	7,695	1,480	10,103	1,504
	Segundo limiar	6,763	3,659	9,702	2,505

A Figura 5.2 mostra uma comparação entre as medições reais e os resultados obtidos para o perfil de atenuação utilizando os modelos de Espaço Livre, Dois Raios e Log-Distância conforme implementados no NS-3 para o afastamento e aproximação, no cenário de Túnel. Novamente, considera-se que a RSU está localizada em $x = 0$, de forma que o veículo se aproxima da RSU à medida em que x se torna menos negativo, e se afasta da RSU à medida em que x se torna mais positivo. O comportamento do modelo Log-Distância é o que apresenta menor erro em relação aos dados experimentais. Comparando-se as Figuras 5.1 e 5.2, observa-se que a atenuação ao longo do caminho percorrido pelo veículo no Túnel é muito maior do que na Área Aberta, pois percorre uma distância consideravelmente maior que a da Área Aberta e há influência de outros mecanismos de propagação, como

multipercursos, que podem contribuir para o aumento da atenuação.

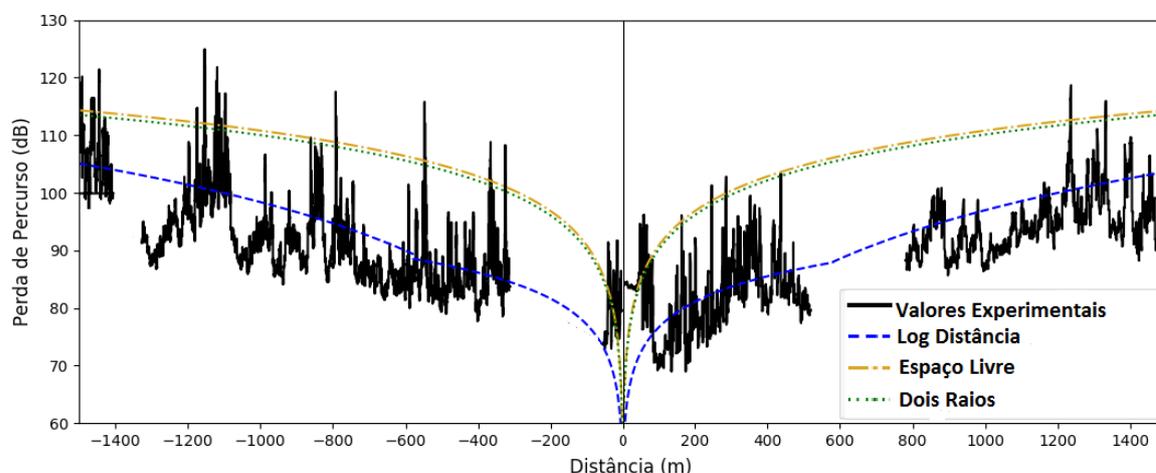


Figura 5.2: Comparação do perfil de atenuação obtido nos experimentos reais e na simulação realizada no NS-3, para o cenário de Túnel, considerando a aproximação e o afastamento em relação à RSU. O modelo que apresenta menor erro em relação aos valores medidos é o Log-Distância.

5.1.2 Vazão e taxa de entrega de pacotes

A vazão e a taxa de entrega de pacotes (*Packet Delivery Ratio* - PDR) são influenciadas pela atenuação sofrida pelo sinal nos dois sentidos de movimento do veículo. As Figuras 5.3(a) e 5.3(b) mostram a vazão obtida para o cenário de Área Aberta e para o cenário de Túnel, considerando o percurso completo, composto pela aproximação e pelo afastamento em relação à RSU. Observa-se na Figura 5.3(a) que a maior vazão é obtida quando o ambiente é descrito pelo modelo de Espaço Livre. Isso ocorre porque esse modelo é o que apresenta a menor atenuação ao longo do percurso nesse cenário. No entanto, a diferença entre os valores obtidos para cada modelo é muito pequena. Para o cenário Túnel, observa-se na Figura 5.3(b) que a maior vazão é obtida para o modelo Log-Distância. Isso ocorre porque esse modelo é o que apresenta a menor atenuação para esse cenário.

A Figura 5.4 mostra a PDR para o cenário de Área Aberta, comparando todos os modelos de propagação utilizados. A PDR mostrada nas figuras é calculada neste trabalho de maneira cumulativa e não pontual, ou seja, utiliza-se um valor de distância x como referência, computa-se quantos pacotes foram enviados e recebidos até aquela distância, e então o cálculo da PDR é feito como o número de pacotes recebidos dividido pelo número de pacotes enviados desde o início da simulação até o momento em que o veículo alcança x . Dessa forma, o veículo é analisado como um acumulador de pacotes, com isso evidenciando a diferença no comportamento da PDR entre ambos os sentidos. Na maior parte do percurso, a PDR é idêntica para todos os modelos de propagação. A partir de uma distância de aproximadamente 100 m da RSU, na região de afastamento o modelo de

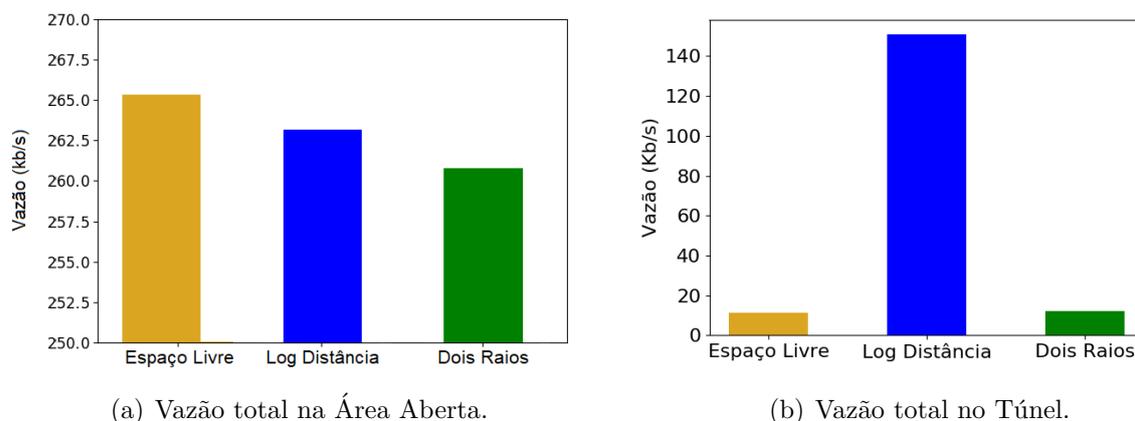


Figura 5.3: Comparação entre as vazões obtidas para o cenário de Túnel e de Área Aberta, considerando que o ambiente é descrito por cada modelo de propagação. (a) Na Área Aberta, a vazão alcançada é muito semelhante para todos os modelos. (b) No Túnel, a vazão alcançada é significativamente maior para o modelo Log-Distância. A atenuação tem forte influência na vazão obtida em todos os cenários.

Espaço Livre apresenta PDR ligeiramente maior. Isso ocorre porque a atenuação desse modelo é ligeiramente menor na maior parte do percurso. Assim, a vazão total observada na Figura 5.3(a) para o modelo de Espaço Livre é ligeiramente maior que a dos outros modelos. Ainda, observa-se na Figura 5.4(a) que, à medida em que o veículo se aproxima da RSU, a PDR cresce, sem nunca chegar a 100% para o cenário avaliado devido às interferências existentes e inerentes à comunicação sem fio. Na Figura 5.4(b), observa-se que no movimento de afastamento a PDR se inicia em 100%, uma vez que o veículo está muito próximo da RSU e a potência do sinal é muito alta. O comportamento da PDR muda completamente, apresentando um decaimento acentuado, a partir de aproximadamente 100 m da RSU, mais precisamente após a distância em que se alcança o limiar de recepção do dispositivo (-75 dBm). Vale ressaltar que são utilizadas sementes (*seeds*) distintas para cada rodada da simulação. No entanto, como o atraso de propagação é constante, e a variação em cada cenário é baixa, não há necessidade de estabelecer um intervalo de confiança.

A PDR para o cenário de Túnel é mostrada na Figura 5.5. Observa-se na Figura 5.5(a) que à medida em que o veículo se aproxima da RSU, a PDR cresce, sem nunca chegar a 100%, devido às interferências existentes e inerentes à comunicação sem fio. A Figura 5.5(b) mostra que ao se afastar da RSU a PDR se inicia em 100%, mas rapidamente inicia um decaimento acentuado para os modelos de Espaço Livre, em 100 m, e Dois Raios, em 110 m. Esse decaimento também ocorre para o modelo Log-Distância, a partir de aproximadamente 696 m. Isso ocorre porque o perfil de atenuação obtido para o modelo Log-Distância apresenta atenuação menos intensa do que os outros dois modelos. Dessa forma, o limiar de sensibilidade do dispositivo receptor é alcançado a uma distância muito maior para

o modelo Log-Distância. É importante destacar que, em ambas as Figuras 5.4 e 5.5, a modificação abrupta na curva da PDR a partir de uma determinada distância indica que o veículo passou a perder uma grande quantidade de pacotes a partir daquele ponto.

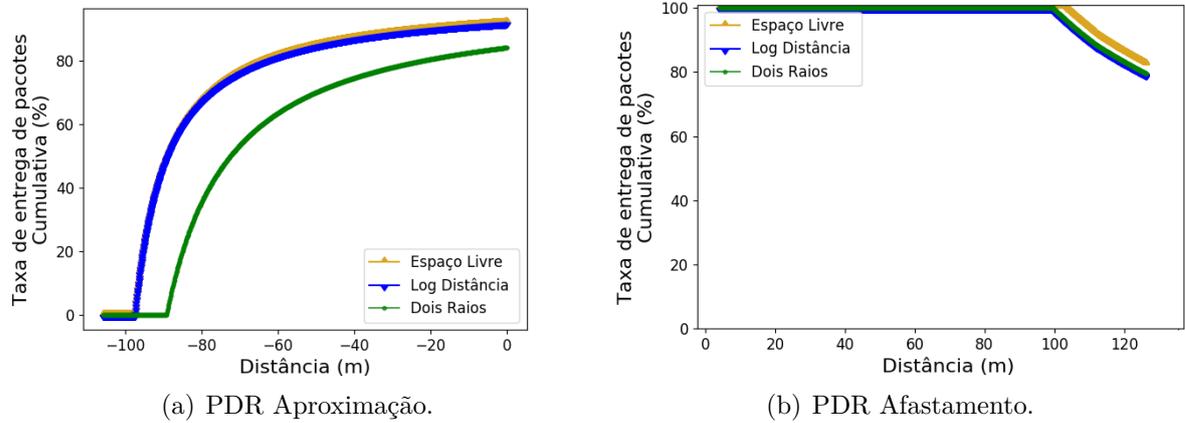


Figura 5.4: Comparação entre os valores de taxa de entrega de pacotes em relação à distância usando cada modelo de propagação para descrever o cenário de Área Aberta. O comportamento é semelhante para todos os modelos, exceto após ultrapassar uma determinada distância de afastamento, quando a taxa de entrega no ambiente modelado por Espaço Livre torna-se ligeiramente maior.

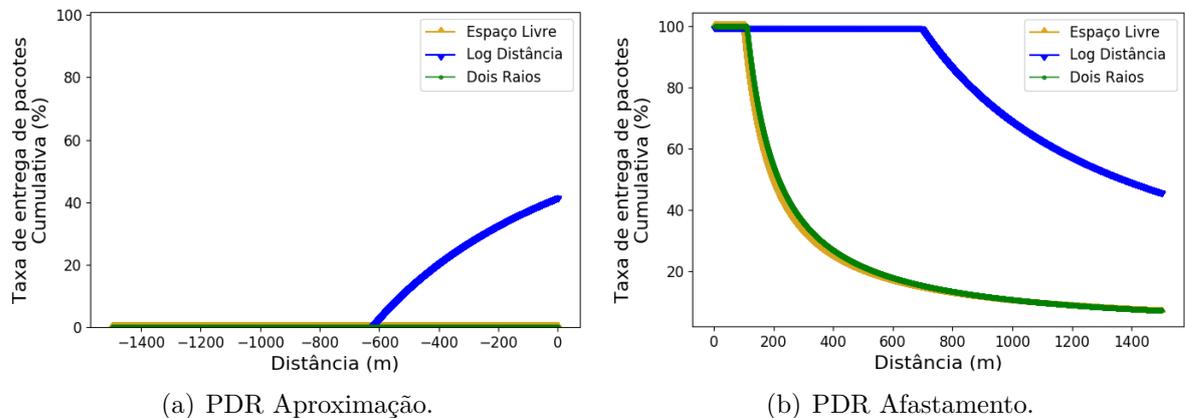


Figura 5.5: Comparação entre os valores de taxa de entrega de pacotes em relação à distância usando cada modelo de propagação para descrever o cenário de Túnel. O comportamento é diferente para todos os modelos, sendo que a taxa de entrega é sempre maior para o modelo Log-Distância.

5.1.3 Atraso e tempo de contato

O atraso médio obtido para todos os modelos analisados é semelhante, pois na configuração da simulação utiliza-se um atraso de propagação constante, que está na ordem de grandeza de nanossegundos, e não há aleatoriedade envolvida na execução da simulação. O atraso

médio é calculado como a média das diferenças entre o tempo de envio do pacote de dados pela RSU e da recepção pelo veículo. No cenário de Área Aberta, o atraso médio obtido na aproximação é de 0,2406 ms para o modelo de Espaço Livre, 0,2408 ms para o Log-Distância, e 0,2409 ms para o modelo de Dois Raios. Já para o afastamento, os atrasos médios são muito próximos, em torno de 0,269 ms para os modelos de Espaço Livre e Log Distância e 0,290 ms para o modelo de Dois Raios, conforme mostrado na Tabela 5.3. Em relação ao cenário de Túnel, obtém-se para a aproximação um atraso médio de 0,239 ms para o modelo Log-Distância e ∞ ms para o Espaço Livre e Dois Raios, já que não há entrega de pacotes no movimento de aproximação quando esses dois modelos são utilizados. Já para o afastamento, os atrasos médios são semelhantes para todos os modelos, sendo aproximadamente iguais a 0,237 ms, conforme mostrado na Tabela 5.4.

Tabela 5.3: Comparação do atraso médio para cada modelo de propagação no afastamento e na aproximação no cenário de Área Aberta.

Modelos de Propagação	Aproximação(ms)	Afastamento(ms)
Espaço Livre	0,2406	0,269
Log-Distância	0,2408	0,269
Dois Raios	0,2409	0,290

Tabela 5.4: Comparação do atraso médio para cada modelo de propagação no afastamento e na aproximação no cenário de Túnel.

Modelos de Propagação	Aproximação(ms)	Afastamento(ms)
Espaço Livre	∞	0,240
Log-Distância	0,239	0,237
Dois Raios	∞	0,240

O tempo de contato médio é calculado como a média das diferenças entre o primeiro pacote enviado e a última resposta recebida sem que haja perda de pacote, entre veículo e RSU. Na área aberta, há pequena variação entre os modelos de propagação e entre o afastamento e a aproximação. Na aproximação, o tempo de contato é igual a 5,844 s para os modelos de Espaço Livre e Log Distância, e 5,346-s para o Dois Raios, enquanto que no afastamento os tempos de contato são iguais a 5,703 s, 5,943 s e 5,7215 s para os modelos de Dois Raios, Espaço Livre e Log-Distância, respectivamente, conforme mostrado na Tabela 5.5. Já para o cenário de Túnel, obtém-se na aproximação um tempo de contato médio de 37,741 s para o modelo Log-Distância e 0 ms para o Espaço Livre e Dois Raios, enquanto que no afastamento os tempos de contato são iguais a 6,444 s, 5,940 s e 41,562 s para os modelos de Dois Raios, Espaço Livre e Log-Distância, respectivamente, conforme mostrado na Tabela 5.6. As análises dos tempos de contato médios mostram que é mais interessante para a aplicação o envio de dados durante o afastamento, uma vez que os atrasos são menores e o tempo de contato é ligeiramente maior tanto no cenário de Área Aberta como no cenário de Túnel.

Tabela 5.5: Comparação do tempo de contato médio para cada modelo de propagação no afastamento e na aproximação no cenário de Área Aberta.

Modelos de Propagação	Aproximação(s)	Afastamento(s)
Espaço Livre	5,844	5,943
Log-Distância	5,844	5,7215
Dois Raios	5,346	5,703

Tabela 5.6: Comparação do tempo de contato médio para cada modelo de propagação no afastamento e na aproximação no cenário do Túnel.

Modelos de Propagação	Aproximação(s)	Afastamento(s)
Espaço Livre	0	5,940
Log-Distância	37,741	41,562
Dois Raios	0	6,444

5.2 Desempenho dos Protocolos de Roteamento de Redes *Ad-Hoc* Móveis

A compreensão do comportamento da rede, em especial dos protocolos de roteamento, é essencial para o planejamento da rede veicular. A avaliação de desempenho dos protocolos de roteamento requer a inserção de mais um nó nos cenários estudados na seção anterior. Com isso, quatro configurações são usadas para investigar o desempenho dos protocolos de roteamento em diferentes ambientes de propagação, conforme descrito na Seção 4.3: (i) 2 veículos se movendo na mesma direção com a mesma velocidade; (ii) 2 veículos se movendo na mesma direção com velocidades distintas; (iii) 2 veículos se movendo em direções opostas com a mesma velocidade; (iv) 2 veículos, sendo um em movimento com velocidade constante e outro parado no centro do cenário. As configurações (i) e (ii) são aplicadas ao cenário de Túnel, enquanto as demais são aplicadas ao de Área Aberta. O desempenho obtido para os protocolos e a atuação deles é avaliado em termos de taxa de entrega de pacotes, vazão da rede, atraso fim-a-fim e o tempo de contato entre dois nós.

5.2.1 Vazão e taxa de entrega de pacotes

A fim de facilitar a compreensão, os resultados de vazão e taxa de entrega de pacotes estão agrupados de acordo com a configuração do cenário utilizada.

Túnel, configuração (i)

A vazão obtida para o cenário de Túnel em que os nós estão se movendo com a mesma velocidade pode ser observada na Figura 5.6, para cada um dos modelos de propagação e protocolos de roteamento simulados. Observa-se que a maior vazão é obtida para o protocolo DSDV, seja a propagação no cenário descrita pelo modelo de Espaço Livre,

Log-Distância ou Dois Raios. No entanto, a diferença entre os protocolos AODV, DSDV e DSR é pequena em todos os casos. Observa-se também que a vazão total para os cenários de Espaço Livre e de Dois Raios são muito menores do que para o cenário de Log-Distância. Isso ocorre porque a quantidade de pacotes recebidos nos cenários modelados por Espaço Livre e Dois Raios é muito pequena devido à elevada atenuação experimentada pelo sinal propagante. O OLSR obtém os piores resultados em todos os casos. Isso ocorre porque, nesse cenário, o protocolo OLSR apresenta um comportamento diferente dos outros protocolos, para Espaço Livre e Dois Raios. O OLSR não consegue encontrar uma rota pois devido ao tempo de convergência das tabelas de roteamento desse protocolo ser mais elevado, quando o veículo passa a alcançar a RSU a 1 salto, não há tempo suficiente para que as tabelas de roteamento convirjam antes do fim da simulação.

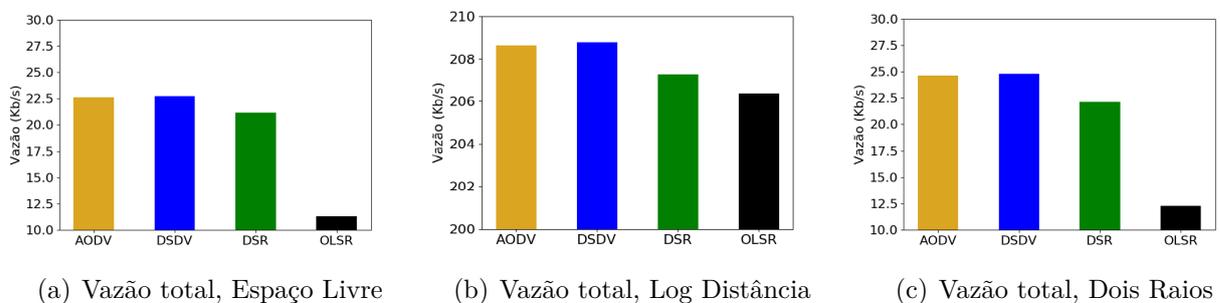


Figura 5.6: Diferença entre as vazões para cada modelo de propagação no cenário de Túnel com os veículos se movendo com a mesma velocidade e no mesmo sentido. A maior vazão é alcançada pelo protocolo DSDV, independentemente do modelo de propagação que descreve o cenário.

A Figura 5.7, mostra os resultados obtidos para a PDR para a aproximação e o afastamento, quando a perda de propagação no cenário é descrita por cada um dos modelos de propagação estudados. Novamente, o cálculo da PDR é feito de forma cumulativa, levando em consideração todos os pacotes recebidos e enviados até o momento em que o veículo alcança o ponto x . O perfil de atenuação de cada modelo para afastamento e aproximação são distintos, e isso influencia diretamente no comportamento da PDR. Para todos os protocolos essa taxa não chega a alcançar 100% de pacotes entregues na aproximação, como mostram as Figuras 5.7(a), 5.7(b) e 5.7(c). No cenário em que se utiliza o OLSR, a PDR começa a crescer a partir de uma distância menos negativa, indicando maior proximidade com a RSU e, por consequência, que os veículos demoram mais para conseguir estabelecer a primeira troca de pacotes.

Ao se afastar da RSU, o comportamento da PDR muda completamente, apresentando dois decaimentos. Nesse cenário, para ambos os sentidos, o comportamento da PDR é semelhante e com pouca variação entre os protocolos e uma ligeira vantagem para o DSDV. Inicialmente o veículo alcança a RSU a 1 salto. No entanto, a partir de uma determinada

distância a comunicação passa a ocorrer em 2 saltos. O primeiro decaimento existe em decorrência da mudança de 1 para 2 saltos e do conseqüente recálculo de rotas, que provoca perda de pacotes. Observa-se um ligeiro crescimento na PDR após essa mudança, indicando o reestabelecimento da rota. A partir de um determinado ponto a comunicação não existe mais, mesmo a 2 saltos, de forma que a PDR apresenta um segundo decaimento, mais acentuado.

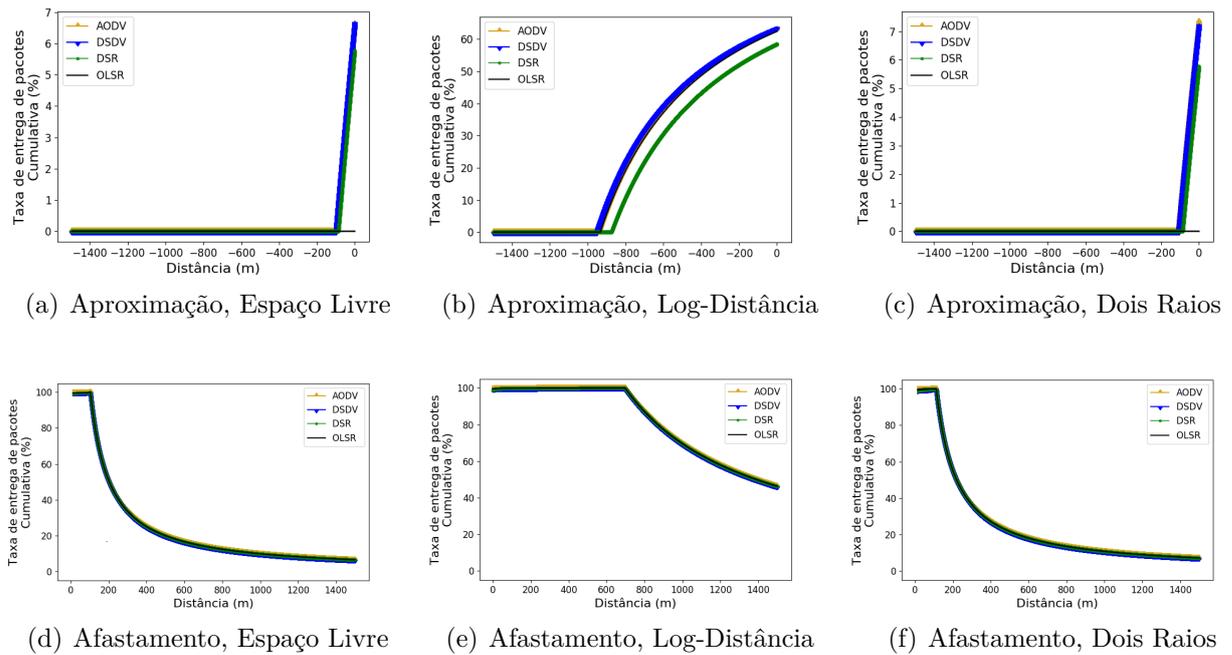


Figura 5.7: Comparação entre os valores de taxa de entrega de pacotes alcançados pelos diferentes protocolos de roteamento, sob influência de cada modelo de propagação no cenário de Túnel com os veículos se movendo na mesma direção e com a mesma velocidade.

Túnel, configuração (ii)

A Figura 5.8 mostra os resultados para a vazão total obtida quando os dois veículos se movem no mesmo sentido com um dos nós tendo uma velocidade menor. Esses veículos acabam se encontrando em aproximadamente 300 metros da RSU. Considerando um ambiente de propagação descrito pelo modelo de Espaço Livre, a Figura 5.8(a) mostra que a maior vazão é ligeiramente alcançada pelo protocolo DSDV, seguido pelo AODV. A diferença entre as vazões se dá pelo tempo de convergência das tabelas de roteamento ser diferente para cada protocolo. Dessa forma, enquanto a rota é recalculada há perda de pacotes, prejudicando a vazão total obtida. Importante ressaltar que o tempo de convergência é influenciado tanto pelas mensagens de controle existentes em cada protocolo como pelo *hello*, e pelo modelo de propagação utilizado para modelar o cenário.

É possível observar que com o aumento da velocidade relativa, há uma diferença maior entre os valores da vazão de cada protocolo e utilizando o modelo de Log Distância, o

protocolo DSDV possui maior valor, enquanto nos restantes o AODV se mantém com o maior valor.

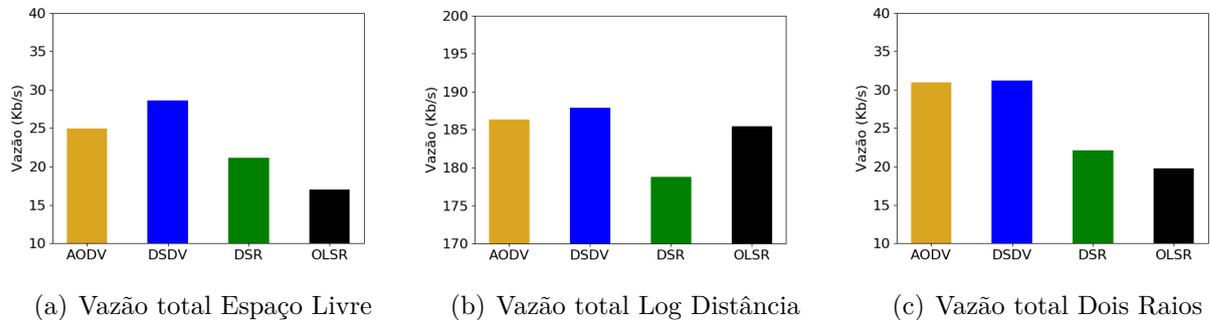


Figura 5.8: Diferença entre as vazões para cada modelo de propagação com uma velocidade menor

As taxas de entrega de pacotes para os diferentes modelos de propagação, tanto para afastamento quanto para aproximação, podem ser observadas na Figura 5.9. À medida em que o veículo se aproxima da RSU, a taxa de entrega de pacotes cresce, sem nunca chegar a 100% na aproximação para todos os protocolos. Para a configuração analisada, a taxa de entrega de pacotes em um ambiente modelado por Espaço Livre é pior quando se utiliza o protocolo OLSR e melhor quando se utiliza o protocolo DSDV, conforme mostra a Figura 5.9(a). Já em um ambiente modelado por Log-Distância obtém-se desempenho muito semelhante em relação à PDR quando se utiliza qualquer um dos protocolos AODV, DSDV e OLSR, conforme observa-se na Figura 5.9(b). Por fim, quando o ambiente é modelado por Dois Raios, os protocolos DSDV e AODV apresentam taxas de entrega muito semelhantes, conforme Figura 5.9(c). Nesse cenário, o protocolo OLSR apresenta um comportamento diferente dos outros protocolos, para Espaço Livre e Dois Raios. O OLSR consegue encontrar uma rota com 2 saltos, a aproximadamente 160 metros da RSU, porém devido ao tempo de convergência das tabelas de roteamento desse protocolo ser mais elevado, quando o veículo passa a alcançar a RSU a 1 salto, não há tempo suficiente para que as tabelas de roteamento convirjam antes do fim da simulação. É importante ressaltar que para o modelo Log-Distância, o DSR possui um tempo de convergência maior por isso obtém o pior desempenho. Já no afastamento, a PDR inicia próxima a 100%, uma vez que os veículos estão muito próximos à RSU e não há interferência significativa para provocar perda de pacotes. Quando o veículo transmissor alcança uma determinada distância, observa-se um decaimento acentuado, que ocorre de forma semelhante para todos os protocolos. Esse decaimento ocorre quando não há mais rota até o destino devido à forte atenuação sofrida pelo sinal.

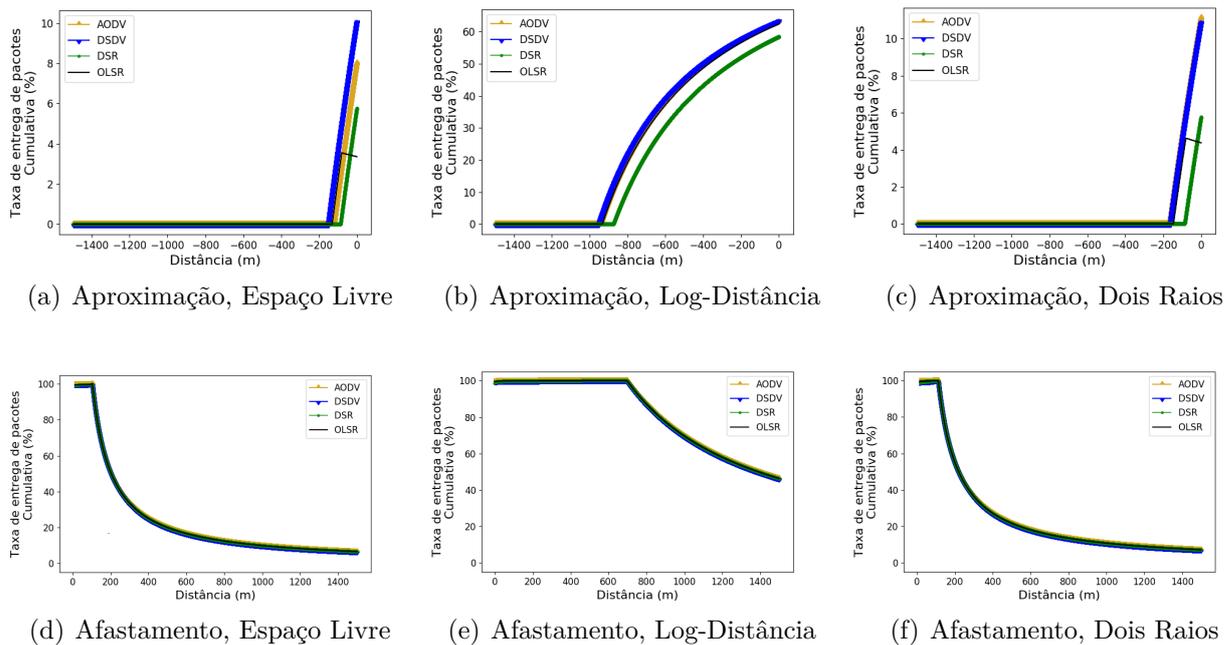


Figura 5.9: Comparação entre os valores de taxa de entrega de pacotes alcançados pelos diferentes protocolos de roteamento, sob influência de cada modelo de propagação no cenário de Túnel com veículos se movendo na mesma direção, sendo um deles com velocidade menor.

Área Aberta, configuração (iii)

A Figura 5.10 mostra os resultados da vazão total obtida quando os dois veículos sem movem com a mesma velocidade em sentidos opostos. Esses veículos acabam se cruzando no centro do cenário. Considerando um ambiente de propagação descrito pelo modelo de Espaço Livre, a Figura 5.10(a) mostra que a maior vazão é alcançada pelo protocolo AODV, seguido pelo DSDV. Os protocolos DSR e OLSR apresentam desempenho próximos nesse caso. Para ambiente modelado por Log-Distância (Figura 5.10(b)) e Dois Raios (Figura 5.10(c)), as vazões obtidas para os protocolos AODV, DSDV e DSR são semelhantes dentro de cada ambiente, sendo um pouco mais baixas para Dois Raios quando comparadas com os valores obtidos para Log-Distância.

A diferença entre as vazões, principalmente, quando se trata dos protocolos de estado de enlace, se dá pelos tempos de convergência distintos de cada protocolo. É possível observar que com o aumento da velocidade relativa, há uma diferença maior entre os valores de vazão de cada protocolo e utilizando o modelo de Log Distância, o protocolo DSDV possui maior valor, enquanto nos restantes o AODV se mantém com o maior valor.

A taxa de entrega de pacotes para os diferentes modelos de propagação podem ser observadas na Figura 5.11, tanto para aproximação quanto para afastamento. À medida em que o veículo se aproxima da RSU, a taxa de entrega de pacotes cresce, sem nunca

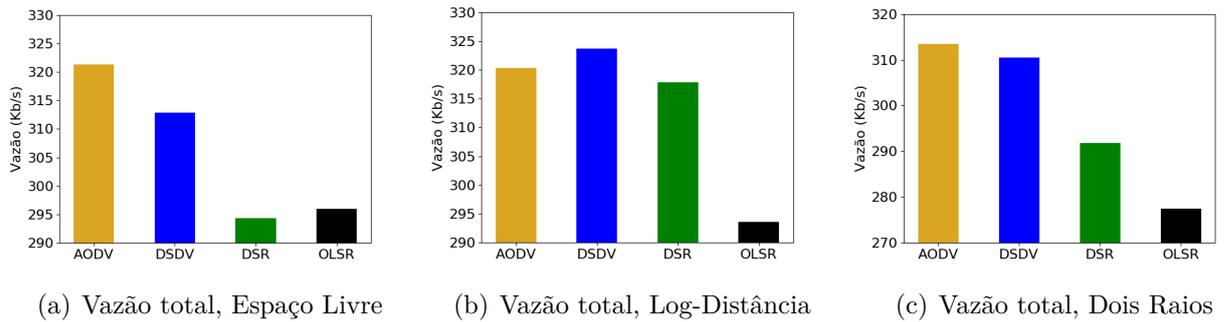


Figura 5.10: Diferença entre as vazões para cada modelo de propagação com os nós se cruzando no centro do sistema

chegar a 100% para todos os protocolos, com a exceção do DSDV quando o ambiente é modelado por Log-Distância. A taxa de entrega de pacotes em um ambiente modelado por Espaço Livre é pior quando se utiliza o protocolo DSR e melhor quando se utiliza o protocolo AODV, conforme mostra a Figura 5.11(a). É possível observar que o DSR tanto para o Espaço Livre, como para Dois Raios, na aproximação, possui o pior desempenho pois há um aumento no tempo de convergência devido a maior dinamicidade dos nós.

Já ambientes modelados por Log-Distância obtêm melhor desempenho em relação à taxa de entrega de pacotes quando se utiliza o protocolo DSDV, conforme observa-se na Figura 5.11(b). Por fim, para ambientes modelados por Dois Raios, os protocolos DSDV e AODV apresentam taxas de entrega muito semelhantes na aproximação, sendo o DSDV ligeiramente melhor na aproximação, conforme a Figura 5.11(c). Vale ressaltar que nesse cenário o protocolo DSDV alcança uma PDR de 100%, para o Log-Distância na aproximação, devido ao menor tempo de convergência das tabelas de roteamento quando comparado aos outros protocolos. Ainda, tratando-se dos protocolos de estado de enlace, o DSR possui uma convergência mais rápida do que o OLSR, resultando em melhor desempenho em relação à PDR. Mesmo comparado ao AODV, que é um protocolo de vetor de distância, o DSR converge mais rapidamente nesse cenário.

Já no afastamento, observa-se que o comportamento da PDR muda completamente, apresentando um decaimento em duas etapas. Há uma pequena perda de pacotes devido à mudança de rota, de um salto para dois saltos. Logo após a descoberta de uma nova rota, há a retomada do crescimento da curva, até que não ocorre mais comunicação nem mesmo a dois saltos e a curva decai bruscamente. Apesar de apresentar melhor desempenho na aproximação para o modelo de Dois Raios, o protocolo DSDV apresenta desempenho pior que o AODV e o DSR, como mostra a Figura 5.11(f).

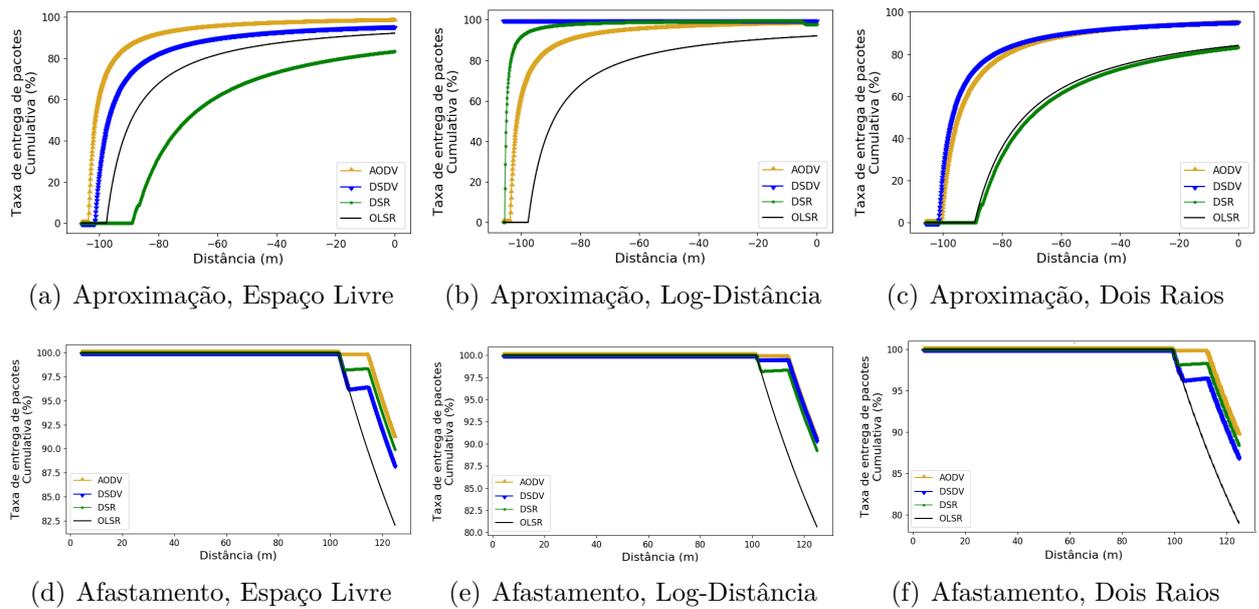


Figura 5.11: Comparação entre os valores de taxa de entrega de pacotes alcançados pelos diferentes protocolos de roteamento, sob influência de cada modelo de propagação no cenário de Área Aberta, com os nós se movendo em direções opostas, com mesma velocidade, se cruzando no centro do sistema.

Área aberta, configuração (iv)

A vazão obtida para o cenário de Área Aberta em que um dos nós está parado no centro do cenário pode ser observada na Figura 5.12, para cada um dos modelos de propagação e protocolos de roteamento simulados. A vazão total considera tanto o trecho de aproximação quanto o de afastamento em relação à RSU. A Figura 5.12 mostra que a maior vazão é obtida para o protocolo AODV, seja a propagação no cenário descrita pelo modelo de Espaço Livre, Log-Distância ou Dois Raios. No entanto, a diferença entre os protocolos AODV, DSDV e DSR é pequena em todos os casos. É possível observar que o OLSR possui uma vazão menor pois apresenta um tempo de convergência mais elevado que os outros e com isso ele demora mais a encontrar uma rota para se estabelecer a comunicação.

A Figura 5.13, mostra os resultados obtidos para a PDR quando a perda de propagação no cenário é descrita pelos modelos de Espaço Livre, Log-Distância e Dois Raios. O perfil de atenuação de cada modelo nesse cenário para afastamento e na aproximação são distintos, e isso influencia diretamente no comportamento da PDR. Observa-se na Figura 5.13, que à medida em que o veículo se aproxima da RSU, a taxa de entrega de pacotes cresce em todos os casos. Para os protocolos AODV, DSDV e DSR essa taxa chega a alcançar 100% de pacotes entregues. Ao se afastar da RSU, o comportamento da PDR muda completamente, apresentando um decaimento acentuado em duas etapas, devido a perda de pacotes provocada pelo recálculo das rotas quando a RSU deixa de ser alcançada a 1 salto. É possível observar que há uma pequena diferença entre os valores da PDRs entre o

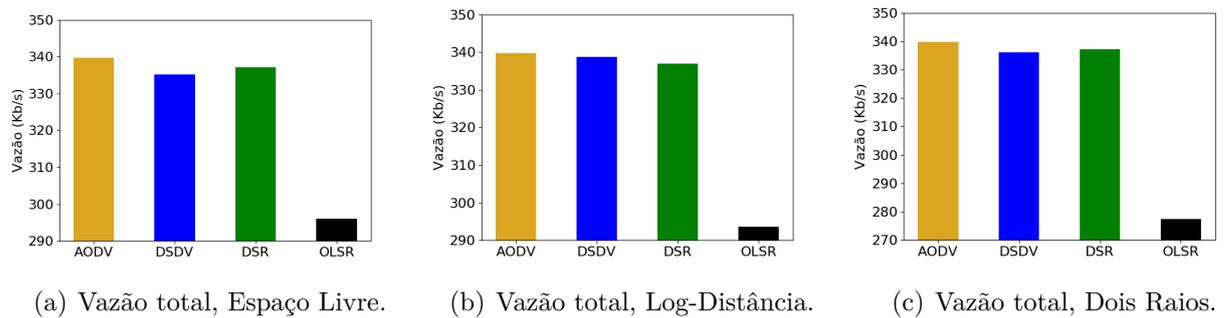


Figura 5.12: Comparação entre os valores de vazão alcançados pelos diferentes protocolos de roteamento, sob influência de cada modelo de propagação no cenário de Área Aberta com 2 nós, sendo um deles parado no centro do cenário.

AODV, DSDV e DSR, que se reflete na vazão de cada protocolo, e utilizando quaisquer dos três modelos estudados, o protocolo AODV possui maior valor. Vale ressaltar que nesse cenário os protocolos DSDV e AODV possuem PDR de 100% devido ao menor tempo de convergência comparado ao protocolo OLSR. Ainda em relação ao OLSR, há uma similaridade no comportamento das PDRs comparando com a configuração (iii).

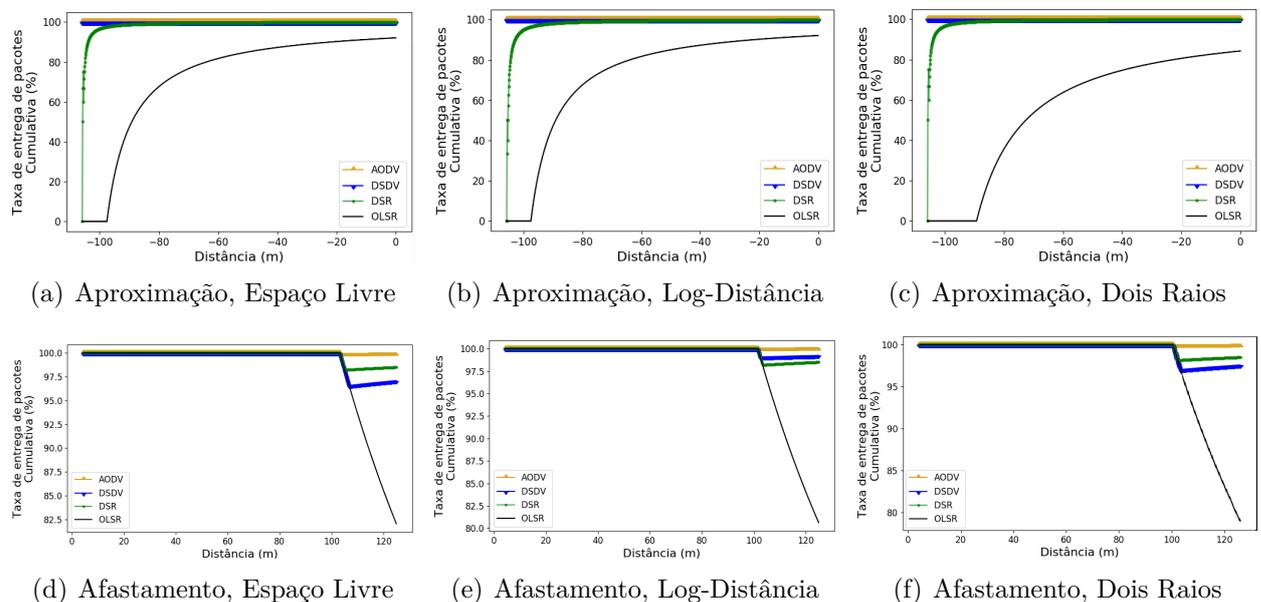


Figura 5.13: Comparação entre os valores de taxa de entrega de pacotes alcançados pelos diferentes protocolos de roteamento, sob influência de cada modelo de propagação no cenário de Área Aberta com dois veículos, sendo um deles parado no centro do cenário.

5.2.2 Atrasos e tempo de contato

A fim de facilitar a compreensão, os resultados de atraso e tempo de contato médios estão agrupados de acordo com a configuração do cenário utilizada.

Túnel, configuração (i)

Na configuração (i), os veículos se movem na mesma direção e com a mesma velocidade, de forma que nunca se cruzam e estão sempre a uma mesma distância um do outro. É importante destacar que a configuração da simulação utiliza um atraso de propagação constante, da ordem de grandeza de nanossegundos, não constituindo a parcela dominante do valor total de atraso. O atraso médio é calculado como a média das diferenças entre o tempo de envio do pacote pelo veículo e da recepção pela RSU. As Figuras 5.14(a) e 5.14(d) evidenciam o perfil de atraso na aproximação e no afastamento, respectivamente, quando a propagação no ambiente é descrita pelo modelo de Espaço Livre. Na aproximação, o atraso médio para cada protocolo é de 0,315 ms, 0,309 ms e 0,378 ms para os protocolos AODV, DSDV e DSR. O atraso médio para o OLSR é infinito, uma vez que não há entrega de pacotes nesse cenário, para a aproximação. Já para o afastamento, os atrasos médios são iguais a 0,355 ms, 0,356 ms, 0,378 ms e 0,357 ms para os protocolos AODV, DSDV, DSR, OLSR respectivamente. O resultado para o modelo de Dois Raios é semelhante ao obtido para o modelo de Espaço Livre, tanto na aproximação quanto no afastamento, conforme observa-se nas Figuras 5.14(c) e 5.14(f). Os valores de atraso médio para aproximação são iguais aos obtidos para Espaço Livre, 0,305 ms, 0,302 ms, 0,358 ms e infinito, para os protocolos AODV, DSDV, DSR, OLSR, respectivamente. Já para o afastamento, os atrasos médios são ligeiramente menores do que os obtidos para Espaço Livre, sendo iguais a 0,325 ms, 0,324 ms, 0,358 ms e 0,338 ms para os protocolos AODV, DSDV, DSR e OLSR respectivamente. Observa-se, ainda, que há pouca variação no atraso dos pacotes recebidos tanto para Espaço Livre como para Dois Raios, na aproximação e no afastamento. A barra vermelha nos gráficos representa o valor médio de atraso, o tamanho da caixa significa que grande parte dos valores estão dentro do intervalo delimitado pela caixa e, por fim, a linha tracejada em roxo mostra os valores máximo e mínimo que os valores de atraso atingem.

Os resultados obtidos para o ambiente modelado por Log-Distância são um pouco diferentes. As Figuras 5.14(b) e 5.14(e) evidenciam o perfil de atraso para esse modelo, na aproximação e no afastamento, respectivamente. Os atrasos médios na aproximação são iguais a 0,348 ms, 0,342 ms, 0,776 ms e 0,349 ms para os protocolos AODV, DSDV, DSR, OLSR respectivamente. Observa-se no DSR, para o modelo Log Distância, que as caixas do diagrama de caixas são alongadas indicando que há uma certa variação nos atrasos de cada pacote recebido, sendo essa variação menor para o protocolo DSR. Como o DSR é estado de enlace e reativo, a partir do momento que ele encontra uma rota que possui dois saltos, esse protocolo mantém os dois saltos até o final da simulação. Assim sendo, na aproximação, em grande parte dos casos, esse protocolo possui um alargamento do tamanho da caixa em relação aos demais. Já para o afastamento, os atrasos médios são iguais a 0,314 ms, 0,311 ms, 0,346 ms e 0,318 ms para os protocolos AODV, DSDV, DSR, OLSR respectivamente. Os atrasos médios são, portanto, maiores no afastamento do que na aproximação e do que os atrasos médios no afastamento para os outros modelos de propagação. Nesse cenário, focando especificamente nos protocolos de roteamento na

aproximação, os protocolos AODV, DSDV e OLSR possuem tanto pacotes referentes a 1 salto, que possuem valores na faixa de 0,236 ms, quanto a dois saltos que são pacotes que possuem um comportamento aleatório que varia de 0,59 ms e 0,8 ms, provocando um alargamento da caixa. Em relação ao DSR há a presença apenas de pacotes a dois saltos. Já no afastamento, devido à configuração do cenário, os protocolos possuem pouca influência e por isso há a similaridade entre eles. Essas razões se repetirão nos cenários em túnel subsequentes.

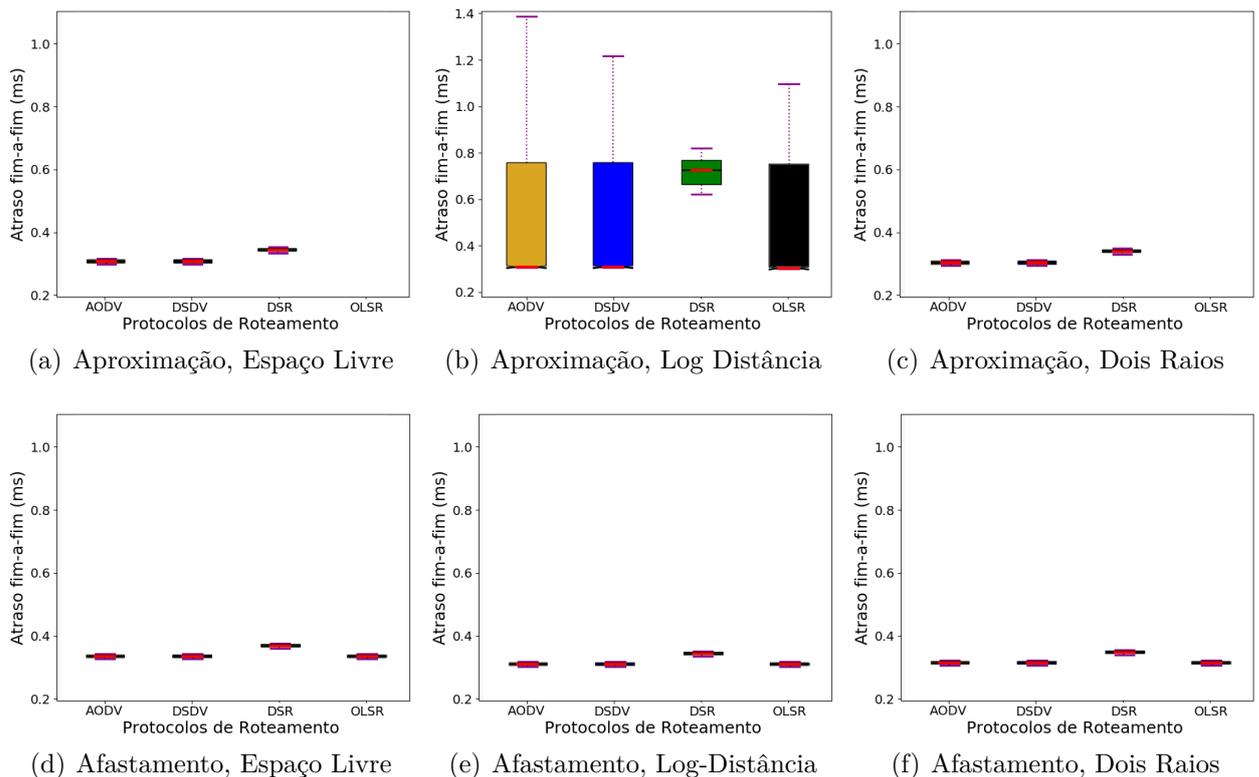


Figura 5.14: Comparação entre os atrasos obtidos para aproximação e afastamento, para cada modelo de propagação, utilizando protocolos de roteamento distintos. O cenário é o de Túnel, com 2 veículos se movendo no mesmo sentido e com mesma velocidade.

Em relação aos tempos de contato médios entre veículo e RSU, observa-se que existem diferenças entre os afastamento e aproximação para todos os modelos. No modelo de Espaço Livre, os tempos de contato médios na aproximação são iguais a 5,941 s, 5,994 s e 5,208 s, para os protocolos AODV, DSDV e DSR. Não há contato quando o protocolo utilizado é o OLSR. De forma semelhante, para o modelo de Dois Raios não há contato quando se utiliza o OLSR. No afastamento tem-se um tempo de contato médio de 5,940 s, para todos os protocolos. O impacto dos protocolos de roteamento quando se trata do afastamento, é muito pequeno, já que a dinâmica dos nós é pequena e não há mudança de rota. O tempo de contato fica estabelecido por cada modelo de propagação. Essa mesma análise se repete para os cenários subsequentes no túnel. O tempo de contato médio entre veículo e RSU quando o ambiente de propagação é modelado por Dois Raios é ligeiramente maior do que para o modelo de Espaço Livre, alcançando valores iguais a 6,576 s, 6,450 s

e 5,409 s para os protocolos AODV, DSDV e DSR.

Já no afastamento, tem-se tempos de contato médios iguais a 6,444 s para todos os protocolos. Por fim, os tempos de contato para o ambiente modelado por Log-Distância é o que apresenta os maiores tempos de contato, alcançando valores de 68,130 s, 68,213 s, 67,464 s, 66,946 s para os protocolos AODV, DSDV, DSR, OLSR, na aproximação. No afastamento os tempos de contato são um pouco menores, sendo iguais a 41,562 s para todos os protocolos. Os valores obtidos para os tempos de contato médio em todos os cenários estão sumarizados nas Tabelas 5.10, 5.11 e 5.12 e os atrasos médios estão sumarizados nas Tabelas 5.7, 5.8, 5.9. A análise dos atrasos e tempo de contato mostra que para um cenário semelhante ao estudado, em que o ambiente de propagação pode ser modelado por Log-Distância, é mais interessante para a aplicação o envio de dados durante a aproximação, uma vez que os atrasos são menores e o tempo de contato é maior. Já para ambientes modelados por Espaço Livre e Dois Raios, conforme parametrizados no cenário estudado, o envio de dados pela aplicação pode ser feito tanto no afastamento quanto na aproximação, que possuem resultados semelhantes para todos os protocolos, exceto o OLSR. Nesse caso, é mais interessante para a aplicação enviar dados durante o afastamento.

Tabela 5.7: Comparação, no Espaço Livre, do atraso médio para cada protocolo de roteamento no afastamento e na aproximação no cenário (i)

Protocolos de Roteamento	Aproximação(ms)	Afastamento(ms)
AODV	0,315	0,355
DSDV	0,309	0,356
DSR	0,378	0,378
OLSR	∞	0,357

Tabela 5.8: Comparação, no Log Distância, do atraso médio para cada protocolo de roteamento no afastamento e na aproximação no cenário (i)

Protocolos de Roteamento	Aproximação(ms)	Afastamento(ms)
AODV	0,348	0,314
DSDV	0,342	0,311
DSR	0,776	0,347
OLSR	0,349	0,318

Tabela 5.9: Comparação, no Dois Raios, do atraso médio para cada protocolo de roteamento no afastamento e na aproximação no cenário (i)

Protocolos de Roteamento	Aproximação(ms)	Afastamento(ms)
AODV	0,305	0,325
DSDV	0,302	0,324
DSR	0,378	0,358
OLSR	∞	0,338

Tabela 5.10: Comparação, no Espaço Livre, do tempo de contato médio para cada protocolo de roteamento no afastamento e na aproximação no cenário (i)

Protocolos de Roteamento	Aproximação(s)	Afastamento(s)
AODV	5,941	6,444
DSDV	5,994	6,444
DSR	5,208	6,444
OLSR	∞	6,444

Tabela 5.11: Comparação, no Log Distância, do tempo de contato médio para cada protocolo de roteamento no afastamento e na aproximação no cenário (i)

Protocolos de Roteamento	Aproximação(s)	Afastamento(s)
AODV	68,130	41,562
DSDV	68,213	41,562
DSR	67,464	41,562
OLSR	66,946	41,562

Tabela 5.12: Comparação, no Dois Raios, do tempo de contato médio para cada protocolo de roteamento no afastamento e na aproximação no cenário (i)

Protocolos de Roteamento	Aproximação(s)	Afastamento(s)
AODV	6,450	6,444
DSDV	6,576	6,444
DSR	5,409	6,444
OLSR	∞	6,444

Túnel, configuração (ii)

Na configuração (ii), os veículos se movem no mesmo sentido e com velocidades diferentes. As Figuras 5.15(a) e 5.15(d) evidenciam o perfil de atraso na aproximação e no afastamento, respectivamente, quando a propagação no ambiente é descrita pelo modelo de Espaço Livre. Na aproximação, o atraso médio para cada protocolo é de 0,273 ms, 0,263 ms, 0,278 ms e 0,728 ms para os protocolos AODV, DSDV, DSR e OLSR respectivamente. Já para o afastamento, os atrasos médios são iguais a 0,355 ms, 0,356 ms, 0,378 ms e 0,357 ms para os protocolos AODV, DSDV, DSR, OLSR respectivamente. O resultado para o modelo de Dois Raios é semelhante ao obtido para o modelo de Espaço Livre, tanto na aproximação quanto no afastamento, conforme observa-se nas Figuras 5.15(c) e 5.15(f). Os valores de atraso médio para aproximação são iguais aos obtidos para Espaço Livre, 0,271 ms, 0,260 ms, 0,278 ms e 0,781 ms, para os protocolos AODV, DSDV, DSR e OLSR, respectivamente. Já para o afastamento, os atrasos médios são ligeiramente menores do que os obtidos para Espaço Livre, sendo iguais a 0,325 ms, 0,324 ms, 0,358 ms e 0,338 ms para os protocolos AODV, DSDV, DSR e OLSR respectivamente. Observa-se, ainda, que há variação no atraso dos pacotes recebidos tanto para Espaço Livre como para Dois Raios, na aproximação. No entanto, o protocolo DSR praticamente não apresenta variação e

a variação do OLSR é muito menor do que a do AODV e DSDV. Em relação ao OLSR para os modelos de Espaço Livre e Dois raios, só há a aparição dos pacotes referentes aos dois saltos, e no Log Distância há a aparição dos dois tipos, de um salto e dois saltos. Já avaliando o DSR, a variação é pequena para os modelos de Espaço Livre e Dois Raios, e se deve a aparição apenas de pacotes referentes a um salto. Porém, no Log-Distância, tem-se a aparição apenas de pacotes a dois saltos e essa diferença de aparição se dá pelos tempos de convergência serem distintos quando se varia os modelos de propagação. No afastamento, a variação no atraso é desprezível para todos os protocolos, inclusive para o cenário modelado por Log-Distância. As Figuras 5.15(d), 5.15(e) e 5.15(f) mostram que o perfil de atraso no afastamento é muito semelhante para todos os cenários estudados.

Os resultados obtidos para o ambiente modelado por Log-Distância são um pouco diferentes na aproximação. A Figura 5.15(b) e 5.15(e) evidenciam o perfil de atraso para esse modelo, na aproximação e no afastamento, respectivamente. Os atrasos médios na aproximação são iguais a 0,259 ms, 0,256 ms, 0,725 ms e 0,259 ms para os protocolos AODV, DSDV, DSR e OLSR, respectivamente. Novamente observa-se uma certa variação nos atrasos de cada pacote recebido, porém essa variação é menor para o protocolo DSR. Já para o afastamento, os atrasos médios são iguais a 0,314 ms, 0,311 ms, 0,346 ms e 0,318 ms para os protocolos AODV, DSDV, DSR e OLSR, respectivamente. Os atrasos médios são, portanto, maiores no afastamento do que na aproximação.

Em relação aos tempos de contato médios entre veículo e RSU, observa-se que existem diferenças entre os afastamento e aproximação para todos os modelos. No modelo de Espaço Livre, os tempos de contato médios na aproximação são iguais a 7,175 s, 9,079 s, 5,207 s e 3,001 s, para os protocolos AODV, DSDV, DSR e OLSR. No afastamento tem-se um tempo de contato médio de 5,940 s, para todos os protocolos. O tempo de contato médio entre veículo e RSU quando o ambiente de propagação é modelado por Dois Raios é ligeiramente maior do que para o modelo de Espaço Livre, alcançando valores iguais a 9,971 s, 9,817 s, 5,208 s e 3,913 s para os protocolos AODV, DSDV, DSR e OLSR. Já no afastamento, tem-se tempos de contato médios iguais a 6,444 s para todos os protocolos. Por fim, os tempos de contato para o ambiente modelado por Log-Distância é o que apresenta os maiores tempos de contato, alcançando valores de 56,417 s, 57,203 s, 52,464 s, 55,953 s para os protocolos AODV, DSDV, DSR, OLSR, na aproximação. No afastamento os tempos de contato são um pouco menores, sendo iguais a 41,562 s para todos os protocolos. Os valores obtidos para os tempos de contato médio em todos os cenários estão sumarizados nas Tabelas 5.16, 5.17 e 5.18 e os atrasos médios estão sumarizados nas Tabelas 5.13, 5.14, 5.15. A análise dos atrasos e tempo de contato mostra que para um cenário semelhante ao estudado, em que o ambiente de propagação pode ser modelado por Log-Distância, é mais interessante para a aplicação o envio de dados durante a aproximação, uma vez que os atrasos são menores e o tempo de contato é maior. Já para ambientes modelados por Espaço Livre e Dois Raios, conforme parametrizados no cenário estudado, é preferencial o envio de dados durante o afastamento, uma vez que

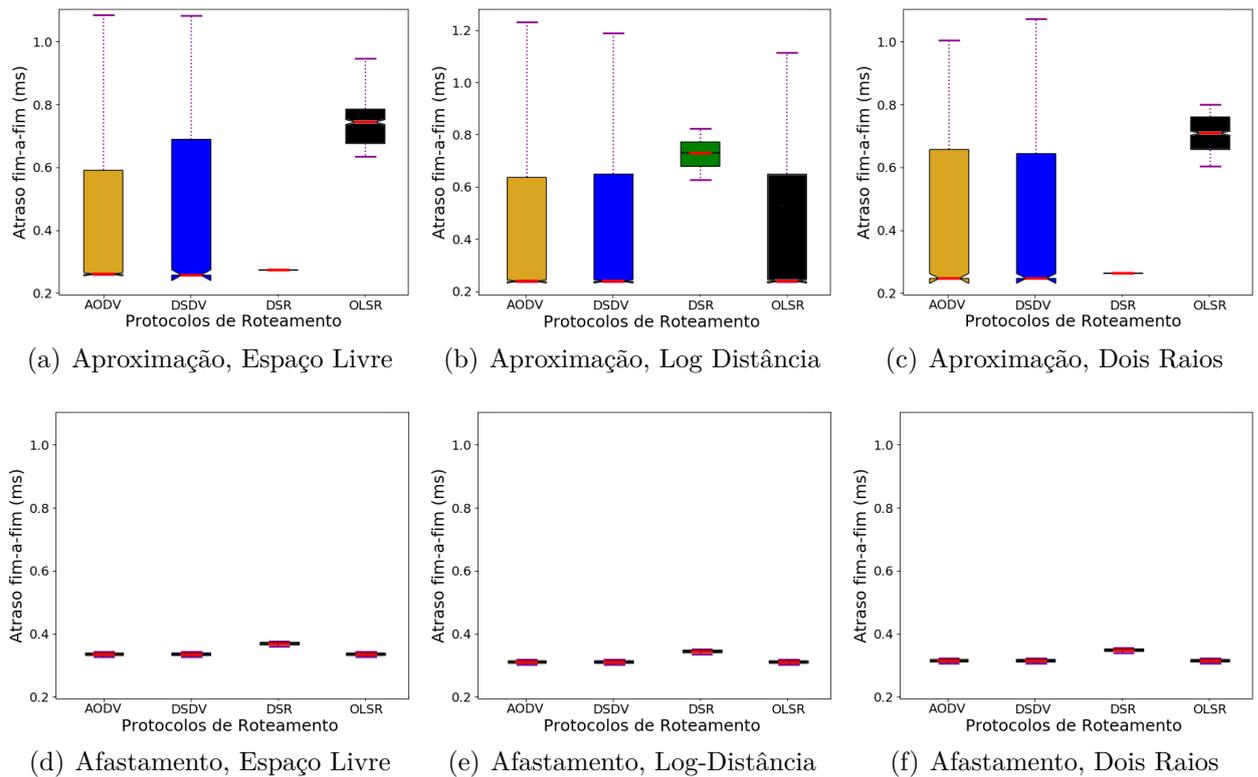


Figura 5.15: Comparação entre os atrasos obtidos para aproximação e afastamento, para cada modelo de propagação, utilizando protocolos de roteamento distintos. O cenário é o de Túnel, com 2 veículos se movendo no mesmo sentido e com velocidades diferentes.

há menor variação do atraso. No entanto os tempos de contato são maiores durante a aproximação, exceto quando se utiliza o protocolo DSR e OLSR.

Tabela 5.13: Comparação, no Espaço Livre, do atraso médio para cada protocolo de roteamento no afastamento e na aproximação no cenário (ii)

Protocolos de Roteamento	Aproximação(ms)	Afastamento(ms)
AODV	0,273	0,355
DSDV	0,263	0,356
DSR	0,278	0,378
OLSR	0,728	0,357

Tabela 5.14: Comparação, no Log Distância, do atraso médio para cada protocolo de roteamento no afastamento e na aproximação no cenário (ii)

Protocolos de Roteamento	Aproximação(ms)	Afastamento(ms)
AODV	0,259	0,314
DSDV	0,256	0,311
DSR	0,725	0,346
OLSR	0,259	0,318

Tabela 5.15: Comparação, no Dois Raios, do atraso médio para cada protocolo de roteamento no afastamento e na aproximação no cenário (ii)

Protocolos de Roteamento	Aproximação(ms)	Afastamento(ms)
AODV	0,271	0,325
DSDV	0,260	0,324
DSR	0,278	0,358
OLSR	0,781	0,338

Tabela 5.16: Comparação, no Espaço Livre, do tempo de contato médio para cada protocolo de roteamento no afastamento e na aproximação no cenário (ii)

Protocolos de Roteamento	Aproximação(s)	Afastamento(s)
AODV	7,175	6,444
DSDV	9,079	6,444
DSR	5,207	6,444
OLSR	3,001	6,444

Tabela 5.17: Comparação, no Log Distância, do tempo de contato médio para cada protocolo de roteamento no afastamento e na aproximação no cenário (ii)

Protocolos de Roteamento	Aproximação(s)	Afastamento(s)
AODV	56,417	41,562
DSDV	57,203	41,562
DSR	52,464	41,562
OLSR	55,953	41,562

Tabela 5.18: Comparação, no Dois Raios, do tempo de contato médio para cada protocolo de roteamento no afastamento e na aproximação no cenário (ii)

Protocolos de Roteamento	Aproximação(s)	Afastamento(s)
AODV	9,817	6,444
DSDV	9,971	6,444
DSR	5,409	6,444
OLSR	3,913	6,444

Área aberta, configuração (iii)

Na configuração (iii), os veículos se movem em direções opostas com a mesma velocidade, se cruzando no centro do sistema. As Figuras 5.16(a) e 5.16(d) evidenciam o perfil de atraso na aproximação e no afastamento, respectivamente, quando a propagação no ambiente é descrita pelo modelo de Espaço Livre. Na aproximação, o atraso médio para cada protocolo é de 0,297 ms, 0,312 ms, 0,405 ms e 0,387 ms para os protocolos AODV, DSDV, DSR e OLSR respectivamente. Já para o afastamento, os atrasos médios são iguais a 0,355 ms, 0,372 ms, 0,365 ms e 0,392 ms para os protocolos AODV, DSDV, DSR e OLSR respectivamente. Dessa forma, o protocolo DSR é o que apresenta maior atraso para a aproximação, enquanto para o afastamento é o OLSR. Esse comportamento se inverte ao

analisar os resultados para o modelos de Dois Raios, conforme ilustram as Figuras 5.16(c) e 5.16(f). Os valores médios obtidos para todos os protocolos na aproximação são 0,312 ms, 0,323 ms, 0,414 ms e 0,392 ms para AODV, DSDV, DSR e OLSR, respectivamente. No afastamento obtém-se atrasos médios iguais a 0,368 ms, 0,313 ms, 0,381 ms e 0,398 ms para AODV, DSDV, DSR e OLSR, respectivamente. Observa-se, ainda, que não há variação no atraso dos pacotes recebidos tanto para Espaço Livre como para Dois Raios, na aproximação e no afastamento. Pois nesses dois modelos há a predominância de pacotes sendo enviados a um salto do que a dois saltos, fazendo com que a variação se torne pequena.

Os resultados obtidos para o ambiente modelado por Log-Distância são um pouco diferentes, principalmente na aproximação. As Figuras 5.16(b) e 5.16(e) evidenciam o perfil de atraso para esse modelo, na aproximação e no afastamento, respectivamente. Os atrasos médios na aproximação são iguais a 0,332 ms, 0,277 ms, 0,719 ms e 0,389 ms para os protocolos AODV, DSDV, DSR e OLSR, respectivamente. Observa-se uma certa variação nos atrasos dos pacotes recebidos usando o protocolo DSR. Já para o afastamento, os atrasos médios são iguais a 0,337 ms, 0,354 ms, 0,382 ms e 0,393 ms para os protocolos AODV, DSDV, DSR e OLSR, respectivamente. Os atrasos médios são, portanto, maiores no afastamento do que na aproximação para os protocolos AODV e DSDV, e menores para os protocolos DSR e OLSR.

Observa-se, ainda, que não há variação no atraso dos pacotes recebidos tanto para Espaço Livre como para Dois Raios, na aproximação e no afastamento, exceto para o protocolo DSR. Pois como ele é estado de enlace e reativo, a partir do momento que ele encontra uma rota que possui dois saltos, esse protocolo mantém os dois saltos até o final da simulação. Assim sendo, na aproximação, em grande parte dos casos, esse protocolo possui um alargamento do tamanho da caixa em relação aos demais. Assim sendo os demais casos subsequentes, na área aberta, terão esse alargamento devido a esse mesmo motivo.

Em relação aos tempos de contato médios entre veículo e RSU, observa-se que existem diferenças entre os afastamento e aproximação para todos os modelos. No modelo de Espaço Livre, os tempos de contato médios na aproximação são iguais a 6,071 s, 6,011 s, 3,516 s e 5,844 s, para os protocolos AODV, DSDV, DSR e OLSR. Enquanto no afastamento os tempos são, respectivamente, 3,291 s, 3,148 s, 3,240 s e 2,970 s. O tempo de contato médio entre veículo e RSU quando o ambiente de propagação é modelado por Dois Raios é ligeiramente menor do que para o modelo de Espaço Livre, alcançando valores iguais a 6,011 s, 6,071 s, 3,524 s e 5,346 para os protocolos AODV, DSDV, DSR e OLSR. Já no afastamento, tem-se tempos de contato médios respectivamente iguais a 3,237 s, 3,135 s, 3,189 s e 2,859 s. Por fim, os tempos de contato para o ambiente modelado por Log-Distância apresenta tempos de contato médios iguais a 6,209 s, 12,664 s, 6,198 s, 3,523 s para os protocolos AODV, DSDV, DSR e OLSR, na aproximação. No afastamento os tempos de contato são um pouco menores, sendo respectivamente iguais a 3,269 s,

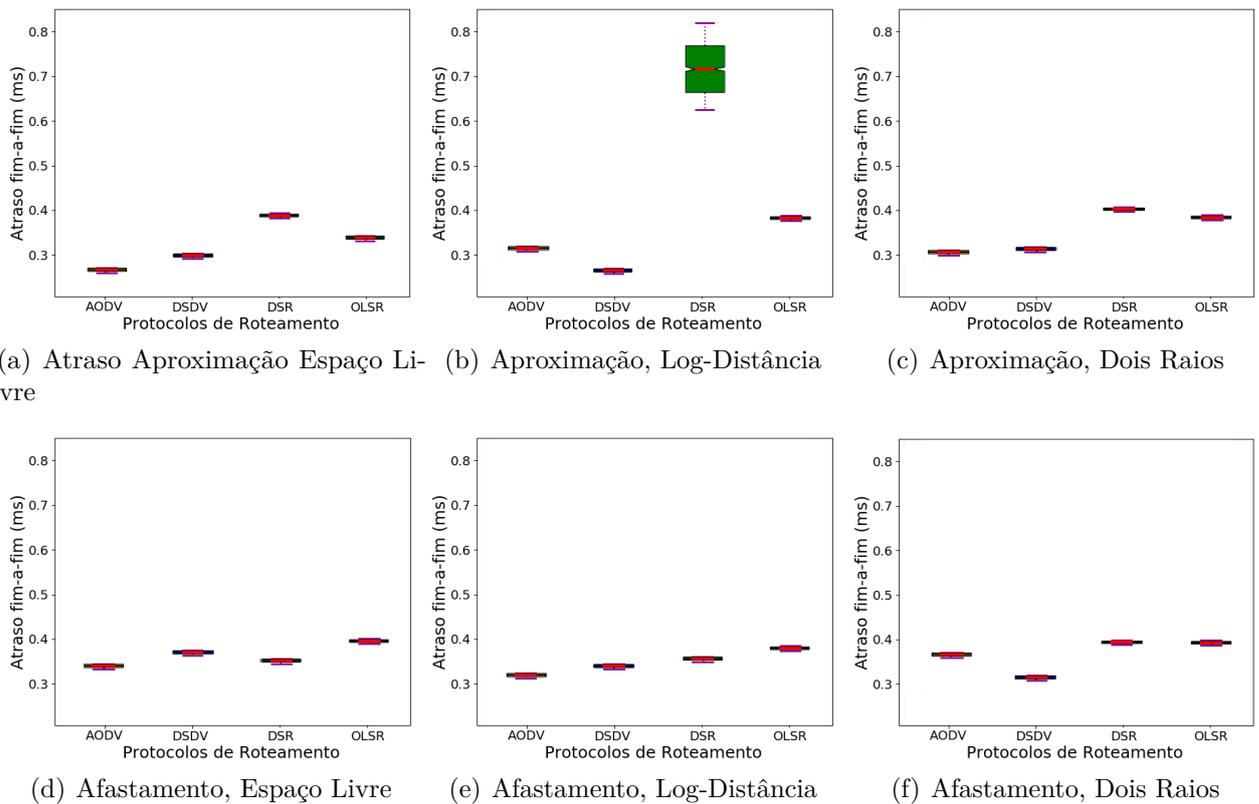


Figura 5.16: Comparação entre os atrasos obtidos para aproximação e afastamento, para cada modelo de propagação, utilizando protocolos de roteamento distintos. O cenário é o de Área Aberta com 2 veículos se movendo em direções opostas com mesma velocidade e se cruzando no centro do sistema.

3,216 s, 3,148 s e 2,919 s. Os valores obtidos para os tempos de contato médio em todos os cenários estão sumarizados nas Tabelas 5.22, 5.23 e 5.24 e os atrasos médios estão sumarizados nas Tabelas 5.19, 5.20, 5.21. A análise dos atrasos e tempo de contato mostra que para um cenário semelhante ao estudado, seja o ambiente de propagação modelado por Log-Distância, Dois Raios ou Espaço Livre, é mais interessante para a aplicação o envio de dados durante a aproximação, uma vez que os atrasos são menores e o tempo de contato é maior.

Tabela 5.19: Comparação, no Espaço Livre, do atraso médio para cada protocolo de roteamento no afastamento e na aproximação no cenário (iii)

Protocolos de Roteamento	Aproximação(ms)	Afastamento(ms)
AODV	0,297	0,355
DSDV	0,312	0,372
DSR	0,405	0,365
OLSR	0,387	0,392

Tabela 5.20: Comparação, no Log Distância, do atraso médio para cada protocolo de roteamento no afastamento e na aproximação no cenário (iii)

Protocolos de Roteamento	Aproximação(ms)	Afastamento(ms)
AODV	0,332	0,337
DSDV	0,277	0,354
DSR	0,719	0,382
OLSR	0,389	0,393

Tabela 5.21: Comparação, no Dois Raios, do atraso médio para cada protocolo de roteamento no afastamento e na aproximação no cenário (iii)

Protocolos de Roteamento	Aproximação(ms)	Afastamento(ms)
AODV	0,312	0,368
DSDV	0,323	0,313
DSR	0,414	0,381
OLSR	0,392	0,398

Tabela 5.22: Comparação, no Espaço Livre, do tempo de contato médio para cada protocolo de roteamento no afastamento e na aproximação no cenário (iii)

Protocolos de Roteamento	Aproximação(s)	Afastamento(s)
AODV	6,071	3,291
DSDV	6,011	3,148
DSR	3,516	3,240
OLSR	5,844	2,970

Tabela 5.23: Comparação, no Log Distância, do tempo de contato médio para cada protocolo de roteamento no afastamento e na aproximação no cenário (iii)

Protocolos de Roteamento	Aproximação(s)	Afastamento(s)
AODV	6,209	3,269
DSDV	12,664	3,216
DSR	6,198	3,148
OLSR	3,523	2,919

Tabela 5.24: Comparação, no Dois Raios, do tempo de contato médio para cada protocolo de roteamento no afastamento e na aproximação no cenário (iii)

Protocolos de Roteamento	Aproximação(s)	Afastamento(s)
AODV	6,011	3,237
DSDV	6,071	3,135
DSR	3,524	3,189
OLSR	5,346	2,859

Área aberta, configuração (iv)

Na configuração (iv), um veículo se move com velocidade constante enquanto o outro veículo está parado no centro do cenário. As Figuras 5.17(a) e 5.17(d) evidenciam o perfil

de atraso na aproximação e no afastamento, respectivamente, quando a propagação no ambiente é descrita pelo modelo de Espaço Livre. Na aproximação, o atraso médio para cada protocolo é de 0,296 ms, 0,302 ms, 0,739 ms e 0,387 ms para os protocolos AODV, DSDV, DSR e OLSR respectivamente. Já para o afastamento, os atrasos médios são iguais a 0,361 ms, 0,373 ms, 0,382 ms e 0,392 ms para os protocolos AODV, DSDV, DSR e OLSR respectivamente. A maior diferença nesse caso ocorre entre o afastamento e a aproximação quando se utiliza o protocolo DSR. Isso ocorre devido à predominância de pacotes recebidos a dois saltos na aproximação, enquanto no afastamento há predominância de entregas a um salto, reduzindo assim o valor do atraso fim-a-fim no afastamento. Diferentemente das outras configurações estudadas, nessa configuração o comportamento observado para ao modelo de Dois Raios difere de forma significativa do comportamento observado para Espaço Livre. O resultado para Dois Raios pode ser observado nas Figuras 5.17(c) e 5.17(f). Os valores médios obtidos para todos os protocolos na aproximação são 0,303 ms, 0,379 ms, 0,740 ms e 0,388 ms para AODV, DSDV, DSR e OLSR, respectivamente. No afastamento obtém-se atrasos médios iguais a 0,381 ms, 0,394 ms, 0,376 ms e 0,402 ms para AODV, DSDV, DSR e OLSR, respectivamente.

Os resultados obtidos para o ambiente modelado por Log-Distância são semelhantes ao de Espaço Livre na aproximação, mas diferem no afastamento. As Figuras 5.17(b) e 5.17(e) evidenciam o perfil de atraso para esse modelo, na aproximação e no afastamento, respectivamente. Os atrasos médios na aproximação são iguais a 0,289 ms, 0,296 ms, 0,740 ms e 0,379 ms para os protocolos AODV, DSDV, DSR e OLSR, respectivamente. Observa-se uma certa variação nos atrasos dos pacotes recebidos usando o protocolo DSR. Já para o afastamento, os atrasos médios são iguais a 0,360 ms, 0,387 ms, 0,389 ms e 0,390 ms para os protocolos AODV, DSDV, DSR e OLSR, respectivamente. Os atrasos médios são, portanto, maiores no afastamento do que na aproximação, exceto para o DSR.

Em relação aos tempos de contato médios entre veículo e RSU, observa-se que existem diferenças entre os afastamento e aproximação para todos os modelos. No modelo de Espaço Livre, os tempos de contato médios na aproximação são iguais a 12,680 s, 12,680 s, 6,319 s e 5,844 s, para os protocolos AODV, DSDV, DSR e OLSR. Enquanto no afastamento os tempos são, respectivamente, 4,804 s, 4,628 s, 4,739 s e 3,960. Essa diferença de valores nos dois sentidos entre os protocolos de vetor distância, se deve ao fato de ocorrer a mudança de rota de um salto para dois saltos. Nessa mudança há perda de pacotes e só acontece no afastamento, com isso o tempo de contato médio no afastamento é menor. Em grande parte dos casos, esse tipo de análise se repete. Agora se tratando do OLSR, não há a mudança de rota para ambos os sentidos, com isso os valores são mais próximos. O tempo de contato médio entre veículo e RSU quando o ambiente de propagação é modelado por Dois Raios é ligeiramente menor do que para o modelo de Espaço Livre, alcançando valores iguais a 12,680 s, 12,680 s, 6,319 s e 5,346 s para os protocolos AODV, DSDV, DSR e OLSR. Já no afastamento, tem-se tempos de contato médios respectivamente iguais a 4,804 s, 4,670 s, 4,740 s e 3,812 s. Por fim, os tempos de contato para o ambiente modelado por

Log-Distância apresenta tempos de contato médios iguais a 12,675 s, 12,680 s, 6,319 s e 5,844 s para os protocolos AODV, DSDV, DSR e OLSR, na aproximação. No afastamento os tempos de contato são um pouco menores, sendo respectivamente iguais a 4,808 s, 4,775 s, 4,736 s e 3,892 s. Os valores obtidos para os tempos de contato médio em todos os cenários estão sumarizados nas Tabelas 5.28, 5.29 e 5.30 e os atrasos médios estão sumarizados nas Tabelas 5.25, 5.26, 5.27. A análise dos atrasos e tempo de contato mostra que para um cenário semelhante ao estudado, seja o ambiente de propagação modelado por Log-Distância, Dois Raios ou Espaço Livre, é mais interessante para a aplicação o envio de dados durante a aproximação, uma vez que os atrasos são menores e o tempo de contato é maior.

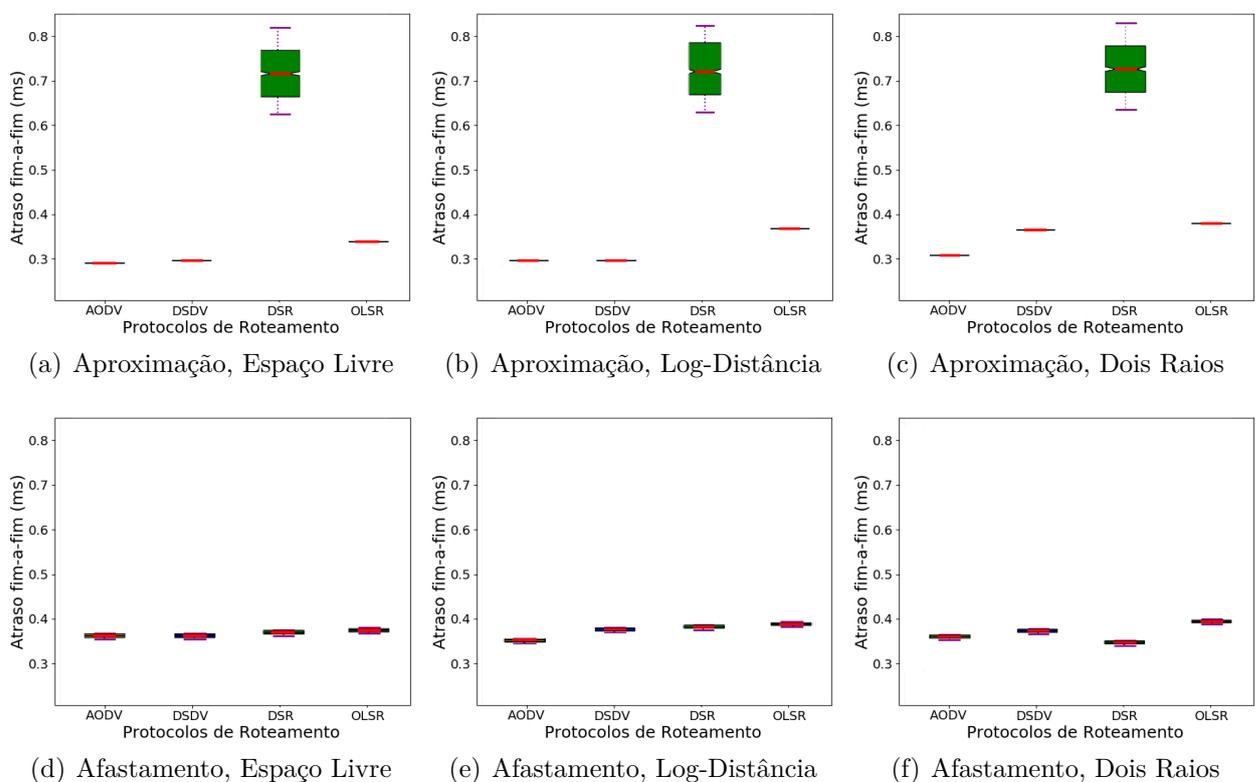


Figura 5.17: Comparação entre os atrasos obtidos para aproximação e afastamento, para cada modelo de propagação, utilizando protocolos de roteamento distintos. O cenário é o de Área Aberta, com um veículo se movendo com velocidade constante e outro parado no centro do sistema.

Tabela 5.25: Comparação, no Espaço Livre, do atraso médio para cada protocolo de roteamento no afastamento e na aproximação no cenário (iv)

Protocolos de Roteamento	Aproximação(ms)	Afastamento(ms)
AODV	0,296	0,361
DSDV	0,302	0,373
DSR	0,739	0,382
OLSR	0,387	0,392

Tabela 5.26: Comparação, no Log Distância, do atraso médio para cada protocolo de roteamento no afastamento e na aproximação no cenário (iv)

Protocolos de Roteamento	Aproximação(ms)	Afastamento(ms)
AODV	0,289	0,360
DSDV	0,296	0,387
DSR	0,740	0,389
OLSR	0,379	0,390

Tabela 5.27: Comparação, no Dois Raios, do atraso médio para cada protocolo de roteamento no afastamento e na aproximação no cenário (iv)

Protocolos de Roteamento	Aproximação(ms)	Afastamento(ms)
AODV	0,303	0,381
DSDV	0,379	0,394
DSR	0,740	0,376
OLSR	0,388	0,402

Tabela 5.28: Comparação, no Espaço Livre, do tempo de contato médio para cada protocolo de roteamento no afastamento e na aproximação no cenário (iv)

Protocolos de Roteamento	Aproximação(s)	Afastamento(s)
AODV	12,680	4,804
DSDV	12,680	4,628
DSR	6,319	4,739
OLSR	5,844	3,960

Tabela 5.29: Comparação, no Log Distância, do tempo de contato médio para cada protocolo de roteamento no afastamento e na aproximação no cenário (iv)

Protocolos de Roteamento	Aproximação(s)	Afastamento(s)
AODV	12,680	4,808
DSDV	12,680	4,775
DSR	6,319	4,736
OLSR	5,844	3,892

Tabela 5.30: Comparação, no Dois Raios, do tempo de contato médio para cada protocolo de roteamento no afastamento e na aproximação no cenário (iv)

Protocolos de Roteamento	Aproximação(s)	Afastamento(s)
AODV	12,680	4,808
DSDV	12,680	4,775
DSR	6,319	4,736
OLSR	5,346	3,892

Capítulo 6

Conclusão

Este trabalho avaliou a influência de diferentes ambientes de propagação no desempenho de protocolos de roteamento de redes *ad-hoc* móveis, quando aplicados a uma rede veicular infraestruturada em diferentes cenários. A ideia é obter indícios sobre qual protocolo de roteamento apresenta o melhor desempenho de acordo com o modelo de propagação que melhor descreve o cenário avaliado. Os cenários estudados foram uma Área Aberta e um Túnel, representando ambientes de propagação externa e interna, respectivamente. Nesses cenários, os veículos se aproximam e se afastam de uma RSU (*Road-Side Unit*) localizada no centro de cada cenário. A avaliação é feita a partir da análise de métricas de desempenho de rede comumente utilizadas, como vazão, taxa de entrega de pacotes e atraso, e do tempo de contato entre os veículos em cada cenário. Os cenários estudados têm como base um cenário experimental no qual foram realizadas campanhas de medição em outro trabalho. Os cenários foram, então, implementados no simulador de redes baseado em eventos discretos *Network Simulator 3* (NS-3). Os parâmetros dos modelos de propagação utilizados nas simulações foram obtidos a partir do ajuste dos modelos aos dados empíricos obtidos nas campanhas de medição.

Os ajustes dos modelos de propagação aos dados empíricos levaram em consideração três modelos de perda de percurso: Espaço Livre, Log-Distância e Dois Raios. No cenário de Túnel, tanto para a aproximação quanto para o afastamento do veículo, que representa uma OBU (*On-Board Unit*), em relação a RSU, o modelo de perda de percurso que apresenta menor erro de ajuste é o Log-Distância. Já o modelo de Dois Raios, apesar de muito usado em cenários V2I, foi o que obteve o pior ajuste aos dados empíricos em todos os cenários, apresentando o maior RMSE. É importante salientar que o valor do expoente de perda de percurso para todos os modelos de propagação ficou abaixo de 2 no cenário de Túnel, para o primeiro limiar de distância. Isso é justificado pelas condições de visada direta, que melhora a recepção do sinal, apesar da existência de componentes de multipercurso confinadas dentro do túnel, que combinadas no receptor costumam provocar maior atenuação. No cenário de Área Aberta, o modelo Log-Distância foi o que obteve o melhor ajuste. O modelo de Espaço Livre possui a menor perda no cenário de Área Aberta,

o que resulta em valores melhores para as métricas de desempenho analisadas. O modelo de Espaço Livre, no entanto, é um modelo de referência, cujos resultados oferecem o limiar de melhor caso para as métricas avaliadas, não sendo de fato alcançáveis em cenários reais.

Em relação à análise de desempenho dos protocolos de roteamento nos diferentes cenários, observa-se que há de fato influência do ambiente de propagação no desempenho dos protocolos e que alguns protocolos se destacam como melhor opção para determinado ambiente. Para que o protocolo tenha esse destaque, é necessário que obtenha um comportamento similar nos resultados obtidos para cada métrica de desempenho avaliada. Neste trabalho, considera-se que o protocolo de roteamento obteve bom desempenho em um determinado cenário se obtiver a melhor resposta observadas as métricas de PDR e vazão, pois o atraso e tempo de contato corroboram com as resposta da PDR e vazão. Isso significa que o protocolo que tem a maior PDR e vazão, terá o maior tempo de contato e menor atraso. Quando uma aplicação V2I é implantada em um ambiente de Área Aberta que pode ser modelado como Espaço Livre, o protocolo que alcança melhor desempenho é o AODV em todas as configurações avaliadas. Caso o melhor modelo para descrever o ambiente de propagação seja o Log-Distância o protocolo AODV é o mais indicado, exceto quando os nós se movem com a mesma velocidade em sentidos opostos, se cruzando no centro do sistema (configuração iii). Nesse caso, o DSDV possui o melhor desempenho. Quando a modelagem do ambiente segue o modelo de Dois Raios, o AODV possui melhor desempenho para todos os casos. Nesse cenário de Área Aberta, essa diferença entre os protocolos de roteamento se deve à dinâmica de mudança de rota, de um para dois saltos ou de dois para um salto. Acredita-se que o tempo de convergência é influenciado de forma diferente dependendo do ambiente de propagação e do movimento dos veículos. Essa diferença entre os tempos de convergência são refletidas nas métricas de desempenho avaliadas.

Quanto ao cenário de Túnel, se o ambiente de propagação seguir o modelo de Espaço Livre, o desempenho obtido não é bom para nenhum dos protocolos de roteamento avaliados. No entanto, o protocolo DSDV apresenta um desempenho superior aos outros. O desempenho dos protocolos de roteamento em ambientes que seguem o modelo de Dois Raios também não é bom, sendo que o protocolo DSDV, assim como no do Espaço Livre, apresenta o melhor desempenho nesse cenário. Já em ambientes que seguem o modelo de Log-Distância, os protocolos que possuem melhor desempenho são o DSDV e AODV. No entanto, nesse cenário de Túnel, a dinamicidade dos nós é reduzida, se comparado com a área aberta, e o impacto dos protocolos de roteamento no desempenho da rede se torna menos relevante e com mudanças menos significativa para cada métrica analisada. Esse impacto reduzido é visto principalmente no afastamento. Na aproximação, como existe mudança de rota e pacotes transmitidos a um salto e dois saltos, a variação no perfil de atraso é maior se comparado com o afastamento, no entanto, avaliando a PDR para todos os cenários no túnel, os protocolos de roteamento possuem desempenho similares, sendo levemente impactados pelos modelos de propagação estudados.

A avaliação do perfil de atraso mostra que há uma diferença de comportamento entre os protocolos e cenários quando a comunicação ocorre a um salto e a dois saltos. Não se observa um padrão para o comportamento obtido para dois saltos e varia de 0,59 ms a 0,80 ms. Já para a comunicação a 1 salto, o atraso varia com um comportamento aproximadamente linear, de forma que aumenta quando a OBU se afasta da RSU e diminui quando se aproxima da RSU, apresentando um valor médio de aproximadamente 0,236 ms, com exceção do DSR que esse padrão vai para 0,255 ms. A mudança na rota provoca perda de pacotes, influenciando diretamente na PDR. Observa-se que a perda de pacote é mais significativa quando há mudança de um para dois saltos. Essa mudança de rota também afeta o tempo de contato, que diminui quando a comunicação de um para dois saltos (afastamentos) e cresce quando for de dois para um salto (aproximação).

6.1 Trabalhos Futuros

Como trabalhos futuros pretende-se realizar campanhas de medição em comunicações V2V e V2X para verificar a validade de modelos de propagação propostos na literatura. Pretende-se também construir uma simulação mais realista, inserindo atraso aleatório no canal de comunicação e incluindo modelos de desvanecimento para cenários V2V, V2I e V2X, em Área Aberta e Túnel. Deseja-se avaliar ainda, o desempenho dos protocolos de roteamento sob influência de outros modelos de propagação mais complexos, que levem em consideração reflexões em paredes, e utilizando outras métricas de avaliação de desempenho, como o tempo de convergência das tabelas de roteamento. Além disso, pretende-se avaliar o desempenho de outros protocolos de roteamento, principalmente aqueles específicos de VANETs. Por fim, deseja-se investigar o desempenho desses protocolos em um ambiente mais realista, utilizando um conjunto de dados de mobilidade real.

Referências

- [1] RAPPAPORT, T. S. *Wireless communications: principles and practice*. [S.l.]: prentice hall PTR New Jersey, 2011.
- [2] KAKKASAGERI, M.; MANVI, S. Information management in vehicular ad hoc networks: A review. *journal of network and computer Applications*, Elsevier, v. 39, p. 334–350, 2014.
- [3] ALVES, R. S. et al. Redes Veiculares: Princípios, Aplicações e Desafios. UFRJ: GTA/PEE/COPPE, 2012. Disponível em <http://www.gta.ufrj.br/ftp/gta/TechReports/ACC09.pdf>. Acessado em 02/12/2019.
- [4] QAYYUM, A.; VIENNOT, L.; LAOUITI, A. Multipoint relaying for flooding broadcast messages in mobile wireless networks. In: IEEE. *Proceedings of the 35th annual Hawaii international conference on system sciences*. [S.l.], 2002. p. 3866–3875.
- [5] FOUNDATION N.S. et al. Network Simulator ns-3. Disponível em <https://www.nsnam.org/>. Acessado em 14/06/2019.
- [6] GROUP, I. . p W. Ieee standard for information technology-local and metropolitan area networks-specific requirements-part 11: Wireless lan medium access control (mac) and physical layer (phy) specifications amendment 6: Wireless access in vehicular environments. *IEEE Std; IEEE: Piscataway, NJ, USA*, 2010.
- [7] SASSI, A.; ELHILLALI, Y.; CHARFI, F. Evaluating experimental measurements of the ieee 802.11p communication using arada locomate obu device compared to the theoretical simulation results. *Wirel. Pers. Commun.*, Kluwer Academic Publishers, USA, v. 97, n. 3, p. 3861–3874, dez. 2017. ISSN 0929-6212. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s11277-017-4703-4>>.
- [8] MEDEIROS, D. S. V.; HERNANDEZ, D. A. B.; CAMPISTA, M. E. M.; PEDROZA, A. de C. P. Impact of relative speed on node vicinity dynamics in vanets. *Wireless Networks*, v. 25, n. 4, p. 1895–1912, May 2019.
- [9] CHENG, H. T.; SHAN H.AND ZHUANG, W. Infotainment and road safety service support in vehicular networking: From a communication perspective. *mechanical systems and signal processing*. [S.l.]: Interdisciplinary Aspects of Vehicle Dynamics, 2010. p. 2020 – 2038.
- [10] Tlili, T.; Chicano, F.; Krichen, S.; Alba, E. Evolutionary algorithm based on partition crossover (eapx) for the vehicle routing problem. In: *2015 International Conference on Intelligent Networking and Collaborative Systems*. [S.l.: s.n.], 2015. p. 169–175.
- [11] PAUL, B.; IBRAHIM, M.; BIKAS, M.; NASER, A. Vanet routing protocols: Pros and cons. *arXiv preprint arXiv:1204.1201*, 2012.

- [12] PATEL, D.; FAISAL, M.; BATAVIA, P.; MAKHIJA, S.; MANI, M. Overview of routing protocols in vanet. *International Journal of Computer Applications*, Foundation of Computer Science, v. 136, n. 9, p. 4–7, 2016.
- [13] PARSONS, J. D. *The mobile radio propagation channel*. [S.l.]: Wiley Online Library, 2000.
- [14] Jamalipour, A. Cognitive heterogeneous mobile networks [message from the editor-in-chief]. *IEEE Wireless Communications*, v. 15, n. 3, p. 2–3, June 2008. ISSN 1536-1284.
- [15] ALMEIDA, T. T.; GOMES, L. de C.; ORTIZ, F. M.; JÚNIOR, J. G. R.; COSTA, L. H. M. K. Análise de desempenho do ieee 802.11p: Simulações versus experimentos reais. In: *Anais Principais do XXXVI Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos*. Porto Alegre, RS, Brasil: SBC, 2018. ISSN 2177-9384. Disponível em: <<https://ojs.sbc.org.br/index.php/sbrc/article/view/2433>>.
- [16] Qureshi, M. A.; Noor, R. M. Towards improving vehicular communication in modern vehicular environment. In: *2013 11th International Conference on Frontiers of Information Technology*. [S.l.: s.n.], 2013. p. 177–182.
- [17] HROVAT, A.; KANDUS, G.; JAVORNIK, T. Four-slope channel model for path loss prediction in tunnels at 400 mhz. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, Institution of Engineering and Technology, v. 4, p. 571–582(11), May 2010. ISSN 1751-8725. Disponível em: <<https://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/iet-map.2009.0159>>.
- [18] QURESHI, M. A.; NOOR, R. M.; SHAMIM, A.; SHAMSHIRBAND, S.; CHOO, K.-K. R. A lightweight radio propagation model for vehicular communication in road tunnels. *PloS one*, Public Library of Science, v. 11, n. 3, 2016.
- [19] BENIN, J.; NOWATKOWSKI, M.; OWEN, H. L. Vehicular network simulation propagation loss model parameter standardization in ns-3 and beyond. *2012 Proceedings of IEEE Southeastcon*, p. 1–5, 2012.
- [20] GALVÁN, W.; FONSECA, A. O impacto dos modelos de propagação nos protocolos de roteamento para redes veiculares urbanas. *XXXIV Simpósio Brasileiro de Telecomunicações-SBrT*, p. 1–5, 2016.
- [21] BOEGLIN, H.; HILT, B.; DROUHIN, F. Emulating a realistic vanet channel in ns-3: High mobile wireless nodes. In: _____. [S.l.: s.n.], 2017. p. 107–131. ISBN 9781848218536.
- [22] JUNIOR, J. P. T. F. *Predição de cobertura para O interior das Edificações com Transmissores EM Ambientes Microcelulares*. Tese (Doutorado), 2003.
- [23] Onubogu, O.; Ziri-Castro, K.; Jayalath, D.; Ansari, K.; Suzuki, H. Empirical vehicle-to-vehicle pathloss modeling in highway, suburban and urban environments at 5.8 ghz. In: *2014 8th International Conference on Signal Processing and Communication Systems (ICSPCS)*. [S.l.: s.n.], 2014. p. 1–6.
- [24] WAHID, I.; IKRAM, A. A.; AHMAD, M.; ALI, S.; ALI, A. State of the art routing protocols in vanets: A review. *Procedia computer science*, Elsevier, v. 130, p. 689–694, 2018.

- [25] LIU, J.; WAN, J.; WANG, Q.; DENG, P.; ZHOU, K.; QIAO, Y. A survey on position-based routing for vehicular ad hoc networks. *Telecommunication Systems*, Springer, v. 62, n. 1, p. 15–30, 2016.
- [26] KARP, B.; KUNG, H.-T. Gpsr: Greedy perimeter stateless routing for wireless networks. In: ACM. *Proceedings of the 6th annual international conference on Mobile computing and networking*. [S.l.], 2000. p. 243–254.
- [27] KÄSEMANN, M.; FÜSSLER, H.; HARTENSTEIN, H.; MAUVE, M. A reactive location service for mobile ad hoc networks. *Technical reports*, v. 2, 2002.
- [28] CLAUSEN, T. H.; JACQUET, P. Optimized link state routing protocol (olsrp). *The Internet Engineering Task Force, MANET working Group*, v. 3626, 10 2003.
- [29] KAUR, A.; MITTAL, M. A comprehensive review on performance of aodv and dsdv protocol using manhattan grid mobility model. *International Journal of Research in Engineering and Technology*, v. 3, p. 496–505, 2014.
- [30] JOHNSON, D. B. The dynamic source routing protocol for mobile ad hoc networks. *IETF Internet Draft*, <http://www.ietf.org/internetdrafts/draft-ietf-manet-dsr04.txt>, 2000.
- [31] AHMED, S.; KANERE, S. S. Skvr: Scalable knowledge-based routing architecture for public transport networks. In: ACM. *Proceedings of the 3rd international workshop on Vehicular ad hoc networks*. [S.l.], 2006. p. 92–93.
- [32] TORNELL, S. M.; CALAFATE, C. T.; CANO, J.-C.; MANZONI, P. Dtn protocols for vehicular networks: An application oriented overview. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, IEEE, v. 17, n. 2, p. 868–887, 2014.
- [33] LINDGREN, A.; DORIA, A.; SCHELÉN, O. Probabilistic routing in intermittently connected networks. In: *ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing, MobiHoc 2003: 01/06/2003-03/06/2003*. [S.l.: s.n.], 2003.
- [34] VAHDAT, A.; BECKER, D. Epidemic routing for partially connected ad hoc networks. Technical Report CS-200006, Duke University, 2000.
- [35] LEBRUN, J. *Opportunistic networking: Measurement and implementation*. [S.l.]: University of California, Davis, 2008.
- [36] STALIN, J.; RAJESH, R.; SELVI, S. S. A. M. A survey on topology and geography based routing protocols in vanets. *International Journal of Applied Engineering Research*, v. 13, n. 20, p. 14813–14822, 2018.
- [37] GOUDARZI, F.; ASGARI, H.; AL-RAWESHIDY, H. S. Traffic-aware vanet routing for city environments—a protocol based on ant colony optimization. *IEEE Systems Journal*, IEEE, v. 13, n. 1, p. 571–581, 2018.
- [38] MANSOOR, A. M.; SAREA, A. M.; SABRI, A. Q. M. Influence of intersections on the performance of position-based routing protocols for vanets. *World Journal of Entrepreneurship, Management and Sustainable Development*, Emerald Publishing Limited, 2018.

- [39] TAHA, H. H.; ALHASSAN, A. M. Performance evaluation of aodv, olsr and grp routing protocols in vehicular highway environment. In: IEEE. *2018 International Conference on Computer, Control, Electrical, and Electronics Engineering (ICCCEEE)*. [S.l.], 2018. p. 1–5.
- [40] BARMADA, B.; ALOBAIDI, N.; ARDEKANI, I.; RAMIREZ-PRADO, G.; SABAE, M. E. Evaluating vanet routing protocols for auckland area. In: IEEE. *2018 Eleventh International Conference on Mobile Computing and Ubiquitous Network (ICMU)*. [S.l.], 2018. p. 1–2.
- [41] NAIM, Z.; HOSSAIN, M. I. Performance analysis of aodv, dsdv and dsr in vehicular adhoc network (vanet). In: IEEE. *2019 International Conference on Robotics, Electrical and Signal Processing Techniques (ICREST)*. [S.l.], 2019. p. 17–22.
- [42] Khoza, E.; Tu, C.; Owolawi, P. A. An ant colony hybrid routing protocol for vanet. In: *2018 International Conference on Intelligent and Innovative Computing Applications (ICONIC)*. [S.l.: s.n.], 2018. p. 1–6. ISSN null.
- [43] TAHIRA, M.; ATHER, D.; SAXENA, A. K. Modeling and evaluation of heterogeneous networks for vanets. In: IEEE. *2018 International Conference on System Modeling & Advancement in Research Trends (SMART)*. [S.l.], 2018. p. 150–153.
- [44] ZHANG, W.; XIAO, X.; WANG, J.; LU, P. An improved aodv routing protocol based on social relationship mining for vanet. In: *Proceedings of the 4th International Conference on Communication and Information Processing*. [S.l.: s.n.], 2018. p. 217–221.
- [45] USHA, M.; RAMAKRISHNAN, B. A robust architecture of the olsr protocol for channel utilization and optimized transmission using minimal multi point relay selection in vanet. *Wireless Personal Communications*, Springer, v. 109, n. 1, p. 271–295, 2019.
- [46] FOUNDATION N.S. et al. Network Simulator ns-2. Disponível em <https://www.isi.edu/nsnam/ns/>. Acessado em 10/07/2020.
- [47] Sepulcre, M.; Gozalvez, J.; Coll-Perales, B.; Lucas-Estañ, M. C.; Gisbert, J. R. Empirical performance models for v2v communications. In: *2015 IEEE International Conference on Computer and Information Technology; Ubiquitous Computing and Communications; Dependable, Autonomic and Secure Computing; Pervasive Intelligence and Computing*. [S.l.: s.n.], 2015. p. 737–742.
- [48] KUNISCH, J.; PAMP, J. Wideband car-to-car radio channel measurements and model at 5.9 ghz. In: IEEE. *2008 IEEE 68th Vehicular Technology Conference*. [S.l.], 2008. p. 1–5.
- [49] JÚNIOR, J. G. R.; CAMPISTA, M. E. M.; COSTA, L. Opportunistic system for collaborative traffic monitoring using existing ieee 802.11 networks. In: *Intelligent Vehicular Networking: V2V/V2I Communications and Applications-IEEE International Conference on Communications-ICC*. [S.l.: s.n.], 2012. p. 7294–7298.
- [50] 3GPP. *Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Radio Resource Control (RRC); Protocol specification*. [S.l.], 04 2017. Version 14.2.2.

- [51] Naik, G.; Choudhury, B.; Park, J. Ieee 802.11bd 5g nr v2x: Evolution of radio access technologies for v2x communications. *IEEE Access*, v. 7, p. 70169–70184, 2019.
- [52] IEEE Guide for Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE) - Architecture. *IEEE Std 1609.0-2013*, p. 1–78, March 2014. ISSN null.
- [53] YOKOYAMA, R. S. *Estratégias de beaconing para comunicação em redes veiculares*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2014.
- [54] BALL, R.; DULAY, N. Enhancing traffic intersection control with intelligent objects. *Urban Internet of Things Towards Programmable Realtime Cities*, 2010.
- [55] KEYSIGHT Technologies. Disponível em <http://rfmw.em.keysight.com/>. Acessado em 14/06/2020.
- [56] GHANDOUR, A. J.; FELICE, M. D.; BONONI, L.; ARTAIL, H. Modeling and simulation of WAVE 1609.4-based multi-channel vehicular ad hoc networks. In: *Proceedings of the 5th International ICST Conference on Simulation Tools and Techniques*. [S.l.: s.n.], 2012. p. 148–156.
- [57] WEISS, T. A.; JONDRAL, F. K. Spectrum pooling: an innovative strategy for the enhancement of spectrum efficiency. *IEEE communications Magazine*, IEEE, v. 42, n. 3, p. S8–14, 2004.
- [58] BHATIA, D.; SHARMA, D. P. A comparative analysis of proactive, reactive and hybrid routing protocols over open source network simulator in mobile ad hoc network. *International Journal of Applied Engineering Research*, v. 11, n. 6, p. 3885–3896, 2016.
- [59] JHA, R. K.; KHARGA, P. A comparative performance analysis of routing protocols in manet using ns3 simulator. *International Journal of Computer Network and Information Security*, Modern Education and Computer Science Press, v. 7, n. 4, p. 62–68, 2015.
- [60] BILANDI, N.; VERMA, H. K. Comparative analysis of reactive, proactive and hybrid routing protocols in manet. *International Journal of Electronics and Computer Science Engineering*, v. 1, n. 3, p. 1660–1667, 2012.
- [61] AGARWAL, U.; SAXENA, M. Comparative and behavioral study of various routing protocols in vanet. In: *Proceedings of the International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering*. [S.l.: s.n.], 2013. v. 3.
- [62] CLAUSEN, T.; JACQUET, P.; ADJIH, C.; LAOUITI, A.; MINET, P.; MUHLETHALER, P.; QAYYUM, A.; VIENNOT, L. *Optimized Link State Routing Protocol (OLSR)*. 2003. Network Working Group. Disponível em: <<https://hal.inria.fr/inria-00471712>>.
- [63] PERKINS, C. E.; BHAGWAT, P. Highly dynamic destination-sequenced distance-vector routing (dsdv) for mobile computers. In: ACM. *ACM SIGCOMM computer communication review*. [S.l.], 1994. v. 24, p. 234–244.
- [64] AGUIAR, E.; BITTENCOURT, P.; MOREIRA, W.; ABELÉM, A. Estudo comparativo de protocolos de roteamento para redes mesh na região amazônica. *SBRC Belém*, 2007.

- [65] KUROSE, J. F.; ROSS, K. W.; ZUCCHI, W. L. *Redes de Computadores ea Internet: uma abordagem top-down*. [S.l.]: Pearson Addison Wesley, 2007.
- [66] NEVES, F.; CARDOTE, A.; MOREIRA, R.; SARGENTO, S. Real-world evaluation of iee 802.11p for vehicular networks. In: *Proceedings of the Eighth ACM International Workshop on Vehicular Inter-Networking*. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2011. (VANET '11), p. 89–90. ISBN 9781450308694. Disponível em: <<https://doi.org/10.1145/2030698.2030717>>.
- [67] CHIBA, J.; SUGIYAMA, K. Effects of trains on cutoff frequency and field in rectangular tunnel as waveguide. *IEEE Transactions on microwave theory and techniques*, IEEE, v. 30, n. 5, p. 757–759, 1982.
- [68] TUNEL. Disponível em <http://www.rio.rj.gov.br/dlstatic/10112/148014/DLFE-4266.pdf/tuneis.pdf>. Acessado em 18/11/2019.
- [69] OLIVEIRA, F. J. de. *Caracterização do canal de rádio veículo- infraestrutura na faixa de 5.8GHz*. 2019.
- [70] ISSARIYAKUL, T.; HOSSAIN, E. Introduction to network simulator 2 (ns2). In: *Introduction to network simulator NS2*. [S.l.]: Springer, 2009. p. 1–18.
- [71] ZENG, X.; BAGRODIA, R.; GERLA, M. Glomosim: a library for parallel simulation of large-scale wireless networks. In: IEEE. *Proceedings. Twelfth Workshop on Parallel and Distributed Simulation PADS'98 (Cat. No. 98TB100233)*. [S.l.], 1998. p. 154–161.
- [72] BAGRODIA, R.; MEYER, R.; TAKAI, M.; CHEN, Y.-a.; ZENG, X.; MARTIN, J.; SONG, H. Y. Parsec: A parallel simulation environment for complex systems. *Computer*, IEEE, v. 31, n. 10, p. 77–85, 1998.
- [73] WALSH, K.; SIRER, E. G. Simulation of large scale networks i: staged simulation for improving scale and performance of wireless network simulations. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE. *Proceedings of the 35th conference on Winter simulation: driving innovation*. [S.l.], 2003. p. 667–675.
- [74] BARR, R. Jist-java in simulation time user guide. <http://jist.ece.cornell.edu/docs/040319-jist-user.pdf>, 2003.
- [75] Riley. Large-scale network simulations with gtnets. In: *Proceedings of the 2003 Winter Simulation Conference, 2003*. [S.l.: s.n.], 2003. v. 1, p. 676–684 Vol.1. ISSN null.
- [76] OMNET++ Simulation Framework. Disponível em <https://omnetpp.org/>. Acessado em 10/07/2020.
- [77] KRAJZEWICZ, D.; ERDMANN, J.; BEHRISCH, M.; BIEKER, L. Recent development and applications of sumo-simulation of urban mobility. *International Journal On Advances in Systems and Measurements*, v. 5, n. 3&4, 2012.
- [78] FOUNDATION N.S. et al. Network Simulator ns-3. Disponível em <https://www.nsnam.org/doxygen>. Acessado em 19/09/2019.

-
- [79] Oliveira, F. J.; Castellanos, P. V. G.; Matos, L. J.; Meza, W. D. T.; Silva Mello, L. A. R. Channel characterization on vehicle to infrastructure scenarios in 5.8 ghz. In: *2018 IEEE MTT-S Latin America Microwave Conference (LAMC 2018)*. [S.l.: s.n.], 2018. p. 1–3.