



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E DE
TELECOMUNICAÇÕES

CARLOS PINTO ALVES

Análise de Desempenho de Algoritmos com
base em Topologia para Ambientes V2V por
Meio de Simulações

NITERÓI

2023

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E DE
TELECOMUNICAÇÕES

CARLOS PINTO ALVES

Análise de Desempenho de Algoritmos com base em Topologia para Ambientes V2V por Meio de Simulações

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.

Orientador:
TADEU NAGASHIMA FERREIRA

NITERÓI

2023

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Bibliotecas da UFF - SDC/UFF
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

S586t Silva Junior, José Lins da
Título do Trabalho: subtítulo do trabalho / José Lins da
Silva Junior; Orientador Sobrenome, orientador; Coorientador
Sobrenome, co-orientador. Niterói, 2017.
120 f.

Monografia (Especialização em Engenharia de Produção) -
Universidade Federal Fluminense, Laboratório de Tecnologia,
Gestão de Negócios e Meio Ambiente, Niterói, 2017.

1. Primeiro assunto. 2. Produção intelectual. I. Título
II. Sobrenome, Orientador, orientador. III. Sobrenome,
Coorientador, co-orientador. IV. Universidade Federal
Fluminense. Laboratório de Tecnologia, Gestão de Negócios e
Meio Ambiente.

CDD -

CARLOS PINTO ALVES

Análise de Desempenho de Algoritmos com base em Topologia para Ambientes V2V por
Meio de Simulações

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 XXX de 2023.

BANCA EXAMINADORA

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

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

Profa. Fernanda Gonçalves de Oliveira Passos, D.Sc. –
UATLA

Niterói

2023

À familia

Agradecimentos

A Deus, por me conceder força, saúde e sabedoria para seguir sempre em frente. Obrigado por ser a minha força e o meu guia em todos os momentos. À minha esposa que acreditou em mim, em minhas ações e sempre me incentivou a continuar sonhando em busca dos meus objetivos. Obrigado por não me permitir desistir nos momentos mais difíceis desta jornada. Aos meus familiares, pelo apoio e incentivo em todos os momentos da minha vida. Por acreditarem em mim, e não medirem esforços para a concretização dos meus sonhos. Aos meus pais que são inspiração, equilíbrio e porto seguro nos momentos de tribulação. Aos meus amigos que mesmo com a distância, sempre se fizeram presentes na minha vida e estarão sempre em meu coração. Aos professores Tadeu e Natália, por todos os conselhos, dedicação e principalmente paciência, durante a orientação no mestrado sempre me incentivaram e me apoiaram em cada passo. Agradeço a todos que participaram de forma direta ou indireta da minha formação profissional. Por fim, agradeço à UFF pela oportunidade de participar do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações (PPGEET) na contribuição do meu crescimento e aprendizado.

Resumo

Redes *Vehicle Ad Hoc Network* (VANET) têm grande potencial para fornecer aplicações de segurança e de entretenimento para *Intelligent Transport System* (ITS) e para melhorar a segurança do tráfego nas estradas. A comunicação *Vehicle to Vehicle* (V2V) é importante para o processo de automatização veicular e é utilizada em locais em que não há uma estrutura de *Road Side Units* (RSU) implementada. Dessa forma, esta dissertação analisa o comportamento de redes veiculares V2V com a utilização do protocolo de roteamento *Multi-Table Ad-Hoc On-Demand Distance Vector* (MT-AODV), que foi inicialmente desenvolvido para ambientes *Mobile Adhoc Network* (MANET) / *Wireless Body Area Networks* (WBAN). O protocolo MT-AODV é comparado com outros protocolos, como *Ad-Hoc On-Demand Distance Vector* (AODV) por ter sido a origem do MT-AODV e *Destination Sequenced Distance Vector* (DSDV) por ter comportamento proativo, que é oposto ao AODV. Foram evidenciadas as características que apontam um melhor desempenho e resiliência do protocolo MT-AODV em comparação com o AODV e DSDV, nos testes onde ocorreram falhas aleatórias em comparação ao teste onde não houve falhas. No experimento 5, onde houve um aumento na dificuldade de comunicação, com o acréscimo de falhas no ambiente, MT-AODV apresentou um resultado 38 % melhor que o AODV, em termos de perda de pacotes. Também foi identificada uma maior resiliência, mantendo mais estável a comunicação entre os veículos quando houve variação entre o ambiente sem falha e ambiente com falha. Na obtenção dos resultados, diferentes cenários, configurações e modelos de mobilidades foram utilizados. Os cenários gerados foram adicionados ao *Network Simulator geração 3* (NS-3), para então analisar o comportamento da rede e dos protocolos de roteamento por meio de métricas específicas.

Palavras-chave: VANET, V2V, MT-AODV, protocolos de roteamento, NS-3.

Abstract

Vehicular Ad Hoc Network (VANET) has a great potential to provide security and entertainment applications for ITS, and to improve road traffic safety. V2V communication is essential for the vehicular automation process and important for places where there is hardly any implemented RSU structure. Thus, this dissertation heads towards the study of the behavior of the vehicular network V2V using a routing protocol MT-AODV, which was initially developed for environments MANET / WBAN. The MT-AODV protocol is compared with other protocols, such as AODV for being the origin of MT-AODV and DSDV for having proactive behavior, which is opposite to acAODV. The characteristics that indicate better performance and resilience of the MT-AODV protocol in comparison to AODV and DSDV are highlighted, in tests where random failures occurred compared to the test where there was no failures. In experiment 5, where there was an increase in communication difficulty, with the increase in failures in the environment, MT-AODV presented a 38 % less packet loss than AODV. Greater resilience was also identified, keeping communication between vehicles more stable when there was a variation between the environment without failure and the environment with failure. To obtain the above results, different scenarios, configurations and models of manual mobilities were used. The generated scenarios were added to NS-3 to analyze the behavior of the network and routing protocols using specific metrics.

Keywords: VANET, V2V, MT-AODV, routing protocol, NS-3.

Lista de Figuras

2.1	Pilha de protocolos de comunicação <i>Wireless Access to Vehicular Environment</i> (WAVE) indicando o padrão que cobre cada conjunto de camadas. Os blocos marcados como gerenciador de recursos e serviços de segurança não se encaixam facilmente na estrutura em camadas do modelo <i>Open Systems Interconnection</i> (OSI). Imagem adaptada de [1].	11
2.2	Criação de tabelas de roteamento do protocolo MT-AODV. Adaptado de [2].	23
3.1	Classificação dos protocolos de roteamento VANET adaptado de [3].	34
4.1	Arquitetura de um nó de rede no NS-3, adaptado de [4].	37
4.2	Topologia da rede veicular para o teste de funcionalidades básicas.	44
4.3	Alcance máximo para os protocolos AODV e MT-AODV no experimento, extraídos de simulação no <i>NetAnim</i>	44
4.4	Rota definida pelo AODV durante o teste de funcionalidades básicas.	45
4.5	Diferentes rotas definidas pelo protocolo MT-AODV durante a simulação para o teste de funcionalidades básicas.	45
4.6	Resultado de <i>Packet Delivery Ratio</i> (PDR) no teste de funcionalidades básicas.	46
4.7	Resultado da perda de pacotes do teste de funcionalidades básicas.	46
4.8	Resultado da métrica <i>throughput</i> para o teste de funcionalidades básicas.	47
4.9	Resultado do <i>End-To-End Delay</i> (E2ED) no teste de funcionalidades básicas.	48
4.10	Localização das falhas durante as simulações do experimento 1.	49
4.11	Resultados da métrica <i>throughput</i> para as simulações do experimento 1.	50
4.12	Resultados da métrica PDR para a simulação do experimento 1.	51
4.13	Resultados da métrica <i>lost packet</i> para a simulação do experimento 1.	52

4.14	Resultados da métrica <i>hop count</i> para a simulação do experimento 1. . . .	53
4.15	Resultados da métrica carga de controle para a simulação do experimento 1.	54
4.16	Resultados da métrica <i>throughput</i> para o experimento 2.	56
4.17	Resultados da métrica PDR para a simulação do experimento 2.	57
4.18	Resultados da métrica <i>lost packet</i> para a simulação do experimento 2. . . .	58
4.19	Resultados da métrica <i>throughput</i> para a simulação do experimento 3 con- siderando <i>User Datagram Protocol</i> (UDP).	60
4.20	Resultados da métrica PDR para a simulação do experimento 3 conside- rando UDP.	61
4.21	Resultados da métrica <i>lost packet</i> para a simulação do experimento 3 con- siderando UDP.	62
4.22	Resultados da métrica <i>hop count</i> para a simulação do experimento 3 con- siderando UDP.	62
4.23	Resultados da métrica E2ED para a simulação do experimento 3 com UDP.	63
4.24	Resultados da métrica <i>throughput</i> para o experimento 3 usando <i>Transmission</i> <i>Control Protocol</i> (TCP).	64
4.25	Resultados da métrica PDR para a simulação do experimento 3 conside- rando TCP.	65
4.26	Resultados da métrica <i>lost packet</i> para o experimento 3 com TCP.	66
4.27	Resultados da métrica <i>hop count</i> para o experimento 3 com TCP.	66
4.28	Resultados da métrica E2ED para o experimento 3 com TCP.	67
4.29	Posição dos nós durante a simulação de 100 s.	69
4.30	Variação de algumas rotas criadas durante a simulação de 100 s.	69
4.31	Resultados da métrica <i>throughput</i> para a simulação do experimento 4 com 40 m.	70
4.32	Resultados da métrica PDR para a simulação do experimento 4 com 40 m.	71
4.33	Resultados da métrica carga de controle para a simulação do experimento 4 com 40 m.	72

4.34	Variação de algumas rotas criadas durante a simulação de 100 s para o experimento 4 com 20 m.	73
4.35	Variação de algumas rotas criadas durante a simulação de 100 s para o experimento 4 com 20 m.	74
4.36	Resultados da métrica <i>throughput</i> para a simulação do experimento 4 com 20 m.	75
4.37	Resultados da métrica PDR para a simulação do experimento 4 com 20 m.	76
4.38	Resultados da métrica HopCount para a simulação do experimento 4 com 20 m.	76
4.39	Resultados da métrica carga de controle para a simulação do experimento 4 com 20 m.	77
4.40	Posição dos nós com o passar do tempo da simulação do experimento 5.	78
4.41	Rotas criadas durante a simulação do experimento 5.	79
4.42	Resultados do <i>throughput</i> para a simulação do experimento 5.	79
4.43	Resultados do PDR para a simulação do experimento 5.	81
4.44	Resultados do E2ED para a simulação do experimento 5.	83
4.45	Quantidade de pacotes perdidos para o experimento 5.	84

Lista de Tabelas

2.1	Comparação entre as tecnologias WLAN.	16
3.1	Relação de trabalhos e protocolos utilizados com AODV.	35
4.1	Informações dos experimentos	42
4.2	Parâmetros de configuração no simulador para o teste de funcionalidades básicas.	43
4.3	Resultado de PDR para o teste de funcionalidades básicas.	46
4.4	Resultado de <i>lost packets</i> para o teste de funcionalidades básicas.	47
4.5	Resultado de <i>throughput</i> para o teste de funcionalidades básicas.	47
4.6	Resultado do E2ED para o teste de funcionalidades básicas.	48
4.7	Parâmetros de configuração para o experimento 1.	49
4.8	Resultados numéricos da métrica <i>throughput</i> para o experimento 1.	50
4.9	Resultados numéricos da métrica PDR para o experimento 1.	51
4.10	Resultados da quantidade média de pacotes perdidos da métrica <i>lost packet</i> para o experimento 1.	52
4.11	Resultados da quantidade de saltos da métrica <i>hop count</i> para o experimento 1.	53
4.12	Resultados numéricos da métrica carga de controle para o experimento 1.	54
4.13	Parâmetros de configuração para o experimento 2.	55
4.14	Resultados numéricos da métrica <i>throughput</i> para o experimento 2.	56
4.15	Resultados numéricos da métrica PDR para o experimento 2.	58
4.16	Resultados do experimento 2.	58
4.17	Parâmetros de configuração para o experimento 3.	59

4.18	Resultados numéricos da métrica <i>throughput</i> para o experimento 3, considerando o uso de UDP.	60
4.19	Resultados numéricos da métrica PDR para o experimento 3, considerando UDP.	61
4.20	Resultados numéricos da métrica E2ED para o experimento 3 com UDP. . .	63
4.21	Resultados numéricos da métrica <i>throughput</i> para o experimento 3, considerando TCP.	64
4.22	Resultados numéricos da métrica PDR para o experimento 3, considerando TCP.	65
4.23	Resultados numéricos da métrica E2ED para o experimento 3 com TCP. .	67
4.24	Parâmetros de configuração para o experimento 4 com 40 m.	68
4.25	Resultados numéricos da métrica <i>throughput</i> para o experimento 4 com 40 m.	70
4.26	Resultados numéricos da métrica PDR para o experimento 4 com 40 m. . .	71
4.27	Parâmetros de configuração para o experimento 4 com 20 m.	73
4.28	Resultados numéricos da métrica <i>throughput</i> para o experimento 4 com 20 m.	75
4.29	Parâmetros de configuração para o experimento 5.	78
4.30	Resultados numéricos da métrica <i>throughput</i> para o experimento 5 sem falhas.	80
4.31	Resultados numéricos da métrica <i>throughput</i> para o experimento 5 com falhas.	80
4.32	Resultados numéricos da métrica PDR para o experimento 5 sem falhas. .	82
4.33	Resultados numéricos da métrica PRD para o experimento 5 com falhas. .	82
4.34	Resultados numéricos da métrica E2ED para o experimento 5 sem falhas. .	83
4.35	Resultados numéricos da métrica E2ED para o experimento 5 com falhas. .	84
4.36	Quantidade de pacotes perdidos para o experimento 5 sem falhas.	85
4.37	Quantidade de pacotes perdidos para o experimento 5 com falhas.	85

Lista de Abreviaturas e Siglas

AODV	<i>Ad-Hoc On-Demand Distance Vector</i>	iv
APTS	<i>Advanced Public Transportation System</i>	30
ATIS	<i>Advanced Traveller Information System</i>	30
ATMS	<i>Advanced Traffic Management System</i>	30
BSM	<i>Basic Safety Message</i>	32
CALM	<i>Communication Access for Land Mobile</i>	13
CBR	<i>Constant Bit Rate</i>	43
CCH	<i>Control Channel</i>	17
CDP	<i>Content Discovery Protocol</i>	33
CLYMENE	<i>Centrality-based Caching Discovery Protocol for Vehicular Named-Data Networks</i>	33
CSMA/CA	<i>Carrier-sense Multiple Access with Collision Avoidance</i>	16
CVO	<i>Commercial Vehicle Operation</i>	30
DGPS	<i>Differential Global Positioning Systems</i>	15
DSDV	<i>Destination Sequenced Distance Vector</i>	iv
DSL	<i>Digital Subscriber Line</i>	12
DSR	<i>Dynamic Source Routing</i>	32
DSRC	<i>Dedicated Short-Range Communications</i>	8
E2ED	<i>End-To-End Delay</i>	vi
EDR	<i>Event Data Recorder</i>	7
ETPS	<i>Enabled Transportation Pricing System</i>	30
FCC	<i>Federal Communications Commission</i>	16
GNU GLP	<i>GNU General Public License</i>	36
GPS	<i>Global Positioning System</i>	7

GSM	<i>Global System for Mobile Communications</i>	15
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>	2
IP	<i>Internet Protocol</i>	13
IPv6	<i>Internet Protocol version 6</i>	10
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>	13
ITS	<i>Intelligent Transport System</i>	iv
LAN	<i>Local Area Network</i>	13
LTE	<i>Long Term Evolution</i>	7
MAC	<i>Medium Access Control Layer</i>	10
MANET	<i>Mobile Adhoc Network</i>	iv
MBWA	<i>Mobile Broadband Wireless Access</i>	13
MOVE	<i>Mobility Model Generator for Vehicular Networks</i>	9
MT-AODV	<i>Multi-Table Ad-Hoc On-Demand Distance Vector</i>	iv
NLR	<i>Normalized Routing Load</i>	31
NS-2	<i>Network Simulator geração 2</i>	9
NS-3	<i>Network Simulator geração 3</i>	iv
OBU	<i>On-Board Unit</i>	7
ODB-II	<i>On-Board Diagnostic</i>	31
OFDM	<i>Orthogonal frequency-division multiplexing</i>	16
OLSR	<i>Optimized Link State Routing Protocol</i>	18
OPNET	<i>Optimum Network Performance</i>	9
O-QPSK	<i>Offset Quadrature Phase Shift Keying</i>	14
OSI	<i>Open Systems Interconnection</i>	vi
OSM	<i>OpenStreetMap</i>	32
PAN	<i>Personal Area Network</i>	14
PERSEU	<i>Protocolo Geométrico para Descoberta de Cache em VNDN</i>	33
PDA	<i>Personal Digital Assistant</i>	6
PDR	<i>Packet Delivery Ratio</i>	vi
PHY	<i>Physical Layer</i>	16

QoS	<i>Quality of Service</i>	8
RIP	<i>Routing Information Protocol</i>	25
RM	<i>Resource Manager</i>	10
RSU	<i>Road Side Units</i>	iv
RERR	<i>Route Error</i>	21
RREP	<i>Route Reply</i>	21
RREQ	<i>Route Request</i>	21
SCH	<i>Service Channel</i>	17
SUMO	<i>Simulation of Urban MObility</i>	9
TCP	<i>Transmission Control Protocol</i>	vii
TIC	<i>Tecnologia de Informação e Comunicação</i>	1
UDP	<i>User Datagram Protocol</i>	vii
UMTS	<i>Universal Mobile Telecommunications System</i>	15
UWB	<i>Ultra Wide Band</i>	15
V2I	<i>Vehicle to Infrastructure</i>	8
V2V	<i>Vehicle to Vehicle</i>	iv
VADD	<i>Vehicle-Assisted Data Delivery</i>	19
VANET	<i>Vehicular Ad Hoc Network</i>	iv
VANETSim	<i>Vehicular Ad Hoc Network Simulator</i>	9
VHRP	<i>velocity-heading based routing protocol</i>	33
VoIP	<i>Voice over IP</i>	14
VNDN	<i>Vehicular Named-Data Networking</i>	33
WAVE	<i>Wireless Access to Vehicular Environment</i>	vi
WBAN	<i>Wireless Body Area Networks</i>	iv
Wi-Fi	<i>Wireless Fidelity</i>	2
WiMax	<i>Worldwide Interoperability for Microwave Access</i>	12
WLAN	<i>Wireless Local Area Network</i>	15
WMAN	<i>Wireless Metropolitan Area Network</i>	13
WMN	<i>Wireless Mesh Network</i>	2

WPAN	<i>Wireless Personal Area Network)</i>	15
WSMP	<i>Wave Short Message Protocol</i>	10
RREQ	<i>Route Request</i>	21
RERR	<i>Route Error</i>	21
RREP	<i>Route Reply</i>	21

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Motivação	3
1.2	Objetivo	4
1.3	Estrutura do trabalho	4
2	Redes Veiculares	5
2.1	Redes ad-hoc	5
2.2	MANET	6
2.3	VANET	7
2.3.1	Princípios básicos	8
2.3.2	Simulações de Redes com Mobilidade veicular	8
2.3.3	Protocolos de comunicação em VANETs	9
2.3.4	Tecnologias de comunicação em VANETs	11
2.4	Padrões IEEE para redes <i>wireless</i> e veiculares	15
2.5	Roteamento em VANETs	17
2.5.1	Roteamento baseado em topologia	18
2.5.2	Roteamentos baseados em posição	19
2.5.3	Roteamentos baseados em broadcast	19
2.5.4	Roteamento baseado em modelo geográfico	20
2.5.5	Roteamento baseado em <i>clusters</i>	20
2.6	Protocolos utilizados nas simulações	20
2.6.1	Protocolo AODV	21

2.6.2	Protocolo <i>MT-AODV</i>	22
2.6.3	Protocolo <i>DSDV</i>	25
2.7	Aplicações em segurança veicular	26
2.8	Demais aplicações	27
2.8.1	Controle e gerenciamento de tráfego	27
2.8.2	Conforto e entretenimento	27
3	Trabalhos Relacionados	29
3.1	Trabalhos sobre ITS	29
3.2	Trabalhos sobre segurança no trânsito	30
3.3	Trabalhos sobre simulações e protocolos	31
3.3.1	Trabalhos Relacionados a Roteamento para VANET	34
4	Experimentos e Resultados	36
4.1	Simulador e configurações	36
4.1.1	Aplicações	37
4.1.2	Canal de Comunicação	38
4.1.3	Dispositivos de Rede	38
4.1.4	Assistentes de Topologia	38
4.2	Métricas de avaliação	39
	<i>Packet Delivery Ratio (PDR):</i>	39
	<i>Throughput:</i>	39
	<i>End-to-End Delay (E2ED):</i>	39
	<i>Lost Packet:</i>	39
	<i>Hop Count:</i>	39
	<i>Carga de controle:</i>	40
4.3	Ambiente de Testes	40

4.4	Teste de funcionalidades básicas	43
4.5	Experimento 1: Com Falha em Nós	48
4.6	Experimento 2: Cenário do Exp. 1 usando TCP	54
4.7	Experimento 3: Variando o número de tabelas de roteamento para o MT-AODV	59
4.7.1	Experimento 3 com UDP	59
4.7.2	Experimento 3 com TCP	63
4.8	Experimento 4: Nós com movimento variável	67
4.8.1	Nós mantendo a proximidade de 40 m	67
4.8.2	Nós mantendo a proximidade de 20 m	72
4.9	Experimento 5: Incremento na quantidade de Nós	77
5	Conclusão	86
	Referências	89

Capítulo 1

Introdução

Em grandes cidades no mundo, congestionamentos de veículos são um problema constante. Muitas pesquisas têm sido realizadas para solucionar esse problema, e uma abordagem promissora é a da mobilidade inteligente [5]. A principal ideia da mobilidade inteligente é o uso de *Tecnologia de Informação e Comunicação* (TIC) para potencializar o uso da infraestrutura de trânsito das cidades. Muitas ações de mobilidade inteligente já estão em desenvolvimento no mercado, como semáforos inteligentes, e o desenvolvimento de redes veiculares VANETs [6]. Uma VANET visa garantir a condução segura, melhorando o fluxo de tráfego e, portanto, reduzindo significativamente os acidentes de carro. Isso é possível quando os veículos fornecem informações adequadas ao motorista ou ao veículo, por meio de sua conexão à VANETs.

Uma abordagem muito adotada para avaliar redes veiculares é através de simulações, porque possibilita a avaliação de novos protocolos e infraestruturas de forma flexível, ou seja, avaliar as novas ferramentas em vários cenários possíveis. Para que essas simulações possam obter um resultado confiável é necessário que o ambiente de simulação utilizado se aproxime de um ambiente real. Portanto, os parâmetros de rede, bem como o modelo de mobilidade, modelo de propagação, dentre outras, têm que representar a topologia de uma rede realista com alta fidelidade. Além dos parâmetros de rede terem que se aproximar dos parâmetros e comportamentos dos equipamentos reais, o modelo de mobilidade também deve representar a mobilidade do mundo real.

Redes ad-hoc veiculares são uma tecnologia que ainda apresentam muito potencial de desenvolvimento. Os primeiros estudos surgiram no início dos anos 2000, tendo evoluído a partir de pesquisadores trabalhando em redes ad-hoc sem fio [7]. V2V estava em desenvolvimento ativo pela *General Motors*, em 2006, que demonstrou o sistema usando veículos Cadillac [8]. Outras montadoras que trabalham no V2V incluem Toyota, BMW,

Daimler, Honda, Audi, Volvo e o consórcio de comunicação *Car-to-Car* [9].

Recentes avanços nas áreas de comunicação sem fio e de eletrônica embarcada têm habilitado o desenvolvimento de hardwares multifuncionais, com baixo custo e com um baixo consumo de energia [10]. Alguns trabalhos de pesquisa buscam tornar o consumo ainda mais eficiente, proporcionando uma maior robustez na aplicabilidade das redes sem fio em geral. Essas otimizações são aplicadas na melhoria de *hardware* e de *software*, visando a utilização adequada dos protocolos de comunicação e configuração de ambientes de rede, resultando em uma melhor utilização dos recursos computacionais. Em consequência desses avanços e com o grande crescimento das redes *Wireless Fidelity* (Wi-Fi), é proporcionada aos usuários uma maior portabilidade no acesso a dados e serviços em diversos locais. Isso motivou, na década de 2000, o desenvolvimento de tecnologias como redes *wireless* do tipo mesh. Além de prover o acesso a redes convencionais do tipo cabeada e acesso a serviços de Internet, essas redes também proporcionam a integração de outras redes como: redes celulares, rede de sensores sem fio e mesmo redes do tipo *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE) 802.11, IEEE 802.15 e IEEE 802.16 [11].

Em 2005, a então nova geração de redes *wireless* buscava fornecer os serviços já oferecidos pelas redes *wireless* da época, porém, com maior qualidade e eficiência. Essas funcionalidades são alcançadas através da tecnologia *Wireless Mesh Network* (WMN) [12]. Essa tecnologia representa uma rede dinâmica, autoconfigurável e autoorganizável, para que novos nós possam ser adicionados à rede de acordo com a necessidade, sem precisar de reconfiguração ou da intervenção de um administrador de rede. Os nós dessa rede criam e mantêm automaticamente a conectividade, através da múltipla conexão entre nós e vizinhos com o apoio dos *gateways* e *bridges*. Uma das diferenças entre WMN e redes ad-hoc, é que, uma rede ad-hoc não necessita de uma infra-estrutura fixa com a presença de *gateways* e de *bridges*. Uma WMN utiliza uma autoridade para gerenciar a rede com alguma infraestrutura, como roteadores sem fio fixos, estações-base ou pontos de acesso. Ambas oferecem a flexibilidade de saltos múltiplos. Uma das dificuldades em redes com essas características é o roteamento de pacotes de forma eficiente [13], pois a mobilidade e a aleatoriedade na topologia da rede criam desafios em representar a topologia nas tabelas de roteamento. Em consequência da interoperabilidade que essas redes proporcionam e dos benefícios proporcionados por essa tecnologia, há ramos de pesquisa que buscam utilizar melhor essas características, dentre as quais temos o desempenho dessas redes quanto aos protocolos de roteamento.

1.1 Motivação

A necessidade de trocas de informações fora dos ambientes interconectados através de redes cabeadas vem crescendo a cada dia, conforme os dispositivos estão sendo produzidos, com menor tamanho e maior poder de processamento. Cada um dos dispositivos usados pelos consumidores de informações pode ser considerado um nó formando uma rede ad-hoc sem infraestrutura onde o repasse da comunicação ocorre através dos próprios nós. Esses nós móveis realizam a troca de informações mesmo estando em movimento. A rede deve estar preparada para prover a mobilidade dos nós, que é garantida através dos próprios nós, visto que os nós se comunicam diretamente entre si, proporcionando dinamicamente configurações da rede, mas não eram dependentes de redes fixas cabeadas conectadas entre as redes *wireless*.

Um grande incentivo ao desenvolvimento das redes veiculares decorre da possibilidade de se aumentar a segurança no trânsito [14]. Geralmente, essas aplicações têm o objetivo de reduzir o número e a gravidade dos acidentes nas vias através da troca de informações entre os veículos [15]. Nessa classe, destacam-se aplicações que divulgam informações sobre as condições gerais de ruas e estradas. Tais informações podem ser exibidas ao motorista ou usadas para acionar algum sistema público de prevenção [15]. Para evitar acidentes de trânsito, que podem ser causados tanto por veículos desgovernados como por veículos lentos ou até mesmo parados, mensagens que informam a posição desses veículos podem ser disparadas periodicamente, avisando aos motoristas próximos sobre uma possível situação de risco. Em consequência do caráter de emergência das informações dessa classe, as aplicações envolvidas carecem de baixa latência na comunicação para serem efetivas [16]. Devido à granularidade de tal latência, o trabalho [17] propõe, como valores ideais, a latência de 100 ms a um raio de 150 m do acidente.

A possibilidade de se testar um novo protocolo de roteamento que permita com que a comunicação veicular sem infraestrutura V2V tenha maior resiliência a falhas em VANET conduz esta dissertação ao estudo de redes veiculares com a utilização do protocolo MT-AODV em diferentes cenários para avaliação de seu desempenho. O MT-AODV foi inicialmente desenvolvido para ambientes MANET e apresentou melhor desempenho em resiliência na comunicação entre dispositivos em modo ad-hoc.

1.2 Objetivo

O objetivo principal desta dissertação é analisar o comportamento de redes veiculares V2V com a utilização do protocolo de roteamento MT-AODV, que foi inicialmente desenvolvido para ambientes MANET e WBAN, e que, até onde sabemos, nunca havia sido simulado em ambientes veiculares. MT-AODV foi aqui aplicado em ambientes V2V de baixas ou médias velocidades.

Para isso, é proposto o uso do MT-AODV [2] em VANETs. O MT-AODV proposto é um protocolo de roteamento multicaminho gerenciado por múltiplas tabelas, e que aumenta a capacidade de ser mais resiliente à falhas sem aumentar a sobrecarga de mensagens de controle. Esse protocolo foi implementado e testado especificamente em WBANs. O funcionamento do MT-AODV é baseado no protocolo AODV, que é aprimorado para gerenciar rotas que permitam o encaminhamento dos pacotes de dados por mais de um caminho de mesmo custo. Como as mensagens originais do AODV são utilizadas, a compatibilidade retroativa é então mantida.

Desta forma, a análise de desempenho do protocolo MT-AODV traz resultados para evidenciar se a técnica de utilização de múltiplas tabelas de roteamento, que teve uma boa performance em ambiente WBAN também pode trazer benefícios no ambiente veicular, especificamente em V2V. Os diferentes cenários de testes permitirão fornecer orientações para o desenvolvimento futuro de protocolos de roteamento para redes veiculares.

1.3 Estrutura do trabalho

Esta dissertação está segmentada em 5 capítulos. A seguir, é apresentada a fundamentação teórica sobre redes VANETs, padrões correspondentes do IEEE e tipos de roteamento, como também as características dos protocolos propostos, as aplicações e, por fim, simulações sugeridas e métricas de avaliação. No capítulo 3, são apresentados trabalhos relacionados sobre ITS, segurança no trânsito e sobre simulações e protocolos. Em seguida, o capítulo 4 apresenta a avaliação dos resultados dos experimentos propostos para o trabalho. Por fim, o capítulo 5 conclui o trabalho, apresenta resumidamente quais foram os resultados obtidos na dissertação e sugere trabalhos futuros em continuidade a este.

Capítulo 2

Redes Veiculares

Neste capítulo, primeiramente é mostrado um panorama de conceitos básicos de redes ad-hoc, passando por MANET e VANET, onde serão abordados os princípios básicos de uma rede veicular, quais protocolos de comunicação são usados em VANET e outras características da tecnologia VANET. Em seguida, é abordado um padrão do IEEE apropriado para comunicações veiculares. Para roteamento em VANETs, são apresentados alguns modos de roteamento, como, por exemplo, o roteamento baseado em topologia, ou em posição. Em seguida são apresentados os protocolos de roteamento que serão utilizados neste trabalho. Em aplicações de segurança veicular, serão abordadas quais são as possibilidades de utilização da tecnologia VANET.

2.1 Redes ad-hoc

A noção mais difundida de uma rede ad-hoc móvel é a de uma rede formada sem uma administração central, que consiste em nós móveis que usam uma rede sem fio como interface para enviar dados. Como os nós em uma rede desse tipo podem servir como roteadores e *hosts*, esses nós podem encaminhar pacotes em nome de outros nós e executar aplicativos de usuário. Uma rede ad-hoc sem fio é uma coleção de nós sem fio que podem se autoorganizar dinamicamente em uma topologia arbitrária e temporária para formar uma rede sem necessariamente usar qualquer infraestrutura pré-existente. Essas características tornam as redes ad-hoc adequadas para atividades militares, em operações de emergência e em recuperação de desastres.

À medida em que os dispositivos eletrônicos estão ficando menores, mais baratos e mais poderosos, o mercado referente a sistemas móveis está crescendo rapidamente e a necessidade de pessoas e dispositivos conectados perfeitamente à Internet se torna obri-

gatória. As novas tecnologias de comunicações sem fio permitem uma fácil implantação de aplicativos comerciais para redes ad-hoc.

O projeto de uma rede ad-hoc deve levar em conta vários problemas devido a transmissões sem fio ruidosas, de alcance limitado e inseguras, além de restrições de mobilidade e energia. A topologia de uma rede ad-hoc muda frequentemente. Como os nós móveis movimentam-se arbitrariamente, com diferentes velocidades e, geralmente, não conseguem se comunicar diretamente, é preciso que as tabelas de roteamento sejam atualizadas de forma rápida o suficiente para retratar a topologia da rede o mais próximo possível do atual. As limitações de banda passante e energia para que rotas entre nós sejam descobertas e mantidas devem ser cuidadosamente controladas. Devido às suas peculiaridades, o roteamento em redes ad-hoc não é realizado de maneira eficiente quando são utilizados algoritmos de roteamento tradicionais de redes fisicamente conectadas [18].

2.2 MANET

MANETs são redes dinâmicas povoadas por estações móveis, que são geralmente *laptops*, *Personal Digital Assistants* (PDAs) ou telefones celulares. Esses dispositivos possuem interfaces de rede *bluetooth* e/ou IEEE 802.11 e se comunicam de forma descentralizada, sendo a mobilidade uma característica fundamental das MANETs [19]. Esses dispositivos são capazes de se comunicar diretamente de forma *peer-to-peer* e rotear mensagens através de nós intermediários. No entanto, a natureza da comunicação compartilhada sem fio e dispositivos móveis resulta em muitos desafios de roteamento que devem ser abordados antes de implantar uma MANET [20]. Existe uma ampla variedade de protocolos de roteamento para MANET, que são categorizados como proativos e reativos. Protocolos de roteamento proativos tendem a fornecer menor latência do que a dos protocolos com roteamento sob demanda. Embora os protocolos denominados reativos descubram rotas apenas quando eles são necessários, esses protocolos ainda podem gerar uma enorme quantidade de tráfego quando a rede muda com frequência [21].

Numa comparação entre VANETs e MANETs, o custo de produção de dispositivos VANET é mais caro que os de MANET, a variação da topologia em MANET é mais lenta que em VANET, o tempo de vida de um nó em VANET depende da localização do veículo enquanto, na MANET, isso depende da bateria e da densidade da rede em VANET ser maior que em MANET [22].

2.3 VANET

VANETs procuram conectar dispositivos contidos em veículos para criar serviços que são particularmente relevantes para um ambiente veicular. Os veículos nessa condição estão equipados com um dispositivo sem fio, como *On-Board Unit* (OBU), *Global Positioning System* (GPS), *Event Data Recorder* (EDR) e uma grande quantidade de sensores. Como uma VANET visa garantir a segurança de seus usuários na estrada, qualquer atraso na comunicação ou nível defeituoso de implementação pode afetar a vida das pessoas. Portanto, qualquer recurso fornecido por um protocolo de uma VANET deve ser devidamente testado e validado [7].

A comunicação V2Vs permite que os veículos troquem informações sobre suas velocidades, localizações e direções de deslocamento. A tecnologia por trás da comunicação V2V permite que os veículos transmitam e recebam mensagens em qualquer direção, criando uma “consciência” de 360 graus de outros veículos nas proximidades. Veículos equipados com software apropriado, ou com aplicativos de segurança, podem usar as mensagens dos veículos ao redor para determinar possíveis ameaças de colisão à medida que se desenvolvam. A tecnologia usada pode então empregar alertas visuais, táteis e sonoros, ou uma combinação desses alertas, para contactar os motoristas. Esses alertas permitem que os motoristas tomem medidas para evitar acidentes. Essas mensagens de comunicação V2V podem ter um alcance de mais de 300 m e podem detectar perigos obscurecidos pelo tráfego, terreno ou clima. A comunicação V2V estende e aprimora os sistemas de prevenção de colisões atualmente disponíveis que usam radares e câmeras para detectar ameaças de colisão [23].

Os veículos que podem usar V2V variam de carros e caminhões a ônibus e motocicletas. A fabricante Audi tem desenvolvido hardware e software em um veículo de teste para usar comunicação direta de veículo para bicicleta usando sinais de curto alcance que não dependem de uma rede celular e sinais *Long Term Evolution* (LTE) que usam torres de celular para identificar bicicletas na estrada. Os veículos podem ler seus arredores para identificar quando as bicicletas estão por perto, fazendo interface com o conjunto conectado e identificar bicicletas que possam estar obstruídas pela visão do motorista [24].

Uma VANET com base em ITS promete muitas melhorias em termos de segurança, gerenciamento de tráfego e entretenimento. Dentre essas três categorias principais, as aplicações de segurança são as mais importantes porque são projetadas para aumentar a segurança e salvar vidas. Assim, as aplicações de segurança podem ser classificadas como

aplicações em tempo real, que devem reagir a eventos, por exemplo, acidentes, dentro de um determinado período de tempo [25]. Para alcançar níveis de *Quality of Service* (QoS), diferentes camadas da pilha de protocolos VANET foram direcionadas [26].

2.3.1 Princípios básicos

VANETs englobam a comunicação sem fio entre veículos V2V e entre veículos e infraestrutura *Vehicle to Infrastructure* (V2I). A utilização de redes VANETs assumem a troca de informações de forma a tornar a condução de veículos de maneira segura e eficiente através das mensagens como a velocidade e a direção dos veículos, as condições da estrada e a presença de obstáculos na via e eventos inesperados. Essa troca de informações contribui para uma tomada de decisões dos condutores de modo que possa evitar acidentes. Alguns desafios necessitam ser superados para que as VANETs se tornem mais eficazes. A mobilidade é um deles, por causa da topologia de rede muito dinâmicas, isto é, em mudança constante. A variação de topologia pode ser um fator que dificulta a manutenção da conectividade entre os veículos e a estabilidade da rede.

As interferências no canal de comunicação é outro desafio. Essas interferências podem prejudicar a qualidade e a confiabilidade das transmissões. As interferências podem ser causadas por obstáculos físicos, oriundas de outros dispositivos sem fio e por variações no sinal causadas pela mobilidade dos veículos. Diante desses desafios, uma preocupação é a segurança das informações transmitidas. Garantir que apenas veículos autorizados possam acessar a rede e que as informações trocadas entre os veículos não sejam interceptadas e manipuladas por terceiros mal intencionados, além da privacidade dos usuários uma vez que a coleta e o uso de informações pessoais dos usuários de forma inadequada é ilegal. Tecnologias, como o IEEE 802.11p e o *Dedicated Short-Range Communications* (DSRC), são utilizadas para enfrentar os desafios das redes VANETs, pois permitem a comunicação sem fio em ambientes de alta mobilidade. O uso de protocolos e algoritmos de roteamento levam em conta o dinamismo da rede e a variação da topologia. Quanto à segurança, a utilização de técnicas de criptografia, de autenticação e de gerenciamento de chaves são meios para garantia de segurança das informações transmitidas [27].

2.3.2 Simulações de Redes com Mobilidade veicular

Existem três tipos de modelos de mobilidade em VANETs que são mais utilizados em simuladores de rede [6]: modelos macroscópicos que simulam alguns dos atributos gerais

da rede, tais como densidade, fluxo de tráfego e velocidade média. Modelos microscópicos são mais voltados para o comportamento individual dos veículos, tais como manobras de ultrapassagem, mudanças de faixa, e variações de velocidade dos veículos [6]. Também existem modelos mesoscópicos que descrevem fluxos de tráfego num nível intermediário de detalhes, onde parâmetros individuais podem ser modelados quando apresentam um significado macroscópico. O objetivo é se beneficiar de escalabilidade na abordagem macroscópica, mas ainda fornecendo uma modelagem detalhada que é próxima de modelos microscópicos.

Um exemplo de modelo de software que utiliza mobilidade microscópica é o *Simulation of Urban MObility* (SUMO) [28] que permite simular os tráfego de veículos em ambientes urbanos. O SUMO é amplamente utilizado para avaliar o desempenho de algoritmos de roteamento e protocolos de comunicação em VANETs. *Network Simulator geração 2* (NS-2) e NS-3 são simuladores que utilizam modelos microscópicos que permitem simular as interações entre veículos e a infraestrutura de rede. São úteis para se estudar a conectividade entre os veículos e para avaliar a qualidade de serviço da rede. Além desses simuladores que usam os modelos de mobilidade citados acima, existem outros, como o *Vehicular Ad Hoc Network Simulator* (VANETSim) [29], o *Mobility Model Generator for Vehicular Networks* (MOVE) e o *Optimum Network Performance* (OPNET) [30], que são utilizados para simular a mobilidade dos veículos em VANETs.

A modelagem de mobilidade em VANETs apresenta alguns desafios, como a necessidade de considerar a heterogeneidade dos veículos e a variabilidade da topologia da rede. Além disso, é importante considerar as particularidades das aplicações de VANETs ao se escolher um modelo de mobilidade apropriado para a aplicação em questão [27].

2.3.3 Protocolos de comunicação em VANETs

A comunicação numa rede VANET pode utilizar diversos protocolos de comunicação. Neste estudo, é utilizada a arquitetura WAVE [1], que é considerada de médio alcance. Conforme a Figura 2.1, podem-se observar as diversas camadas do modelo OSI.

A arquitetura WAVE suporta duas pilhas de protocolos, conforme mostrado na Figura 2.1. Na terminologia do modelo OSI, ambas as pilhas de protocolos usam as mesmas camadas física e de enlace de dados, e diferem entre si nas camadas de rede e transporte. Os padrões WAVE não especificam camadas de sessão, apresentação ou de aplicação. No entanto, são introduzidos dois elementos que não se encaixam dentro dos limites do modelo OSI: o gerenciador de recursos e os serviços de segurança. Esses dois elementos são

cobertos pelos padrões IEEE 1609.1 e IEEE 1609.2, respectivamente.

No padrão IEEE 1609.1 [31], há a definição de um aplicativo WAVE chamado *Resource Manager* (RM), cujo objetivo é dar para certos processos o acesso aos recursos de comunicação do sistema. RM está localizado em uma RSU ou em uma OBU e recebe solicitações de aplicativos que são executados em computadores que estão localizados remotamente.

No padrão IEEE 1609.2 [32], são encontrados serviços de segurança para as pilhas de protocolos WAVE e para aplicações. Mecanismos são fornecidos para autenticar mensagens de gerenciamento WAVE, e criptografar mensagens para um destinatário. Os serviços incluem criptografia usando uma chave pública. A confidencialidade, ou seja, criptografar uma mensagem para um destinatário específico, evita a interceptação ou alteração de uma mensagem. A autenticidade visa estabelecer a validade da transmissão, com o objetivo de que o destinatário possa comprovar a origem e autoria de um determinado documento. Integridade visa assegurar que um documento não teve seu conteúdo alterado após ter sido assinado. O sistema deve ser capaz de detectar alterações não-autorizadas no conteúdo, com o objetivo de que o destinatário verifique que os dados não foram modificados indevidamente.

A arquitetura WAVE suporta dois tipos de pilhas de protocolos, uma pilha TCP/IP com *Internet Protocol version 6* (IPv6) e uma pilha de protocolos proprietários conhecida como *Wave Short Message Protocol* (WSMP). A razão de ter duas pilhas é para acomodar comunicações de alta prioridade e sensíveis ao tempo, bem como trocas de mensagens mais tradicionais, como no caso do TCP e o UDP. WSMP permite que o aplicativo envie mensagens curtas para controlar diretamente certos parâmetros do recurso de rádio para maximizar a probabilidade que todas as partes envolvidas receberão o mensagens no tempo.

O padrão IEEE 802.11p [33] define as camadas físicas e de controle de acesso ao meio *Medium Access Control Layer* (MAC) para as redes veiculares. IEEE 802.11p é baseado no padrão IEEE 802.11a para redes locais. O padrão IEEE P1609.3 define os serviços das camadas de rede e de transporte. O padrão IEEE P1609.4 define a utilização de múltiplos canais pela arquitetura WAVE [33].

O plano de gerenciamento é responsável pela manutenção e configuração do sistema, enquanto o plano de dados é responsável pelos serviços de comunicação e envio dos dados produzidos pelas aplicações WAVE [33].

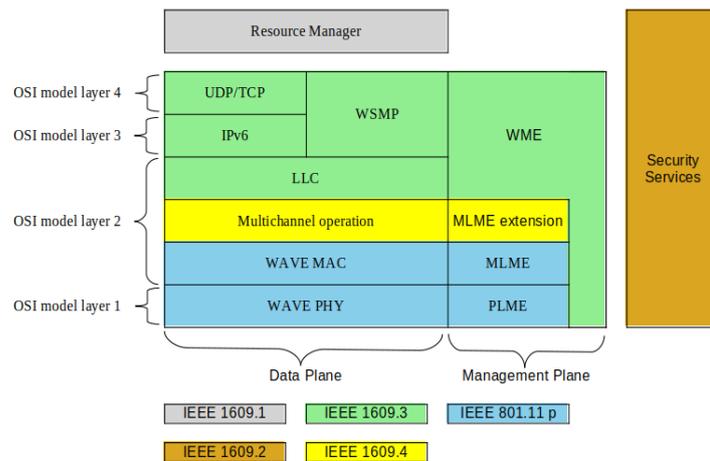


Figura 2.1: Pilha de protocolos de comunicação WAVE indicando o padrão que cobre cada conjunto de camadas. Os blocos marcados como gerenciador de recursos e serviços de segurança não se encaixam facilmente na estrutura em camadas do modelo OSI. Imagem adaptada de [1].

2.3.4 Tecnologias de comunicação em VANETs

Por serem redes sem fio formadas por veículos em movimento que podem se comunicar entre si ou com a infraestrutura de rede existente, as VANETs possuem algumas características distintas, como:

- **Alta Mobilidade:** uma VANET consiste em veículos em movimento, o que implica uma alta mobilidade de rede, devido ao movimento constante de veículos. Isso representa desafios significativos para uma comunicação confiável e eficiente entre os veículos e a infraestrutura de rede [34].
- **Mudanças rápidas na topologia de rede:** uma topologia na rede VANET está em constante mudança devido ao movimento dos veículos, exigindo uma adaptação ágil dos algoritmos de roteamento e dos protocolos de comunicação. Mudanças rápidas na topologia da rede podem causar diversos problemas, como perda de conectividade entre veículos e dificuldade na entrega de pacotes de dados [34].
- **Tamanho de rede ilimitado:** Uma VANET consiste em um grande número de veículos de comunicação, portanto o tamanho da rede é virtualmente ilimitado, embora seja praticamente limitada por conta da capacidade de processamento dos nós da rede, da capacidade de comunicação sem fio e da densidade de veículos. Com isso, sua limitação terá como referência a eficiência da rede, medida pela sobrecarga de controle de rede, latência e atraso e gerenciamento de recursos como potência de transmissão e largura de banda [34].

- Trocas regulares de informações: Os veículos em uma VANET geralmente trocam informações relevantes. Essas trocas regulares de informações são muito importantes na VANET, pois os dados relevantes devem ser transmitidos e trocados entre os veículos para melhorar a segurança, eficiência e conforto ao dirigir. O compartilhamento de informações em tempo real é essencial para fornecer alertas de tráfego, detectar condições perigosas nas estradas, evitar colisões e facilitar o gerenciamento do tráfego [34].

Para que uma comunicação veicular aconteça, diferentes tecnologias podem ser usadas e algumas delas são descritas abaixo com suas características.

1. De longo alcance:

- Sistema celular: O sistema celular usa ondas na faixa de rádio-frequências para transmitir dados a longas distâncias. Atualmente, um veículo pode ser relativamente integrado à Internet, devido a inúmeras iniciativas no setor automotivo, telecomunicações e indústria de eletrônicos de consumo. Existem soluções que conectam veículos à Internet através de infraestrutura de rede celular implantada e pode ser dividida em duas categorias, ou seja, trazida e incorporada, defendida por diferentes fabricantes de automóveis [35].
 - (a) Conectividade trazida: A opção trazida atende a usuários móveis 3G/4G que preferem amarrar seu próprio *smartphone* ao carro. A tecnologia de *tethering* mais popular, nomeadamente *MirrorLink* [36], é alimentada pelo consórcio de conectividade de carro, empresa automobilísticas e de tecnologia estão trabalhando juntos para criar uma conectividade de carro centrada no telefone solução.
 - (b) Conectividade embutida: A opção embutida integra um serviço celular ao sistema de infoentretenimento a bordo [37]. A conexão depende do módulo de celular embutido, em vez de telefones inteligentes de motoristas/passageiros. Por exemplo, através de comunicações celulares integradas, combinam-se vários elementos de aplicativos online, *driver* assistência, serviços de *call center* e soluções para fornecer conexão à Internet para dispositivos móveis no veículo.
- *Worldwide Interoperability for Microwave Access* (WiMax): Oferece conexão via rádio e pode ser utilizado para conexão banda larga móvel para vários dispositivos. É uma alternativa sem fio para conexões a cabo e *Digital Subscriber*

Line (DSL). WiMax consiste em dois padrões principais: IEEE 802.16d para estações fixas e IEEE 802.16e para nós móveis. O protocolo IEEE 802.16d oferece altas taxas de dados de 70 Mbits/s e uma faixa de cobertura de até 48 km [38]. A frequente quebra de caminho devido à mobilidade é tratada pela interface da camada física, incluindo problemas como latência de comunicação e interferência [37].

- *Mobile Broadband Wireless Access* (MBWA) (IEEE 802.20): O MBWA é uma opção *Wireless Metropolitan Area Network* (WMAN) otimizada para *Internet Protocol* (IP) sem fio em um veículo. O raio de cobertura pode chegar até 15 km e a frequência de operação varia de 0,5 GHz a 3,5 GHz. O padrão IEEE 802.20, que também é conhecido como MBWA, define as camadas de controle de acesso físico e ao meio para sistemas de comunicação de banda larga sem fio em movimento. MBWA opera abaixo da banda de 3,5 GHz e é otimizado para transportar pacotes IP atingindo taxas máximas de transferência por usuário acima de 1 Mbit/s. O seu principal trunfo é a sua capacidade de prevalecer sobre outras opções em áreas onde prevalece a necessidade de estabelecer comunicações em movimento, o que dá uma ideia da sua robustez e flexibilidade [39].
- Microondas: O padrão IEEE 802.15.4 prevê a transmissão de dados em até 16 Gbits/s em longa distância. Esse padrão fornece banda larga e suporta alta taxa de transmissão. É utilizado em sistemas de radar e em satélites. Além disso, é usado para construir redes sem fio *Local Area Network* (LAN) que abrange várias cidades. A principal limitação de transmissão em microondas é requerer uma linha de visada direta entre transmissor e receptor na comunicação [40].

2. De médio alcance:

- *Communication Access for Land Mobile* (CALM) é uma arquitetura que compreende um conjunto de padrões sob especificação dentro do Comitê Técnico 204, Grupo de Trabalho 16 da *International Organization for Standardization* (ISO). O escopo do CALM é prover uma arquitetura de comunicação que forneça um conjunto padronizado de protocolos e parâmetros de interface aérea. Essas interfaces têm a finalidade de permitir comunicação ITS de médio e longo alcance e alta velocidade, usando um ou mais dos vários meios de comunicação e protocolos de rede, permitindo conectividade transparente em

qualquer meio possível. Vários tipos de aplicativos e vários tipos de meios de comunicação são suportados simultaneamente [41].

3. De curto alcance:

- *Bluetooth*: É predominantemente usado para criar uma rede de área pessoal *Personal Area Network* (PAN). A tecnologia *Bluetooth* pode ser usada para suportar aplicativos V2V e V2I em comparação com outros padrões de Wi-Fi, pois requer baixa energia. Para esses casos, a comunicação V2V fica limitada aos veículos no raio próximo dos 10 metros e a comunicação V2I fica limitada à infraestrutura, semáforos inteligentes ou outro dispositivo inteligente também no raio de 10 metros. O *Bluetooth* não pode ser usado para construir aplicativos de segurança devido à baixa taxa de transferência, área de cobertura curta e vulnerabilidade a interferências aéreas. Não é adequado para aplicativos de entretenimento com uso intensivo de largura de banda, como *Voice over IP* (VoIP) e navegação na web [40].
- *ZigBee*: IEEE 802.15.4 usa a banda de 2,4 GHz sem licença para transferir dados a uma taxa de 250 kbits/s por até 70 m. Também são usadas bandas de frequência de 915 MHz nos EUA e de 868 MHz na Europa para suportar taxas de transmissão de dados de 40 kbits/s e 20 kbits/s, respectivamente. Essa tecnologia usa sinais de rádio de baixa potência para transferir dados por até 100 m usando a modulação *Offset Quadrature Phase Shift Keying* (O-QPSK) para redes de sensores. É mais simples e mais barato que os padrões Wi-Fi e *Bluetooth*. Além disso, pode suportar mais nós móveis simultaneamente e possui capacidade de autorrecuperação. Assim como o *Bluetooth*, o *Zigbee* pode ser usado para suportar aplicativos V2V e V2I. Em comunicações V2I, conexão fica limitada a um raio máximo de 100 metros. Não é adequado para aplicativos de entretenimento com uso intensivo de largura de banda, como VoIP, navegação na web [40].

O *Zigbee* tem muitas vantagens, incluindo baixo consumo de energia, confiabilidade, segurança e economia. A utilização do *Zigbee* em VANETs permite que as coordenadas de localização do veículo sejam estimadas por vários métodos. No entanto, as VANETs têm certas limitações de capacidade e problemas de complexidade e, tal como o *Zigbee*, requerem monitoramento e controle [42].

- *Infrared*: É outra técnica popular de acesso sem fio que usa luz fora da faixa visível para transferir dados. Opera na faixa de frequência entre 300 GHz e

400 THz. Esse amplo espectro é dividido em três sub-bandas: infravermelho próximo, infravermelho médio e infravermelho distante. Com base no tipo de sub-banda, pode transferir dados de 115 kbits/s a 4 Mbits/s. Como os sinais infravermelhos são afetados por obstáculos, é usado principalmente para comunicação de curto alcance. Embora use baixo consumo de energia, essa tecnologia suporta baixa taxa de dados em comparação com outros padrões, como *Bluetooth*. Essa técnica é capaz de transmitir informações de voz, dados e vídeo com mais segurança. Pode ser usado para oferecer suporte a aplicativos de segurança devido à sua capacidade de suportar alto tráfego de rede e grande largura de banda [40].

- *Ultra Wide Band* (UWB): Opera em uma banda de frequência não-licenciada, entre 3,1 GHz e 10,6 GHz, e pode suportar uma estação com mobilidade de 10 km/h. Permite operação de baixa potência, baixa dissipação de energia, robustez para desvanecimento de vários caminhos e taxas de transferência de até 480 Mbits/s. Assim como o *Bluetooth*, UWB tem um alcance de transmissão de 10 m. Numa VANET, pode ser usado para evitar colisões. Os padrões GPS e *Differential Global Positioning Systems* (DGPS) juntos foram usados para determinar a posição relativa de um veículo [40]. Pode coexistir com outros sinais de banda mais estreita (como *Global System for Mobile Communications* (GSM), *Universal Mobile Telecommunications System* (UMTS), GPS, dentre outros) causando muito pouca interferência. Além de fornecer uma alta taxa de dados com baixo custo e baixa complexidade, tem um alto potencial para fornecer uma comunicação entre veículos em movimento devido à sua grande vantagens, tais como sua imunidade ao desvanecimento em *multipath* severo causados por obstáculos existentes ao redor da estrada, como em edifícios e montanhas, sua baixa complexidade, custo e consumo de energia. Além disso, possui uma boa resolução no domínio do tempo permitindo para alcance e comunicação ao mesmo tempo [43].

2.4 Padrões IEEE para redes *wireless* e veiculares

IEEE é um instituto que visa compartilhar e integrar conhecimento na área de tecnologia da eletricidade e tecnologia da informação. Para redes *wireless*, o IEEE criou alguns padrões, tais como o *Wireless Personal Area Network* (WPAN) (802.15) e o *Wireless Local Area Network* (WLAN) (802.11). O Wi-Fi, que foi estabelecido pela norma IEEE

802.11, é um dos padrões mais utilizados mundialmente na criação de WLAN, devido ao seu baixo custo, alta taxa de transferência e fácil construção.

A maioria das redes Wi-Fi operam na faixa de frequência de 2,4 GHz, que é uma banda não-licenciada, o que as permitem ser redes com alta taxa de interferência. Consequentemente, não são adequadas para aplicações que exijam segurança. Embora os padrões com operação na faixa de frequência de 5 GHz possam dar suporte, alguns projetos de comunicação veicular usam essa tecnologia [44].

Tabela 2.1: Comparação entre as tecnologias WLAN.

Parâmetro	Frequência	Distância	Taxas
HomeRF	2,4 GHz	50 m	11 Mbits/s
802.11	2,4 GHz	250 m	1 Mbits/s - 2 Mbits/s
802.11a	5 GHz	8 a 25 m	6 Mbits/s - 54 Mbits/s
802.11b	2,4 GHz	15 a 100 m	5,5 Mbits/s - 11 Mbits/s
802.11g	2,4 GHz	50 m	5,5 Mbits/s - 54 Mbits/s

O padrão IEEE 802.11p foi finalizado em 2010 com o intuito de normalizar as características básicas da comunicação *wireless* em ambientes veiculares. Esse padrão foi baseado no IEEE 802.11a e possui diversas características em comum com esse outro padrão, como o uso de *Orthogonal frequency-division multiplexing* (OFDM). Além disso, vale ressaltar que o método de transmissão utilizado pelo 802.11p é o *Carrier-sense Multiple Access with Collision Avoidance* (CSMA/CA), que é comum a todos os padrões da família IEEE 802.11 [45].

IEEE 802.11p [46] é considerado o padrão de fato para implementar várias das aplicações de redes veiculares. Esse padrão inclui especificações da camada *Physical Layer* (PHY) e subcamada MAC, bem como protocolos de camada superior. IEEE 802.11p é essencialmente um padrão baseado em IEEE 802.11 adaptado para o ambiente sem fio com veículos. IEEE 802.11p herda várias das características como simplicidade e mecanismo de controle de acesso ao meio distribuído. Unidades de bordo de veículos OBU e unidades de beira de estrada RSU fixadas com infraestrutura de transporte, como sinais de trânsito, utilizam esse padrão.

Uma VANET combina comunicação sem fio, módulo de detecção no veículo e GPS para permitir uma variedade de aplicações em domínios de segurança rodoviária, eficiência de tráfego e entretenimento. As tecnologias atuais são baseadas no padrão global DSRC de comunicações dedicadas de curto alcance. Em 1999, a *Federal Communications Commission* (FCC) alocou 75 MHz de espectro na faixa de frequência de 5,850 GHz a 5,925 GHz. Nos EUA, a largura de banda total é dividida em sete canais de largura de

banda de 10 MHz principalmente de dois tipos, ou seja, *Control Channel* (CCH) e *Service Channel* (SCH), enquanto os 5 MHz restantes são dedicados como banda de guarda. O CCH é dedicado à transmissão de mensagens curtas e gerenciamento de comunicação para aplicações de segurança rodoviária, enquanto os SCHs são reservados para aplicações de eficiência de tráfego e infoentretenimento [47].

Para se ter uma ampla difusão das tecnologias citadas acima, como comunicação *wireless* e GPS, se torna importante criar uma padronização das camadas de rede dos protocolos utilizados. Para tanto, é desenvolvido um conjunto de protocolos juntamente com a arquitetura para os ambientes sem fio com a utilização de veículos. A arquitetura WAVE é composta por vários componentes, como o IEEE 802.11p, que é essencialmente um padrão baseado em IEEE 802.11 adaptado para o ambiente de rede veicular. A característica marcante da camada PHY é a diminuição da largura de banda do canal de 20 Hz para 10 Hz, em relação ao padrão 802.11a. Essa mudança reduz a taxa de dados que antes ficava entre 6 e 54 Mbits/s para valores entre 3 e 27 Mbits/s [47].

2.5 Roteamento em VANETs

Um protocolo de roteamento é um conjunto de regras que define como os pacotes de dados são encaminhados ao longo das rotas de uma rede. É determinada a melhor rota a ser utilizada com base em fatores como custo, velocidade e disponibilidade dos caminhos disponíveis. Essas regras são implementadas em cada nó intermediário da rede, permitindo que esses nós possam colaborar entre si para transmitir os pacotes de dados de maneira eficiente [48]. No contexto de redes ad-hoc, quando se trata de estabelecimento de rotas, os protocolos podem ser classificados como proativos ou reativos [49]. Nos protocolos proativos, todo nó da rede possui na sua tabela de roteamento as informações para todos os possíveis destinos. A grande vantagem desses protocolos é o fato dos pacotes poderem ser enviados com um atraso mínimo já que os nós conhecem previamente as rotas. Porém, é preciso que as redes possuam banda suficiente para evitar congestionamento e não possuam recursos escassos de energia, já que a troca de mensagens de roteamento é elevada para garantir o conhecimento de rotas válidas. Nos protocolos reativos, que também são conhecidos como protocolos de roteamento sob demanda, uma rota até um determinado destino será descoberta apenas quando requisitada e esta não constar na tabela de roteamento atual. A vantagem é uma menor quantidade de informação armazenada, e dependendo da rede pode haver menos troca de mensagens de controle [49].

2.5.1 Roteamento baseado em topologia

Um protocolo baseado em topologia depende da topologia da rede subjacente mantendo tabelas de roteamento para armazenar as informações do link e, com base nesses dados armazenados, encaminhar os pacotes dos veículos de origem para os veículos de destino. Com base nas informações de link armazenadas, esses protocolos de roteamento escolhem o caminho de roteamento para o destino. Antes de encaminhar os dados para o destino, é obrigatório pesquisar o caminho. Devido à alta mobilidade no cenário VANET, levando à recorrente quebra de rota, é necessário recalcular frequentemente a topologia. Por conta disso, o protocolo tem uma execução mais lenta do que qualquer outro tipo de protocolo de roteamento em VANET [34].

Podem-se classificar os protocolos de roteamento baseados em topologia da seguinte forma:

- Protocolos de roteamento proativo: Cada nó mantém uma tabela de roteamento representando a topologia, com cada registro na tabela representando o próximo nó de retransmissão em direção ao destino. Assim, a necessidade de descoberta de rota é simplificada, pois a rota de destino é sempre armazenada numa tabela. As tabelas de roteamento são atualizadas regularmente e trocadas entre os nós. Há duas maneiras de se atualizar uma tabela de roteamento: por atualização periódica e por atualização acionada. O tamanho da tabela cresce com um maior número de nós, levando a um aumento de carga. Independentemente das solicitações de comunicação, uma tabela composta pelo próximo salto de encaminhamento é mantida. Exemplos desse tipo de protocolo são o roteamento por DSDV e *Optimized Link State Routing Protocol* (OLSR). Uma vantagem é que não há necessidade de descoberta de rota e, para aplicativos de tempo real, a latência é baixa. Como desvantagens, há o desperdício de banda com armazenamento de caminhos ociosos, aumento da sobrecarga, pois as tabelas são trocadas regularmente, alta sobrecarga de roteamento e o requisito de armazenamento é alto.
- Protocolos de roteamento reativo ou *on demand*: Estabelece o caminho somente após o nó desejar se comunicar. Isso reduz substancialmente a carga na rede. Na fase de descoberta de rota, o protocolo descobre a rota inundando os pacotes na rede. Quando o pacote de consulta atinge o nó de destino, a resposta da informação de rota é revertida para a origem empregando comunicação *unicast*. Um exemplo desse tipo de protocolo é AODV. Algumas vantagens apresentadas incluem o fato

de que menos recursos são consumidos devido à inexistência de uma grande tabela de roteamento, a sobrecarga de roteamento é menor e economiza largura de banda por ser *beaconless*. As desvantagens compreendem um alto tempo de latência devido à busca de rotas, atraso na descoberta e manutenção de rotas e interrupção da comunicação dos nós devido ao excesso de inundação [49].

2.5.2 Roteamentos baseados em posição

É um tipo promissor de algoritmos para VANETs, pois suporta informações de posição geográfica de cada veículo para oferecer roteamento. É um tipo de roteamento que depende do GPS, e, por meio dele, cada nó conhece a sua posição, a dos vizinhos e o destino. Dessa forma, é capaz de calcular o melhor caminho para a localização do destino. Esse tipo de roteamento não mantém a tabela de roteamento, nem está envolvido em informações de estado com os vizinhos. O encaminhamento ambicioso é empregado no qual o nó de origem encaminha o pacote para seu nó vizinho imediato que está mais próximo do destino. Em cenários urbanos com obstáculos, o encaminhamento ganancioso não funciona bem. No entanto, esse algoritmo garante rotas estáveis nas rodovias. Alguns exemplos desse protocolo são os roteamentos com reconhecimento de conectividade, isto é, *Vehicle-Assisted Data Deliverys* (VADDs). Uma vantagem é que não há necessidade de descoberta e gerenciamento de rotas, o que é adequado para ambiente de alta mobilidade e escalabilidade [34].

2.5.3 Roteamentos baseados em broadcast

O roteamento baseado em *broadcast* é frequentemente empregado em VANETs para informar situações de emergência entre veículos. Essa técnica é usada quando a mensagem deve ser propagada para veículos muito distantes do alcance da transmissão. Um pacote é enviado para cada nó na rede empregando inundação. Há desperdício de largura de banda e o desempenho da transmissão é melhor em ambientes com um pequeno número de nós. Num *broadcasting* simples, o pacote é enviado para cada destino, levando a desperdício de largura de banda. No processo de inundação, ao receber a mensagem pela primeira vez, o veículo retransmite para todos que estão em seu contato, com exceção para aquele que o transmitiu. Uma maior largura de banda é consumida quando o algoritmo de roteamento ponto-a-ponto é empregado. O desempenho é melhor em cenários com pequeno número de nós, que receberão a mensagem em um tempo muito curto. Uma desvantagem é o alto consumo de largura de banda da rede, a duplicação de mensagens é muito alta,

resultando em congestionamento de rede e a aplicabilidade é restrita apenas a redes de rodovias simples [34].

2.5.4 Roteamento baseado em modelo geográfico

Com base na região de destino, esta classe de protocolos é dividida em dois tipos. O primeiro tipo é composto por protocolos que trabalham com a suposição de que a área de destino está próxima à da origem dos pacotes, enquanto o segundo tipo abrange protocolos desenvolvidos para roteamento para regiões de destino distantes, utilizando inundação e *unicast*. Com a primeira subcategoria, a mensagem é transmitida para a área de destino por todos os veículos na região de encaminhamento. No segundo tipo, um caminho na região é encontrado para enviar a mensagem para a área de destino. O congestionamento e a sobrecarga são menores em *unicast* [34].

2.5.5 Roteamento baseado em *clusters*

Esse tipo de roteamento depende da localização e do escopo dos *clusters*. Vários *clusters* separados na rede são formados pelo protocolo em um estilo disperso. A mobilidade dos veículos determina a arquitetura do *cluster*. Assim, a construção do *cluster* é baseada em métricas de mobilidade para manter a estabilidade do *cluster*, reduzindo assim sua dependência da topologia [34].

2.6 Protocolos utilizados nas simulações

Os protocolos AODV, MT-AODV e DSDV são simulados neste trabalho visando mostrar uma comparação na análise de métricas de desempenho para avaliar a eficácia de cada um. Serão demonstrados aspectos como a taxa de transferência, o tempo de resposta e o consumo de recursos da rede para determinar qual é o mais adequado para determinada situação. O protocolo MT-AODV é proposto pela possibilidade de trazer um novo protocolo de roteamento para ser avaliado, que permita com que a comunicação veicular sem infraestrutura V2V tenha maior resiliência a falhas em VANET. O protocolo AODV é comparado, por se tratar do protocolo que deu origem ao MT-AODV e o DSDV é inserido na comparação com o objetivo de se verificar e comparar um protocolo de característica diferente, proativo, dos outros dois que trabalham de forma reativa.

2.6.1 Protocolo AODV

O protocolo AODV foi criado para ser utilizado em redes ad-hoc, isto é, sem a intervenção necessária de qualquer ponto de acesso centralizado ou infraestrutura existente [50]. AODV opera com base no princípio de roteamento sob demanda, ou seja, o roteamento é ativado apenas quando for necessário. O algoritmo de funcionamento AODV é composto por etapas bem definidas. Quando um nó em uma rede veicular deseja enviar um pacote para um destino, inicia-se um processo de descoberta de rota. De acordo com [51], o protocolo AODV utiliza mensagens de controle denominadas *Route Request* (RREQ) e *Route Reply* (RREP) ao estabelecer e manter as rotas dinamicamente, respectivamente. Esse processo envolve a transmissão da mensagem de roteamento RREQ por todos os nós vizinhos ao nó de origem. Quando o nó de destino recebe o RREQ, é enviada de volta uma mensagem de roteamento RREP, contendo informações sobre a rota para o nó de origem. Todos os nós intermediários entre o nó de origem e o nó de destino armazenam informações sobre a rota para que possam direcionar os pacotes de forma adequada. No entanto, essas informações são armazenadas apenas temporariamente, pois as rotas são válidas apenas enquanto os nós envolvidos estão ativos e o pacote está sendo transferido. A atualização periódica das rotas é realizada através de mensagens de controle, como o *HELLO*. Além disso, o AODV permite o uso de *Route Error* (RERR) e mensagens de RREP, se for necessário, para tratar de casos de rota inválida ou inexistente. Em comparação com outros protocolos de roteamento em redes ad-hoc, o protocolo AODV possui algumas características técnicas distintas. De acordo com [52], uma das principais diferenças é o uso de um campo de sequência no RREQ, que permite a seleção de rotas mais recentes e evita problemas de *looping*. Além disso, o AODV emprega o conceito de rotas ativas e rotas passivas, reduzindo a sobrecarga de controle em cenários com alta mobilidade.

O AODV é considerado um protocolo de referência em redes veiculares pelos seguintes motivos:

- **Eficiência:** AODV é um protocolo de roteamento reativo, o que significa que apenas cria rotas quando for necessário. Isso reduz a sobrecarga na rede, tornando o AODV uma opção atraente para redes veiculares [53].
- **Mobilidade:** As redes veiculares são caracterizadas por alta mobilidade, o que significa que os veículos podem se mover rapidamente e em diferentes direções. O AODV é capaz de lidar com essa mobilidade, com ajustes nas rotas conforme necessário [54].

- Escalabilidade: Redes veiculares podem ser muito grandes e complexas, o que pode afetar a escalabilidade dos protocolos de roteamento utilizados. AODV foi projetado para lidar com redes de grande escala, tornando-o uma opção escalável para redes veiculares [55].
- Adaptação à topologia da rede: As redes veiculares podem ter topologias complexas e em constante mudança. AODV é capaz de se adaptar a essas mudanças e criar rotas eficientes, mesmo em redes dinâmicas [56].
- Segurança: As redes veiculares podem ser vulneráveis a ataques, como *spoofing* de endereço ou de rota. AODV inclui medidas de segurança, como a autenticação de mensagens, para mitigar esses tipos de ameaças [56].

2.6.2 Protocolo *MT-AODV*

MT-AODV foi proposto originalmente para encaminhar pacotes em MANETs utilizados para monitorar indicadores de saúde de soldados durante operações militares [2]. As rotas encontradas pelo MT-AODV são armazenadas em diversas tabelas de roteamento, gerenciadas pelo próprio protocolo. Dessa forma, rotas distintas para um mesmo destino são mantidas em tabelas de roteamento diferentes. As tabelas são criadas sob demanda à medida em que uma nova rota precise ser inserida. Para os nós intermediários, as rotas para o nó transmissor são criadas a partir do recebimento da mensagem RREQ. No exemplo da Figura 2.2, o nó S transmite os dados para o Z pelos nós A e B, sendo esse tráfego dividido igualmente pelas duas rotas. Isso ocorre porque nas tabelas de roteamento de S, o nó Z pode ser alcançado com 2 saltos pelo *gateway* A (Tabela 1) e também com 2 saltos pelo *gateway* B (Tabela 2). Essas duas rotas são consideradas rotas principais por possuírem o menor número de saltos até o destino. Apesar da Tabela 3 também possuir uma rota para o nó Z, essa rota precisa de 3 saltos para alcançar o destino. Por isso, essa rota será usada apenas caso as duas rotas principais fiquem indisponíveis. Assim, essa terceira rota opera como rota de salvaguarda ou rota backup.

Do ponto de vista de gerenciamento, a característica do destino estar presente apenas uma vez em cada tabela simplifica a colocação de uma limitação de tabelas, pois não é preciso administrar a quantidade de rotas para cada destino. Originalmente, a proposta das múltiplas tabelas foi a de minimizar as alterações no protocolo original, com o objetivo de manter a compatibilidade com versões anteriores [57].

A evolução do MT-AODV é fundamentada em particularidades dos cenários que o

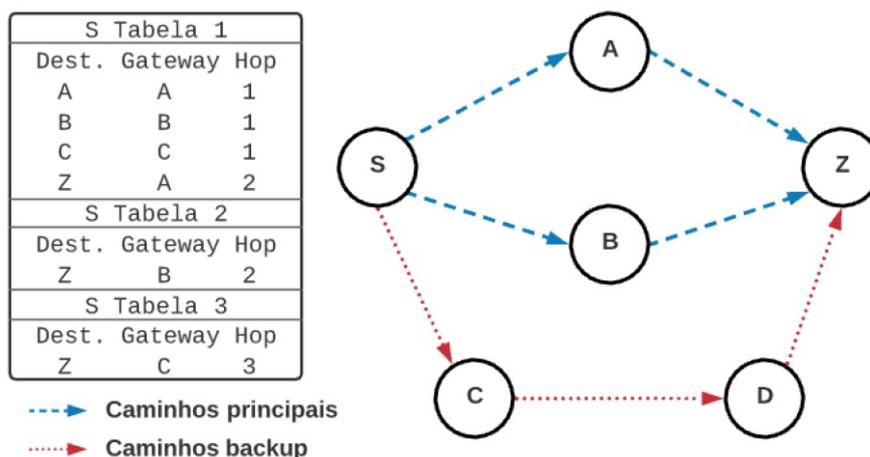


Figura 2.2: Criação de tabelas de roteamento do protocolo MT-AODV. Adaptado de [2].

protocolo deve abranger. Por isso, são levados em conta alguns elementos como disponibilidade de rota, distribuição de tráfego, excesso de mensagens de controle, limitação de rotas e tabelas e atraso total [2].

- Com relação a disponibilidade de rota, o objetivo é aumentar o acesso de uma rota, pois ao armazenar mais rotas nas tabelas de roteamento, o efeito da interrupção de uma rota por qualquer motivo pode ser minimizado pelo uso de outras rotas disponíveis e registradas nas tabelas. Dessa forma, a acessibilidade de rotas é ampliada no MT-AODV em relação ao AODV. Além disso, evita-se um novo cálculo para descoberta de rota, o que contribui para a redução da latência fim-a-fim [2].
- Na distribuição de tráfego, o MT-AODV resulta em uma carga de dados mais distribuída quando comparada à do protocolo AODV. Isso ocorre devido à utilização de múltiplas rotas para o nó de destino. Com isso, a probabilidade de gargalos e de congestionamentos na rede é diminuída [2].
- A cada interrupção de conexão durante a transmissão, é preciso recalculas as rotas até o destino. Portanto, o MT-AODV tem como requisito não aumentar a média de mensagens de controle necessárias para a rede funcionar. MT-AODV pode diminuir o envio de mensagens RREQ se o nó tiver outra rota disponível. No entanto, se houver uma falha na rota após um nó intermediário, todos os *gateways* para o nó transmissor receberão uma mensagem RERR informando que a rota não está mais disponível. Assim, em termos de mensagens de controle, o MT-AODV reduz a quantidade de mensagens RREQ e aumenta o número de mensagens RERR. Contudo, as mensagens RREQ são enviadas por *broadcast*, enquanto as mensagens RERR são

unicast. Devido à essa diferença, as mensagens de solicitação superam as mensagens de erro quando ocorre uma falha na conexão. Portanto, pode-se dizer que o MT-AODV reduz a sobrecarga de mensagens de controle em relação ao protocolo original [2].

- Ao se limitar o número de tabelas criadas, pode-se decidir a quantidade de rotas desejadas. A escolha deve estar de acordo com a quantidade de nós na rede. No caso de uma rota nova descoberta, o protocolo avalia se atualiza uma de suas rotas ou a descarta [2].
- A latência fim-a-fim é calculada de três modos distintos. Primeiramente, caso haja uma falha de rota, e exista outra rota registrada em alguma outra tabela, o protocolo MT-AODV reduz o tempo de descoberta de rota, que potencialmente leva à redução da latência fim-a-fim. Essa redução pode não ocorrer caso a nova rota utilizada tenha um elevado atraso. Além disso, os pacotes são encaminhados por múltiplos caminhos. Por utilizar os caminhos de menor número de saltos, a latência nessa comunicação por múltiplos caminhos é medida pela média da latência de cada caminho, ou, no pior caso, pela maior latência. A tendência é reduzir a latência fim-a-fim, devido às múltiplas rotas usadas. Por fim, a terceira influência está na escolha da rota. O MT-AODV precisa analisar as rotas antes de encaminhar os pacotes, e essa análise necessita de um tempo de processamento. Assim, o tempo para escolher a rota gera um acréscimo na latência fim-a-fim [2].

Assim como o AODV, o MT-AODV é um protocolo de múltiplos saltos que utiliza os métodos de descoberta de rotas e manutenção de rotas, contudo, o MT-AODV consegue manter mais de uma rota para o destino. Isso é possível por meio da criação de diferentes tabelas durante a descoberta de rotas para um mesmo destino. As tabelas de roteamento em cada nó são construídas a partir da troca de mensagens enviadas via UDP pela porta 654.

Como será visto, o protocolo MT-AODV dá melhores resultados ao se trabalhar em redes VANET que o AODV em relação à distribuição de tráfego, pois a transferência de dados no MT-AODV resulta em uma carga mais distribuída em comparação com o protocolo AODV. Isso se deve ao uso de várias rotas para o nó de destino, o que reduz os gargalos de congestionamento da rede. Outro fator de importância é que o torna diferente e vantajoso para operar em redes VANET é a redução na sobrecarga de mensagem de controle, pois o MT-AODV pode reduzir o envio de mensagens RREQ, quando um link é interrompido, caso possua outra rota disponível. No entanto, se a rota para um nó

intermediário perder o link, todos os *gateways* para o nó remetente receberão mensagens RERR indicando que a rota não está mais disponível. Portanto, do ponto de vista da mensagem de controle, o MT-AODV reduz o número de mensagens RREQ e aumenta o número de mensagens RERR. No entanto, as mensagens RREQ são enviadas no modo *broadcast*, enquanto as mensagens RERR são *unicast*.

2.6.3 Protocolo DSDV

O DSDV é um protocolo proativo adaptado do *Routing Information Protocol* (RIP) para o cenário de redes ad-hoc onde a topologia está em constante mudança. Adiciona um atributo chamado número de sequência (*sequence numbering*) para cada entrada da tabela de roteamento convencional do RIP. Um *sequence numbering* é utilizado para comparar as informações recebidas sobre a rede e distinguir informações obsoletas das novas e, assim, evitar problemas na rede como formação de *loops*. Na operação de *damping*, cada nó deve anunciar sua tabela de roteamento para seus vizinhos atuais por *broadcasting*. Os nós vizinhos sabem que há alterações na rede pelo *damping*. As atualizações de roteamento são enviadas de duas maneiras: ou pelo despejo completo ou pelo incremental. No despejo completo, a tabela completa é enviada aos vizinhos, e, no despejo incremental, somente as entradas são enviadas aos vizinhos [53].

Para a seleção de rotas, quando um roteador recebe novas informações, é usado o número de sequência mais recente. Se o número de sequência for o mesmo que o da tabela, a rota com a melhor métrica será usada. As entradas obsoletas são aquelas que não são atualizadas há um tempo. Essas entradas, bem como as rotas que usam esses nós como próximos saltos, são excluídas.

Uma das vantagens do DSDV é que a disponibilidade de caminhos para todos os destinos na rede resulta em um menor atraso no processo de configuração do caminho. O método de atualização incremental com etiquetas de número de sequência marca os protocolos de rede com fio existentes adaptáveis às redes sem fio Ad-hoc. Porém o DSDV requer atualizações regulares de suas tabelas de roteamento, que consomem energia da bateria e uma pequena quantidade de largura de banda, mesmo quando a rede está ociosa. Sempre que a topologia da rede é alterada, é necessário um novo número de sequência antes da convergência da rede. Por conta disso, o DSDV não é adequado para redes altamente dinâmicas ou em larga escala [58].

2.7 Aplicações em segurança veicular

Essas aplicações são usadas para evitar o risco de acidentes em rodoviárias através da distribuição de informação sobre perigos e obstáculos. Aplicações de segurança podem desempenhar um papel importante para evitar acidentes ou para minimizar o impacto dos acidentes. Essas aplicações exigem limites estritos de atraso de tempo, pois uma fração de segundo pode ser importante na tomada de decisão. Assim, a exigência de prazo rígido imposta pelas aplicações de segurança requerem tratamento especial nas camadas inferiores. Não há muito roteamento envolvido em aplicações de segurança, porque o público-alvo das mensagens geralmente está na vizinhança. Portanto, as mensagens não precisam ser enviados para nós a mais de um salto de distância [59].

Dentre alguns exemplos de aplicações de segurança, podem ser mencionados os seguintes:

- Alerta de violação de sinal de tráfego: Através dessa aplicação, o condutor é alertado caso algum outro veículo viole o sinal de tráfego de forma a evitar que uma possível colisão ocorra, além de informar ao próprio condutor infrator o risco de cometer alguma infração de trânsito;
- Alerta de mudança de direção/faixa: Esta aplicação tem como função alertar o condutor da situação dos demais veículos presentes no ambiente, enviando um aviso caso um veículo à frente faça alguma mudança de direção ou uma parada brusca;
- Alerta de ponto cego: É comum, em algumas situações, o condutor ter sua visibilidade reduzida devido a pontos cegos que não são cobertos pelos espelhos do veículo. Essa é uma situação de risco durante ultrapassagens e em conversões de faixa ou de rua;
- Alerta de aproximação de veículos de emergência: Os condutores podem ser alertados sobre a presença de veículos de emergências, tais como ambulâncias, caminhões de bombeiro e carros de polícia, antes mesmo que eles estejam em seu campo de visão, de forma a desobstruir a estrada e esses veículos tenham sua passagem facilitada em função de sua maior prioridade no tráfego;
- Solicitação de serviços de ajuda: Em caso de algum acidente ou avaria do veículo, é possível que o condutor solicite ajuda através desta aplicação;
- Alerta de região: Uma cidade pode ser mapeada na forma de zonas de tráfego, em que, dependendo do perímetro de abrangência, há restrições a serem atendidas. Por

meio dessa aplicação, o condutor recebe alertas sobre as restrições da zona que está a transitar. Por exemplo, em zona escolar ou zona de cruzamento de animais, e também condições da via, de forma a aumentar sua atenção;

- Alerta de velocidade apropriada: Esta aplicação visa alertar o condutor sobre a velocidade permitida da via, e condução inapropriada de forma a mitigar possíveis acidentes.

2.8 Demais aplicações

Embora um dos objetivos da VANET seja fornecer segurança no trânsito, outras aplicações também estão sendo consideradas para aumentar a presença no mercado, como eficiência de tráfego, controle e alguns aplicativos de entretenimento. Essas aplicações estão voltadas a proporcionar ao condutor e a demais passageiros maior conforto e interatividade, assim como permitir que a infraestrutura da via colete informações para melhor gestão do tráfego. São divididas em duas categorias: aplicações de controle e gerenciamento de tráfego e aplicações de conforto e entretenimento [59].

2.8.1 Controle e gerenciamento de tráfego

Nessa categoria estão contidas aplicações sobre congestionamento de rodovia, informação sobre o clima, disponibilidade de estacionamento, navegação e condição da rodovia, como, por exemplo:

- Coleta de informações da condição do tráfego: Uma vez que veículos e infraestrutura trocam informações em tempo real, a quantidade e a confiabilidade dessas informações aumentam de modo a permitir que de forma cooperativa se proporcione uma melhoria na gestão do sistema de tráfego [60].

2.8.2 Conforto e entretenimento

São aplicações voltadas para uso de Internet, jogos, blogs, download de músicas, compartilhamento de arquivos, *video-on-demand*, postos de combustível, informação turística e restaurantes. Dentre as aplicações, destacam-se:

- Notificação de pontos de interesse: A comunicação veicular também pode ser utilizada em propagandas comerciais como anúncios de serviços regionais, restaurantes,

bares, mercados, dentre outras. Assim como também são utilizadas para localizar possíveis pontos de interesse particular.

- Informações de navegação: Uma aplicação de navegação visa auxiliar o condutor a chegar a um determinado destino. Numa rede veicular, esse tipo de aplicação se torna muito mais precisa, uma vez que a infraestrutura se comunica com o veículo a todo o momento. Isso permite correções ao sistema de localização via GPS em tempo real [60].

Capítulo 3

Trabalhos Relacionados

Neste capítulo são descritos brevemente os trabalhos e pesquisas encontradas quanto à ITS, sobre segurança no trânsito, trabalhos sobre simulações e protocolos e trabalhos relacionados à roteamento para VANET. Todos esses tópicos estão relacionados à proposta desta dissertação.

3.1 Trabalhos sobre ITS

Na literatura sobre V2V, é possível encontrar trabalhos que apontam ITSs como soluções para reduzir acidentes de trânsito e que serão citados abaixo para uma melhor compreensão da área de pesquisa. As redes veiculares surgem como um componente do ITS provendo a comunicação cooperativa entre veículos e com a infraestrutura cooperando para melhoria do fluxo de veículos nas grandes cidades. Dessa forma, a relação do ITS com o trabalho está diretamente ligada à segurança na comunicação veicular e na análise da melhora de desempenho da comunicação com a utilização de um protocolo de roteamento, MT-AODV, que é mais resiliente a falhas.

Em [61], são apresentadas várias tecnologias ITSs emergentes que podem aumentar a segurança dos veículos. Dentre eles, há o sistema avançado de assistência ao motorista, sistema de monitoramento do motorista, aviso de colisão e sistema de prevenção, manutenção de faixa e aviso de mudança de faixa, sistema de aumento de visibilidade e sistema de lembrete de cinto de segurança.

No trabalho de [62], o autor escreve sobre ITS e aborda uma nova geração de Sistemas de Transporte Inteligentes que deverá ser lançada para satisfazer a exigência do rápido desenvolvimento do transporte na China. Em seguida, comenta sobre a história do de-

envolvimento de ITS e sobre um dos primeiros centros de pesquisa de ITS na China, o Centro de ITS da Universidade de Tecnologia de Wuhan.

Comunicação cooperativa entre veículos e com a infraestrutura serve para gerenciar e dar mais segurança às pessoas no trânsito, provendo também outros serviços para os motoristas e passageiros como o acesso às redes sociais, e serviços de *stream* de vídeo durante a viagem. Todas essas aplicações se apoiam na colaboração entre os elementos que integram o sistema como os veículos, os sensores e os demais dispositivos móveis. Cada um desses elementos exerce um papel importante, colaborando e sensoreando dados que serão avaliados pelo sistema. Essa colaboração de elementos é viabilizada pela comunicação entre os mesmos.

ITSs [63] está diretamente relacionados a uma ampla variedade de tecnologias eletrônicas e de informações baseadas em comunicação, com ou sem fio. Quando integradas à infraestrutura do sistema de transportes, tais tecnologias possuem potencial para diminuir congestionamentos, aumentar a segurança e a produtividade. Esses sistemas utilizam tecnologias de processamento de informação e comunicação, sensoriamento, navegação e tecnologia de controle aplicados à melhoria do gerenciamento e operação dos sistemas de transportes, à melhoria da eficiência no uso das vias, à melhoria da segurança viária, ao aumento da mobilidade, à redução dos custos sociais, através de redução de tempos de espera e tempos perdidos e dos impactos ambientais. De uma maneira geral, os ITSs devem prover uma ligação inteligente entre os usuários dos sistemas de transportes, os veículos e a infraestrutura. Segundo [64], os ITSs podem ser categorizados como: *Advanced Traffic Management System* (ATMS), *Advanced Traveller Information System* (ATIS), *Enabled Transportation Pricing System* (ETPS), *Advanced Public Transportation System* (APTS) e *Commercial Vehicle Operation* (CVO).

ITS pode ser utilizado em uma multiplicidade de tarefas como a avaliação do desempenho de sistemas de semaforização, através da utilização dos mais recentes algoritmos de otimização, no planejamento e gestão de rotas com base na redução das emissões ou na avaliação do comportamento de redes de comunicação.

3.2 Trabalhos sobre segurança no trânsito

Um dos objetivos das redes veiculares é promover a segurança no trânsito. As aplicações relacionadas à segurança como, por exemplo, alertas de possível colisão exigem que as mensagens sejam transmitidas em até 100 ms, que é considerado o limite de atraso tole-

rável para a maioria das comunicações de eventos de emergência [65]. Um tempo limite em um cenário de VANETs deve incluir o envio de uma mensagem crítica, a resposta do dispositivo veicular e a reação do motorista frente a um evento de emergência. Entretanto, há uma escassez no mercado de dispositivos para rede veicular prontos para o usuário final, mesmo que a arquitetura VANET já esteja se tornando parte da nossa realidade [65]. Os autores [66] utilizaram um dispositivo padrão *On-Board Diagnostic* (ODB-II), que é um sistema que permite a leitura e transmissão de diversos tipos de dados mecânicos, para uso em aplicações de segurança de trânsito. González et al [67] realizaram testes de comunicação entre veículos utilizando dispositivos com interfaces de rede IEEE 802.11b Wi-Fi de propósito geral, mas com alta potência de transmissão e longo alcance com linha de visada. Os testes foram feitos com dois veículos em movimento e mostraram que foi possível realizar a comunicação direta entre eles [67], ou seja, sem a necessidade de alguma infraestrutura preexistente na via.

No artigo [68], os autores citam que o número de pessoas mortas em acidentes de trânsito no Marrocos atingiu 3.593 em 2016, contra 3.565 em 2015. Para diminuir esses números, os autores estavam trabalhando no desenvolvimento da comunicação V2V, com a utilização do protocolo de roteamento AODV, para fornecer informações e assistência necessárias para evitar colisões, engarrafamentos, entre outros. Nesse trabalho, foi feito um estudo sobre a cidade de Casablanca, que possui uma rodovia que corta a cidade. Assim, foram usados dois cenários: primeiramente a rodovia e estradas principais, e, então, as outras estradas, como estradas primárias, secundárias, terciárias e residenciais. Os resultados mostraram que o IEEE 802.11p foi melhor e mais eficiente que o IEEE 802.11a em ambos os cenários e que o IEEE 802.11p apresenta melhores resultados no segundo cenário em relação ao primeiro, por conta do número de carros, velocidade e a distância entre os carros.

3.3 Trabalhos sobre simulações e protocolos

Em [69], é estudada uma solução para V2V utilizando simuladores, como SUMO [28], para gerar modelo de mobilidade, e NS-3, para avaliar o desempenho do experimento, em 3 diferentes cenários. São utilizadas 5 diferentes métricas para avaliar o experimento: *Packet Delivery Ratio* (PDR), *throughput*, *End-To-End Delay* (E2ED), *jitter* e *Normalized Routing Load* (NLR). Essas métricas foram calculadas com base em todos os dados gerados pela simulação. Nesse artigo, não é mencionado quais dos nós eram os transmissores e os receptores, e ao término são apresentados os resultados das simulações propostas.

No trabalho de [70], foram utilizados como parâmetros a taxa de transferência, atraso de ponta-a-ponta, PDR e *jitter* para diferentes números de veículos. Em sua conclusão, ficou claro que o AODV é preferível para relação de entrega de pacotes em comparação com *Dynamic Source Routing* (DSR) e DSDV, enquanto DSR tem atraso de ponta-a-ponta mais baixo.

Em [71], Shaban comparou o desempenho dos protocolos de roteamento AODV, OLSR e DSDV no cenário VANET, usando 10 mensagens básicas de segurança a cada segundo para a transmissão de informações cruciais entre os veículos, embora não se especifiquem quais veículos foram selecionados e a distância entre eles. OLSR oferece um melhor desempenho de *goodput* do que AODV. AODV mostra que o PDR do *Basic Safety Message* (BSM), que são informações sobre o veículo ou tempo, é mais promissor que o DSDV e OLSR, mas, quando a simulação está com 205 veículos, verifica-se que o OLSR é melhor do que AODV e DSDV.

No artigo [72], foi avaliado o desempenho do protocolo AODV sob a perspectiva de mobilidade em SUMO, sem o uso do *OpenStreetMap* (OSM), para avaliar métricas como *throughput* de pacotes enviados e *throughput* de pacotes perdidos, durante 1000 segundos, com velocidade de 10 m/s, com 100 nós na rede. O resultado mostra que, para 100 nós, o *throughput* de pacotes enviados é quase uniforme, o de pacotes recebidos se torna mais uniforme quando o número de nós é aumentado, e o *throughput* de pacotes perdidos é maior quando o número de nós é maior.

No artigo [73], foi usado um ambiente com 50 nós, criado pelo SUMO, sem o uso do OSM. As métricas usadas foram *throughput* e E2ED. O principal objetivo desse estudo é analisar o desempenho do AODV quando comparado ao DSDV usando os simuladores SUMO e NS-2. Verificou-se que formas diferentes protocolos sofrem com a natureza altamente móvel do VANET. Percebe-se que o *throughput* com AODV é melhor que DSDV, embora o atraso, que é ruim para redes VANETs no protocolo AODV tenha sido maior que o do DSDV.

No artigo de Sallam [74], é avaliado o comportamento dos protocolos AODV e OLSR utilizando-se, no máximo, 32 nós que se movem em média a 40 km/h. Os veículos da simulação foram gerados pelo SUMO e sem o uso do OSM. O tempo total de simulação foi configurado para 50 segundos. Foram utilizados 2 modelos de perda de percurso, *Two Ray Ground* e *Nakagami*, com o objetivo de estudar o efeito do desvanecimento em VANET. OLSR e AODV são comparados e avaliados com base nas métricas PDR e *throughput*, e os resultados da simulação mostram que o OLSR é ligeiramente melhor do que AODV no

cenário ideal, bem como em cenários de desvanecimento.

No trabalho [2], é proposto o protocolo MT-AODV, que é uma otimização do protocolo AODV, com um aumento da resiliência à falhas, para aumentar o desempenho da comunicação em cenários de operações militares com mobilidade de tropas. O desempenho do MT-AODV é comparado ao de outros protocolos tradicionais de MANETs, como por exemplo o AODV, DSDV e OLSR. A proposta é avaliada através de simulações que representam diversos cenários com e sem mobilidade e com quantidades de falhas variáveis. Os resultados mostram que o MT-AODV alcança melhores resultados em cenários simulados, com destaque para cenários em que há mobilidade. Na condição de mobilidade sem falhas, o MT-AODV alcança aproximadamente 10% a mais do total de pacotes recebidos e 50% menos de indisponibilidade de caminho se comparado aos demais protocolos. Dessa forma, os resultados mostram que o MT-AODV apresenta melhor desempenho quando comparado ao protocolo original, AODV, devido ao aumento da disponibilidade de rotas em suas tabelas. O uso do protocolos de roteamento MT-AODV contribuiu para aumentar a resiliência da rede em locais desprovidos de infraestrutura.

Em [75], Taleb trata da importância de se garantir um mecanismo de roteamento estável e confiável em VANETs para tornar as comunicações veiculares efetivas. Esse artigo propõe o uso de informações sobre as direções dos veículos para prever possíveis eventos de quebra de link e sugere o *velocity-heading based routing protocol* (VHRP) para encontrar rotas mais estáveis e duráveis. A simulação computacional demonstrou que o conhecimento da direção dos veículos reduz o número de eventos de quebra de link e aumenta o *throughput*.

No trabalho [76], foi demonstrado o uso de protocolos eficientes para comunicação V2V em *Vehicular Named-Data Networking* (VNDN) com o intuito de garantir alto PDR de conteúdo e reduzir o *broadcast storm*, inundação, durante o processo de descoberta de rotas. Os protocolos desenvolvidos pelos autores e utilizados no trabalho foram *Content Discovery Protocol* (CDP), *Centrality-based Caching Discovery Protocol for Vehicular Named-Data Networks* (CLYMENE) e *Protocolo Geométrico para Descoberta de Cache em VNDN* (PERSEU). Os resultados das simulações mostraram que os protocolos propostos possuem um bom desempenho em três pontos-chave: taxa de *cache hit*, taxa de entrega de conteúdo e transmissão de pacotes de interesse. Outros protocolos de roteamento em rede veiculares também pode ser utilizados como fonte de estudo e aperfeiçoamento conforme a Figura 3.1

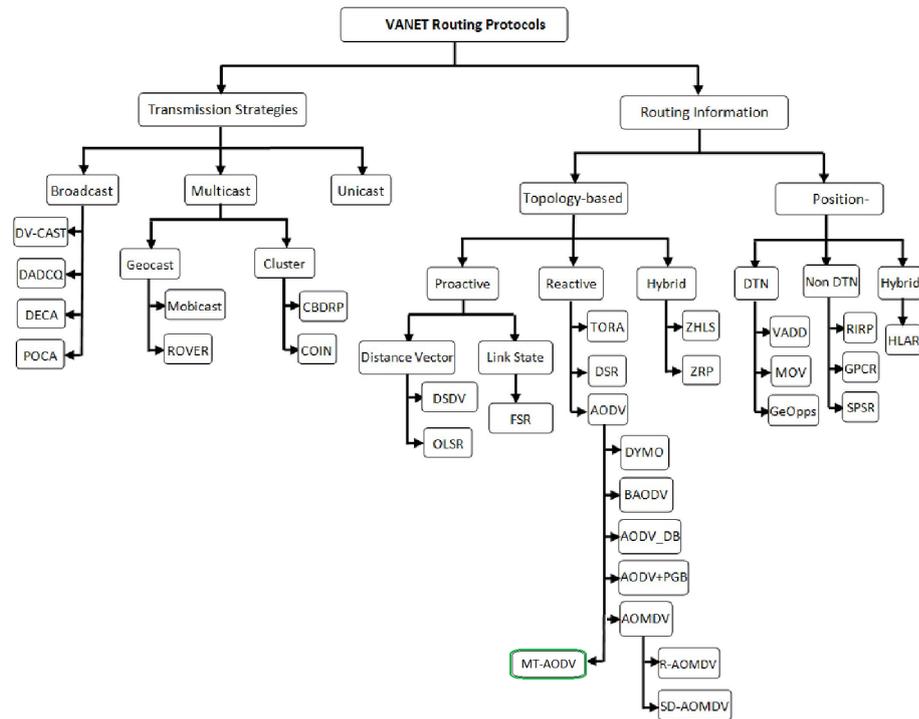


Figura 3.1: Classificação dos protocolos de roteamento VANET adaptado de [3].

3.3.1 Trabalhos Relacionados a Roteamento para VANET

Conforme estudo sobre trabalhos relacionados à comunicação veicular, presentes na Tabela 3.1, foram encontrados nove trabalhos com a utilização do protocolo AODV, seis com o DSDV, outros seis com OLSR e alguns com outros protocolos de menor relevância.

Esta dissertação difere dos trabalhos mencionados anteriormente, porque nenhum deles analisa a utilização do protocolo MT-AODV em redes VANET, já que o MT-AODV foi criado e desenvolvido com o propósito de atender às redes MANETs.

Tabela 3.1: Relação de trabalhos e protocolos utilizados com AODV.

Título do trabalho	Protocolo utilizado
Aodv routing protocol implementation in vanet [69]	AODV
Comparative analysis of routing protocols for vanet city scenario [70]	AODV, DSDV e DSR
Evaluation routing protocols in real live by using sumo with ns3 simulation in vanet [71]	AODV, DSDV e OLSR
Implementation and performance analysis routing protocol in vanets [72]	AODV
Performance analysis using sumo, move and ns2 [73]	AODV e DSDV
Performance evaluation in vanet cloud computing using fading model with sumo and ns3 [74]	AODV e OLSR
Mt-aodv: Provendo resiliência em redes ad-hoc móveis militares através de múltiplas tabelas de roteamento sob demanda [2]	AODV, MT-AODV, DSDV e OLSR
Performance Analysis of Ad Hoc Routing Protocols [77]	AODV, AOMDV, DSDV, DSR, OLSR
VANET: Vehicular Applications and Inter-Networking Technologies [27]	AODV, AOMDV, DSR, DSDV
Performance evaluation for vehicular ad-hoc networks based routing protocols [78]	AODV, DSR, DSDV
Comparison and Analysis Performance in Topology Based Routing Protocols in Vehicular Ad-hoc Network [79]	AODV, DSR, DSDV, ZRP
Simulation-Based Performance Evaluation of Routing Protocols in Vehicular Ad-hoc Network [80]	AODV, DSR, GPSR
Novel ETX-Based Metrics for Overhead Reduction in Dynamic Ad Hoc Networks [81]	AODV, L-ETX, LR-ETX, PLR- ETX
Simulação de Protocolos de encaminhamento para Redes AdHoc usando o NS-3 [82]	AODV, OLSR e DSDV
Análise de desempenho dos protocolos de roteamento, aplicados a uma rede de comunicação VANET [83]	AODV, OLSR e DSDV
A Comparative Study of Various Routing Protocols in VANET [84]	AODV, PGB, DSR, TORA, LSR, FSR

Capítulo 4

Experimentos e Resultados

O objetivo deste capítulo é apresentar as simulações realizadas e as configurações do simulador utilizadas nessas simulações. Em seguida, são abordadas as métricas utilizadas para avaliação dos protocolos propostos e são explicados os diferentes experimentos propostos com os seus respectivos resultados.

As simulações visam reproduzir um sistema real ou hipotético em um ambiente controlado e seguro, com o propósito de testar e avaliar diferentes cenários e estratégias. Com isso, será viável estudar o comportamento do sistema em diferentes condições e entender seu comportamento.

Na avaliação de resultados de simulações de protocolos de roteamento em VANETs, é importante utilizar métricas específicas para medir o desempenho dos protocolos estudados. Dentre as métricas mais comuns estão a taxa de entrega de pacotes, a vazão e a sobrecarga de rede. A avaliação dos resultados é apresentada com base nas simulações que foram realizadas, utilizando métricas específicas mencionadas na seção 4.2.

4.1 Simulador e configurações

O simulador utilizado é o NS-3, que é um simulador de rede de eventos discretos, voltado principalmente para pesquisa e uso educacional. Sua linguagem de programação é C++ e teve seu início em 2006, como um projeto de código aberto, sob a licença *GNU General Public License* (GNU GLP) e mantido por uma comunidade internacional [85]. O objetivo do projeto NS-3 é desenvolver um ambiente de simulação aberto para pesquisas em rede [85].

Um dispositivo computacional que se conecte a uma rede normalmente é chamado de

host ou, em alguns casos, de terminal. Como o NS-3 é um simulador de rede, é utilizado o termo *node*, que é traduzido como nó. Um nó é representado em C++ no NS-3 pela classe *Node* e essa classe fornece métodos para gerenciar as representações de dispositivos computacionais nas simulações.

As principais classes no simulador contêm nós, pacotes e canais, conforme mostrado na Figura 4.1. Um nó representa um elemento de rede, ao qual aplicativos, pilha de protocolos e *NetDevice* podem ser adicionados. Cada *NetDevice* está conectado a um canal pelo qual envia e recebe pacotes. Um nó pode estar conectado a mais de um canal através de múltiplos *NetDevice*. Um nó pode usar vários componentes de protocolo, que tratam de pacotes recebidos pelo *NetDevice*. Cada nó também pode lidar com uma lista de aplicativos. Um canal pode representar um cabo de rede ou uma transmissão em um meio sem fio. Cada objeto da classe canal pode ser conectado a uma lista de *NetDevice* [4].

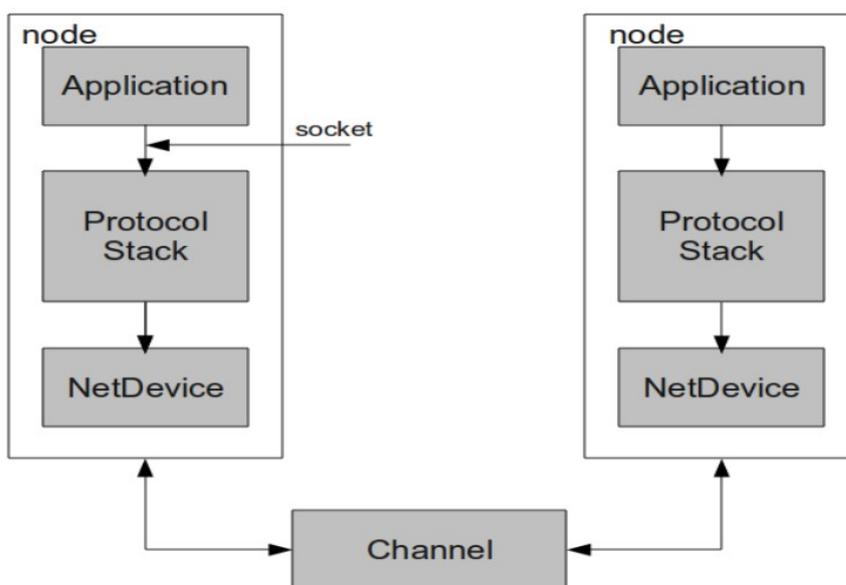


Figura 4.1: Arquitetura de um nó de rede no NS-3, adaptado de [4].

4.1.1 Aplicações

A separação entre sistemas e aplicações de usuários é feita pela mudança no nível de privilégios que acontece na troca de contexto feita pelo sistema operacional. No NS-3, não há o conceito de sistema operacional real, nem o conceito de níveis de privilégios nem chamadas de sistema. Há apenas aplicações que são executadas nos nós para uma determinada simulação. No NS-3, a aplicação é representada em C++ pela classe *Application*, que fornece métodos para gerenciar a representação de suas versões de aplicações

a serem simuladas. Os desenvolvedores devem sobrecarregar a classe *Application* para criar novas aplicações, como por exemplo, *UdpEchoServerApplication*, usada para gerar pacotes simulados de eco na rede [86].

4.1.2 Canal de Comunicação

Neste trabalho, o meio sobre o qual os dados trafegam é chamado de canal. No mundo simulado do NS-3, um nó é conectado a um objeto que representa um canal de comunicação, que é representado em C++ pela classe *channel*. Essa classe fornece métodos para gerenciar objetos de comunicação de sub-redes e nós conectados a esses objetos. Alguns exemplos desses objetos são *PointToPointChannel*, *WifiChannel* e *CsmaChannel* [86].

4.1.3 Dispositivos de Rede

Uma placa de rede necessita da utilização de um *driver* que a controle. Em sistemas derivados do Unix, um periférico, como a placa de rede, é classificado como um dispositivo, isto é, um *device*. Dispositivos são controlados usando *drivers* de dispositivo. Especificamente, as placas de rede são controladas através de *drivers* de dispositivo de rede (*network device drivers*), também chamadas de dispositivos de rede (*net devices*). No NS-3, um dispositivo de rede cobre tanto o hardware quanto o software. Um dispositivo de rede é instalado em um nó para permitir que este se comunique com outros na simulação, usando os canais de comunicação. Assim como em um computador real, um nó pode ser conectado a mais de um canal via múltiplos dispositivos de rede. É representado em C++ pela classe *NetDevice*, que fornece métodos para gerenciar conexões para objetos *Node* e *Channel*. Alguns exemplos são *CsmaNetDevice*, *PointToPointNetDevice* e *WifiNetDevice*. Assim como uma placa de rede *Ethernet* é projetada para trabalhar em uma rede *Ethernet*, um *CsmaNetDevice* é projetado para trabalhar com um *CsmaChannel*. O *PointToPointNetDevice* deve trabalhar com um *PointToPointChannel* e o *WifiNetDevice* com um *WifiChannel* [86].

4.1.4 Assistentes de Topologia

No simulador NS-3, os nós são conectados a dispositivos de rede. Conectar dispositivos a nós, a canais e atribuir-lhes endereços IP são todas tarefas rotineiras no NS-3, e fornecidos por Assistentes de Topologia (*topology helpers*) [86].

4.2 Métricas de avaliação

Nesta seção, serão apresentadas as métricas que foram usadas nas simulações, com o objetivo de avaliar o desempenho de cada um dos protocolos.

Packet Delivery Ratio (PDR): A taxa de entrega de pacotes PDR pode ser medida como a razão entre o número de pacotes entregues no total para o número total de pacotes enviados do nó de origem para o nó de destino na rede. Deseja-se que o máximo de pacotes de dados transmitidos chegue ao destino. Se o valor do PDR aumenta, então o desempenho da rede também melhora.

Throughput: Taxa de transferência que mede a quantidade real de dados enviados com sucesso pelo link de comunicação.

End-to-End Delay (E2ED): E2ED é o tempo que se leva para transferir toda a mensagem da origem para o destino. É representado pela relação entre o tempo de recebimento dos dados subtraído do tempo de transmissão dos dados dividido pelo número de pacotes de dados recebidos, conforme a equação:

$$E2ED = \sum_0^n \frac{RT - ST}{RP}, \quad (4.1)$$

onde RT é o tempo de recepção, ST é o tempo de envio, e RP é a quantidade de pacotes recebidos.

Lost Packet: Perda de pacotes descreve pacotes perdidos de dados que não atingem seu destino após serem transmitidos por uma rede. A perda de pacotes ocorre por causa de congestionamento da rede, problemas de hardware, *bugs* de software e vários outros fatores durante a transmissão de dados.

Hop Count: Ao longo do caminho da transmissão de dados, cada veículo representa um salto. A contagem de saltos é considerada uma medida básica da distância entre o nó origem e o de destino em uma determinada rede. Contagem de saltos é o número total de dispositivos intermediários, como roteadores, pelos quais um dado deve passar entre a origem e o destino, ou seja, referem-se ao número de dispositivos, geralmente roteadores, pelos quais um dado passa.

Carga de controle: A carga de controle em testes de desempenho de protocolos de roteamento refere-se à proporção de mensagens de controle em relação ao tráfego total da rede. Essas mensagens de controle são usadas pelos protocolos de roteamento para trocar informações sobre a topologia da rede, descobrir rotas disponíveis e atualizar as informações de roteamento.

A análise da carga de controle em testes de desempenho ajuda a compreensão da eficiência e da escalabilidade dos protocolos de roteamento, permitindo a seleção e otimização daqueles que mais se adequem aos requisitos e características da rede em questão.

O resultado das métricas citadas anteriormente, são valores apresentadas com intervalo de confiança de 95% considerando o teorema central do limite para sua distribuição [87].

4.3 Ambiente de Testes

A versão do simulador NS-3 utilizada nesta pesquisa foi a 3.33. O NS-3 interpreta *scripts* Tcl, que são usados para descrever ambiente a ser simulado. A escolha deste simulador foi por conta de ter aceitação na comunidade acadêmica e por se tratar de um simulador de código aberto e livre para utilização sem a necessidade de adquirir uma licença de uso.

O ambiente criado para os testes visa avaliar como os protocolos de roteamento veicular AODV, MT-AODV e DSDV se comportam e quais são as principais diferenças entre eles, de acordo com algumas métricas. Por exemplo, o *throughput* do par de nós escolhido, para avaliar a quantidade de dados transmitida de um nó transmissor para um nó receptor, avaliando neste caso se o resultado é influenciado pela variação do teste inicial. Também é avaliado, em conjunto ao *throughput*, o PDR para medir a razão de pacotes de dados que são realmente recebidos no final do receptor por aqueles que foram originalmente enviados pelo remetente, ou seja, a taxa de pacotes recebidos por um dos nós da simulação. Em paralelo, medidas de tempo são apresentadas para avaliar e justificar uma variação no comportamento da entrega dos pacotes, como o *jitter*, que mede a variação estatística do atraso na entrega de dados em uma rede, ou seja, medida de variação do atraso entre os pacotes sucessivos de dados. Outra métrica que irá apoiar este trabalho será o E2ED, que é uma soma de atraso de propagação, atraso na fila, atraso na transmissão e atraso de processamento em nós intermediários e é influenciado pela mobilidade do nó e distância de transmissão. Para uma outra análise, a métrica perda de pacotes, que está diretamente associada ao *throughput* e que ocorre quando um ou mais pacotes que

navegam sobre uma rede de computadores falha em alcançar o destinatário, será usada para dar base e apoio nos experimentos. Para visualização dos modelos de mobilidades, é utilizada a aplicação *NetAnim* que utiliza como base o arquivo gerado pelo *script* do NS-3 com extensão *.xml*. Também é usado o visualizador *PyViz*, que é uma ferramentas de visualização de dados, de código aberto, criada em *Python*. Dessa forma, para apresentar melhor o resultado esperado pelos protocolos, as análises foram separadas em diferentes experimentos conforme será descrito nas subseções a seguir.

Para manter o maior nível de controle para o experimento, é implementada uma simulação que traga possibilidades de realizar diferentes variações no ambiente proposto, com um cenário de referência em comum que é a base para análise e avaliação. Utiliza-se a estratégia de gerar nós em pontos específicos em um plano cartesiano definindo velocidades constantes ou variáveis para eles, de forma a comparar os protocolos de roteamento neste ambiente, como também a diferença de desempenho em variadas métricas. Embora tenha sido bastante usada, essa estratégia torna-se difícil quando se pretende fazer o ambiente parecer real, uma vez que os veículos fazem movimentos aleatórios que são bem difíceis de se reproduzir virtualmente. Além disso, a velocidade de cada um dos nós pode variar para mais ou para menos ou, até mesmo, podem chegar a zerar, no caso de veículos que param em um ponto de ônibus, por exemplo.

A variação dos experimentos tem o propósito de avaliar, em pontos específicos, o comportamento do protocolo MT-AODV em ambiente de comunicação V2V. Dessa forma, será iniciado por um teste de funcionalidades básicas para validar os protocolos e ter um ponto de servir como referência para os próximos testes. Em seguida, no experimento 1, é implementada a inserção de falhas no ambiente para avaliar impacto na comunicação com a interrupção de caminhos de roteamento. Depois, no experimento 2, é feito um teste para avaliar a diferença comportamental, quando a aplicação necessita utilizar o protocolo TCP ao invés do UDP. Em seguida, no experimento 3, o protocolo MT-AODV é avaliado quanto a sua variação de quantidade de tabelas de roteamento. No experimento 4, é inserida no ambiente a implementação de velocidades aleatórias entre os nós, sendo o teste realizado com distâncias entre os nós de 40 m e, depois, diminuiu-se para 20 m. Por fim, no experimento 5, há um adensamento na rede para avaliar a performance em um nível de dificuldades diversas no ambiente, tentando deixar o ambiente o mais próximo possível da realidade.

Os módulos de simulação que foram empregados são aqueles que têm maior relevância na comunidade acadêmica, ou seja, foram utilizados os protocolos AODV, e o DSDV, além

Tabela 4.1: Informações dos experimentos

Experimento	Característica Principal
Teste de funcionalidades básicas	Nós fixos e sem falha
Experimento 1	Implementando falha em nós
Experimento 2	Cenário do Experimento 1 usando TCP
Experimento 3	Variando o número de tabelas de roteamento para o MT-AODV com UDP
Experimento 3	Variando o número de tabelas de roteamento para o MT-AODV com TCP
Experimento 4	Implementando mobilidade entre os nós com distâncias de 40 m e de 20 m
Experimento 5	Incremento na quantidade de nós

da proposta nossa de usar o MT-AODV neste ambiente.

Ao avaliar o comportamento de carro, é possível identificar, dentro do universo de ambiente veicular, diferentes características de mobilidade, dentre os quais trânsito engarrafado em via estreita, em via litorânea, em via de mão dupla, com duas faixas, três ou até com sete faixas.

O ambiente de teste deste trabalho simula o comportamento de carros em um cenário específico, com foco em ambiente de vias lineares com fluxo em apenas um sentido e com velocidade média de aproximadamente 50 km/h. Esse comportamento simulado é visto com frequência em algumas vias da cidade de São Paulo, que são controladas por radares de velocidade que induzem os motoristas a andarem em velocidade constante próxima da máxima permitida, o que causa pouca mudança de posição entre os veículos da frente e de trás durante um certo período de tempo.

Como a intenção deste trabalho é testar a comunicação em ambiente V2V, o ambiente simulado é adequado para a realização dos testes, porém se fosse implementar um ambiente V2I, um cenário de cidade mais real seria interessante, pois poderiam ser implementados os RSU e diversos quarteirões por onde o veículo pudesse transitar e assim, validar o comportamento em V2V e V2I simultaneamente. As taxas de envio utilizadas serão configuradas para 5 kbit/s, pois o trabalho não prevê comunicação com grande quantidade de dados, como, por exemplo, aplicações em *streaming* 4k ou de realidade virtual. Dessa forma, representa outra característica de aplicações que visam segurança no trânsito. As informações sobre os experimentos e a relação entre os cenários é encontrada na Tabela 4.1.

4.4 Teste de funcionalidades básicas

Para o experimento inicial, o primeiro passo é criar um cenário de mobilidade simples que seja capaz de permitir novos experimentos que sejam variações desse cenário, cuja configuração é apresentada na Tabela 4.2.

Tabela 4.2: Parâmetros de configuração no simulador para o teste de funcionalidades básicas.

Descrição	Parâmetros utilizados
Ambiente simulado	Rodovia
Distância percorrida	1.000 m
Tempo de simulação	100 s
Área de simulação	45.000 m^2
Velocidade dos nós	10 m/s
Quantidade de nós	20
Protocolo de transporte	UDP
Protocolo de roteamento	AODV e MT-AODV
Tipo de aplicação	<i>Constant Bit Rate</i> (CBR)
Tamanho do pacote	256 Bytes
Taxa de transmissão	5 kbit/s
Modelo de propagação	Espaço livre
Repetições	40
Confiabilidade	95%

Para início do teste de funcionalidades básicas, é feita a configuração da mobilidade e do *script* no NS-3 seguindo os parâmetros descritos na Tabela 4.2 e, a seguir, é feita uma avaliação com base nas métricas citadas na seção 4.2.

O modelo de mobilidade, após ter sido configurado, apresenta a distribuição espacial e o seu comportamento temporal mostrada na Figura 4.2. Essa configuração foi definida para que fosse possível garantir uma quantidade de saltos que ficasse entre 3 e 4 saltos de distância entre o transmissor e receptor. A Figura 4.2 é extraída da ferramenta *NetAnim* após o *script* do NS-3 ter gerado o arquivo.

No teste de funcionalidades básicas, o grupo de 20 nós fará um movimento linear no eixo X (horizontal), saindo da posição zero até o máximo de 100 m, com uma velocidade constante de 10 m/s durante o período de 100 s. O afastamento inicial entre os nós, no eixo X, é de 40 m e a distância entre eles, no eixo Y (vertical), é de 15 m. Desta forma, conforme a Figura 4.3, percebe-se que o alcance máximo de transmissão para essa configuração fica limitado a esses nós, onde as setas azuis estão indicadas. O nó 0 alcança os nós 1 a 6, e não consegue se comunicar com o nó de número 7.

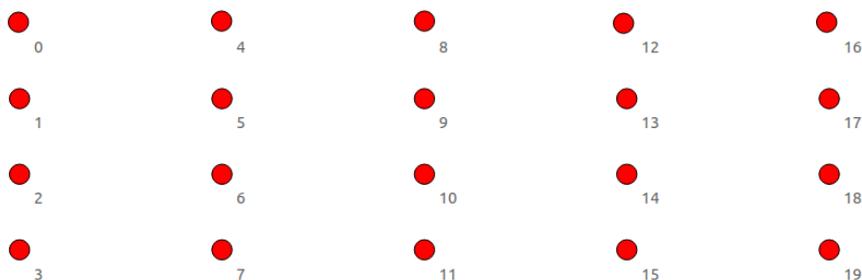


Figura 4.2: Topologia da rede veicular para o teste de funcionalidades básicas.

Será usado como modelo de propagação o modelo de Espaço Livre, pelo fato da comunicação veicular apresentada nesta dissertação, não prever a presença de uma obstrução no meio.

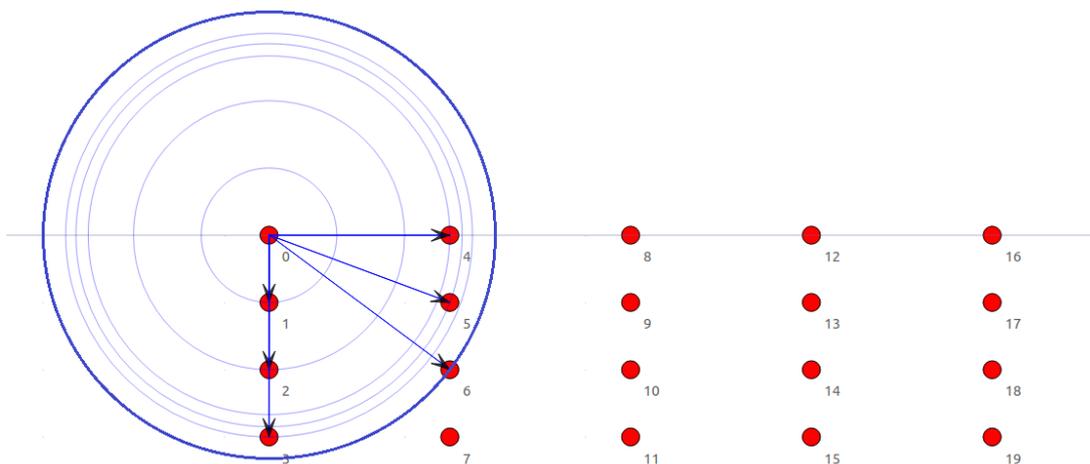


Figura 4.3: Alcance máximo para os protocolos AODV e MT-AODV no experimento, extraídos de simulação no *NetAnim*.

Como a velocidade é constante e a movimentação será apenas no eixo X, sem variações no eixo Y, o grupo de nós terminará a simulação com a mesma formação do início da simulação. Dessa forma, pretende-se simular uma rodovia como uma reta onde os veículos estão em velocidade de cruzeiro, mantendo aproximação constante entre si. A comunicação da aplicação ocorre entre os pares de nós mais distantes entre si, ou seja, do nó 0 para o nó 19, que está localizado no vértice da extremidade oposta ao nó 0, como pode ser visto na Figura 4.2. Para este experimento, será considerado apenas um fluxo de dados ao longo da simulação, ou seja, os outros nós, de 1 até 18, não farão transmissões. Nesse caso, será identificado o comportamento do protocolo de roteamento veicular no ambiente móvel sem a influência de outros fatores.

O protocolo AODV apresentou, durante a simulação, uma mesma rota do nó trans-

missor para o nó receptor, conforme é visto na Figura 4.4.

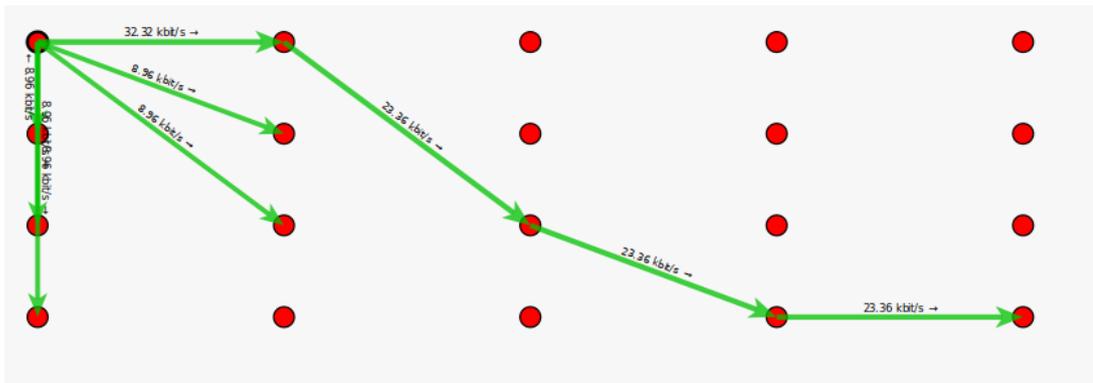


Figura 4.4: Rota definida pelo AODV durante o teste de funcionalidades básicas.

O protocolo MT-AODV faz o envio dos dados do transmissor para o receptor por diferentes rotas durante toda a simulação, conforme a Figura 4.5. A escolha por diferentes rotas ocorre por conta do protocolo trabalhar com múltiplos caminhos possíveis na rede para fornecer maior resiliência na comunicação. Essa alternância foi vista ao longo do experimento.

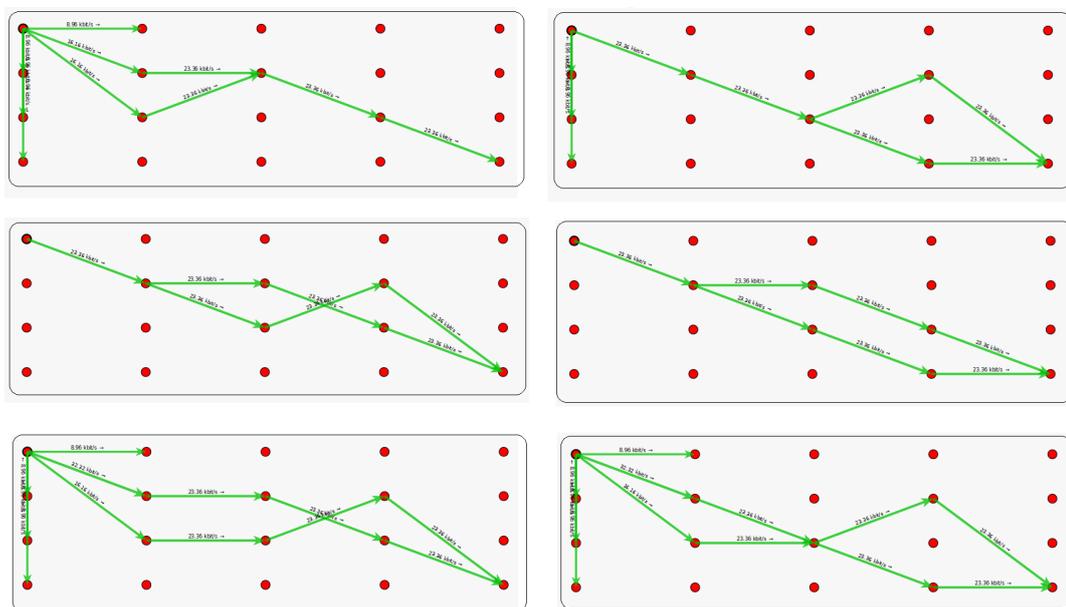


Figura 4.5: Diferentes rotas definidas pelo protocolo MT-AODV durante a simulação para o teste de funcionalidades básicas.

Avaliando os resultados apresentados na Figura 4.6, é comparado o valor de PDR para os protocolos de roteamento AODV e MT-AODV, onde se observa que, embora o protocolo AODV apresente um maior valor em média, durante as rodadas da simulação os resultados são considerados estatisticamente similares, considerando-se a confiabilidade.

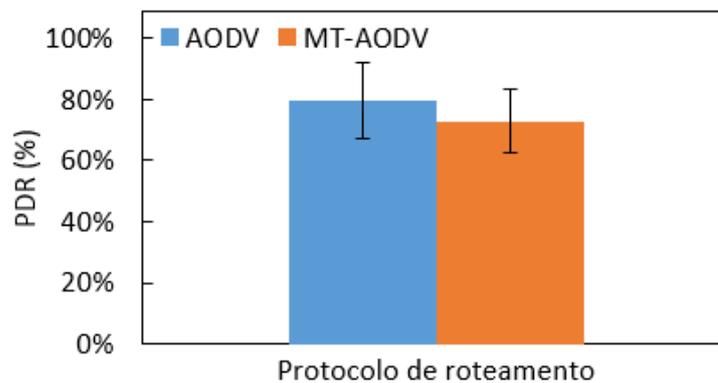


Figura 4.6: Resultado de PDR no teste de funcionalidades básicas.

A Tabela 4.3 apresenta a comparação entre os protocolos e percebe-se que a diferença de performance entre eles foi de 3%, porém com o protocolo MT-AODV apresentando uma melhor margem de incerteza, com valor de 13% do valor médio da simulação contra 18% para o AODV. Essa diferença maior por parte do AODV se dá por conta da quantidade de pacotes perdidos terem sido maiores do que as quantidades perdidas perdidos, em algumas rodadas na simulação do MT-AODV.

Tabela 4.3: Resultado de PDR para o teste de funcionalidades básicas.

PDR	AODV	MT-AODV
	80%	77%

O total de pacotes perdidos durante a simulação, para os protocolos, é apresentado na Figura 4.7 e representa uma consequência direta dos valores de PDR apresentados na Figura 4.6. É possível perceber que a pequena diferença de valor de PDR, apresentado anteriormente, indica que o AODV tenha uma melhor performance para este tipo de experimento, ou seja, um experimento com poucas variações no ambiente.

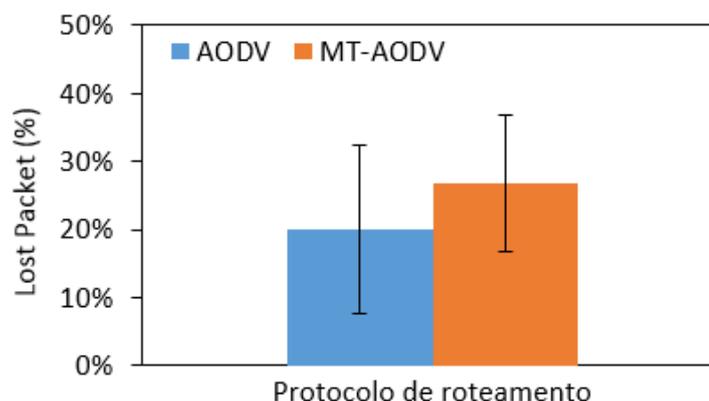


Figura 4.7: Resultado da perda de pacotes do teste de funcionalidades básicas.

O valor médio de perda de pacotes do protocolo AODV foi de 972 pacotes perdidos,

enquanto o MT-AODV apresentou uma média total de 1115 pacotes perdidos, como é observado na Tabela 4.4.

Tabela 4.4: Resultado de *lost packets* para o teste de funcionalidades básicas.

<i>lost packets</i>	AODV	MT-AODV
	972	1115

Quando se compara o *throughput* entre os 2 protocolos, os resultados apresentados na Figura 4.8, é possível comparar o resultado para os protocolos de roteamento AODV e MT-AODV, e observa-se que o MT-AODV também apresenta numericamente o mesmo comportamento do AODV.

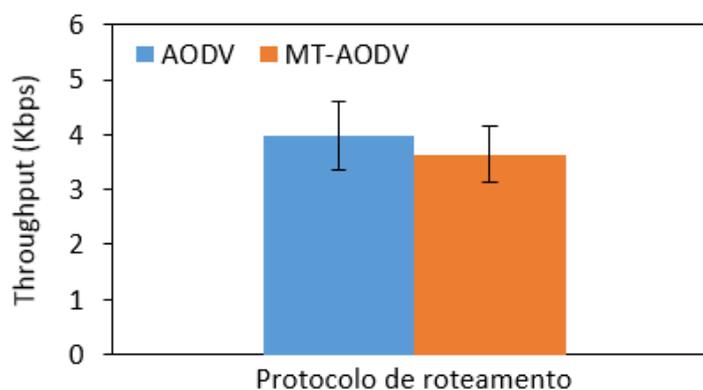


Figura 4.8: Resultado da métrica *throughput* para o teste de funcionalidades básicas.

Ao avaliar a Tabela 4.5, percebe-se que, em média, o AODV apresentou uma taxa de 3,9 kbit/s enquanto o MT-AODV apresentou uma taxa de 3,8 kbit/s, representando uma diferença praticamente nula entre eles, por conta do intervalo de incerteza.

Tabela 4.5: Resultado de *throughput* para o teste de funcionalidades básicas.

<i>throughput</i>	AODV	MT-AODV
	3,9 kbit/s	3,8 kbit/s

Analisando a Figura 4.9, com os resultados das medições de E2ED, verifica-se que o protocolo AODV apresenta um melhor resultado na média. Essa diferença se dá pois o protocolo MT-AODV, durante a transmissão dos dados, se comunica por mais de um caminho ao mesmo tempo, e, quando há uma interrupção ou atraso em um dos caminhos, o protocolo MT-AODV possui uma segunda opção de rota para encaminhar aos dados, mas nem sempre é o caminho mais curto. Quando há alguma interrupção durante a transmissão, o AODV precisa recalcular uma nova rota, procurando novamente uma rota mais curta.

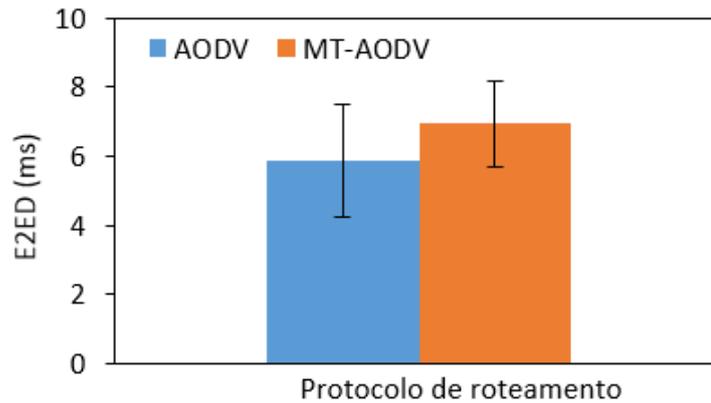


Figura 4.9: Resultado do E2ED no teste de funcionalidades básicas.

Os valores da Figura 4.9 estão representados na Tabela 4.6, onde é possível observar que o protocolo MT-AODV apresenta uma média de 6,9 ms enquanto o AODV apresenta 5,8 ms, o que representa uma diferença de 15% do tempo do AODV em relação ao do MT-AODV.

Tabela 4.6: Resultado do E2ED para o teste de funcionalidades básicas.

E2ED	AODV	MT-AODV
	5,8 ms	6,9 ms

4.5 Experimento 1: Com Falha em Nós

Para o experimento 1, foram seguidas as configurações iniciais do teste de funcionalidades básicas, com um modelo de mobilidade simples, porém, neste caso, são inseridas falhas aleatórias em alguns nós dentro do conjunto, com o objetivo de forçar a comunicação a seguir por um outro caminho, a fim de avaliar a performance do protocolo MT-AODV nesse cenário.

Para o experimento 1, é feita a configuração da mobilidade e do *script* no NS-3 seguindo os parâmetros descritos na Tabela 4.7, e que tem, em negrito, a alteração que ocorre do teste de funcionalidades básicas para o experimento 1. A configuração de espaçamento físico entre os nós deste experimento se mantém idêntica à do teste de funcionalidades básicas, como anteriormente mostrado na Figura 4.2, porém com falhas ocorrendo a distâncias de 1 salto, 2 saltos e 3 saltos do nó transmissor, conforme mostrado na Figura 4.10.

As falhas aleatórias ocorrem durante toda a simulação, que tem a duração de 100 segundos. Essas falhas ocorrem por um período de 10 segundos e depois a comunicação

Tabela 4.7: Parâmetros de configuração para o experimento 1.

Descrição	Parâmetros utilizados
Ambiente simulado	Rodovia
Distância percorrida	1.000 m
Tempo de simulação	100 s
Área de simulação	45.000 m^2
Velocidade dos nós	10 m/s
Quantidade de nós	20
Protocolo de transporte	UDP
Protocolo de roteamento	AODV, DSDV e MT-AODV
Tipo de aplicação	CBR
Tamanho do pacote	256 Bytes
Taxa de transmissão	5 kbit/s
Falha por desconexão	1, 2 e 3 saltos de distância do TX
Modelo de propagação	Espaço livre
Repetições	40
Confiabilidade	95%
Qtd. tabelas de roteamento MT-AODV	2

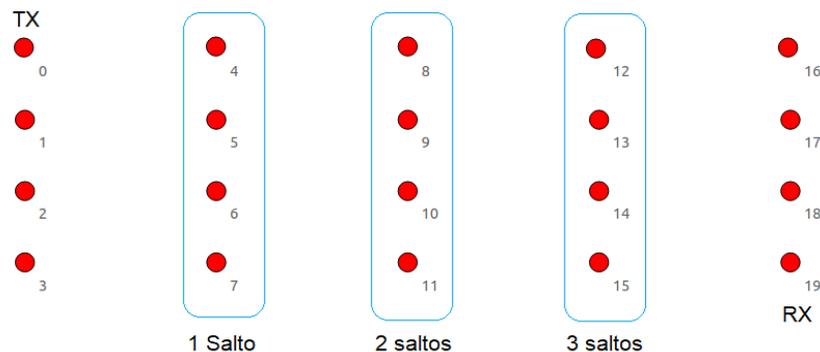


Figura 4.10: Localização das falhas durante as simulações do experimento 1.

retorna ao normal. Em cada salto, estão presentes 4 nós, mas nem todos eles apresentam falhas. As falhas nos nós, que estão localizados em saltos diferentes, podem ocorrer simultaneamente.

Para avaliar o comportamento dos protocolos neste experimento, foi feita uma sequência de testes para o ambiente sem falha, com falha em 1 salto de distância, depois 2 saltos, 3 saltos e, por fim, nos 3 saltos juntos, como é mostrado na Figura 4.11. Nessa figura, fica claro que a performance do protocolo MT-AODV é superior à do AODV nos testes onde houve falhas a 1 salto, 3 saltos de distância e quando todos os 3 saltos funcionam em conjunto na mesma sequência de testes. Quando o MT-AODV é comparado com o DSDV, percebe-se que o MT-AODV tem melhor performance onde houve falha a 1 salto e em todos os saltos combinados. Quando a falha ocorre a 2 saltos de distância, o proto-

colo MT-AODV tem o melhor resultado em média que o AODV, porém considerando a margem de incerteza, os resultados são considerados estatisticamente similares.

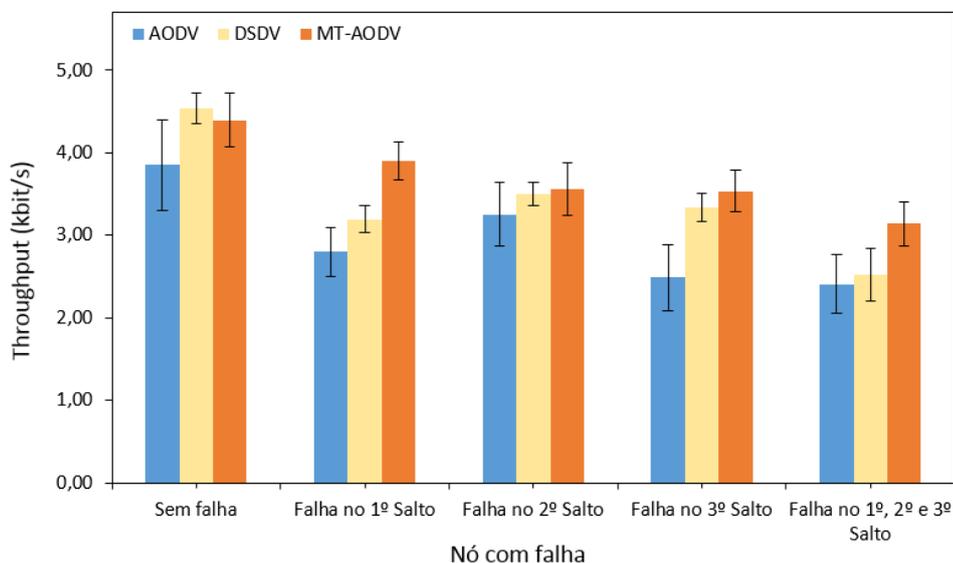


Figura 4.11: Resultados da métrica *throughput* para as simulações do experimento 1.

A performance do protocolo MT-AODV pode ser observada na Tabela 4.8, onde há um ganho máximo no *throughput* de 42% em relação ao protocolo AODV e de 42% em relação ao protocolo DSDV. O MT-AODV tem resultados de 39%, 30%, 14% e 9%, onde ocorreram falhas a 1 salto, nos 3 saltos combinados, no ambiente onde não houve falha e a 2 saltos de distância, respectivamente. O resultado melhor do protocolo MT-AODV deve-se pelo fato de ter melhor resiliência a falhas, devido ao processo de múltiplas rotas e tabelas de roteamento, permitindo que em caso de quebra de link, a comunicação esteja ativa por outro caminho.

Tabela 4.8: Resultados numéricos da métrica *throughput* para o experimento 1.

Nó com falha	<i>Throughput</i> (kbit/s)			Ganho MT-AODV	
	AODV	DSDV	MT-AODV	AODV	DSDV
	Sem falha	3,8 ± 0,5	4,4 ± 0,2	4,4 ± 0,3	14%
1º salto	2,8 ± 0,3	3,2 ± 0,2	3,9 ± 0,2	39%	22%
2º salto	3,3 ± 0,4	3,5 ± 0,1	3,6 ± 0,3	9%	2%
3º salto	2,5 ± 0,4	3,3 ± 0,2	3,5 ± 0,2	42%	6%
1º, 2º e 3º salto	2,4 ± 0,4	2,5 ± 0,3	3,1 ± 0,3	30%	24%

Quando a métrica PDR é utilizada, é possível observar, na Figura 4.12, que o MT-AODV obteve melhores taxas de entrega de pacotes que o AODV nos testes onde houve falhas nos nós a 1 salto, 3 saltos de distância e quando houve falhas combinadas nos saltos 1, 2 e

3. Também obteve melhor resultado quando comparado ao DSDV nos testes onde houve falha nos nós a 1 salto e nos 3 saltos combinados.

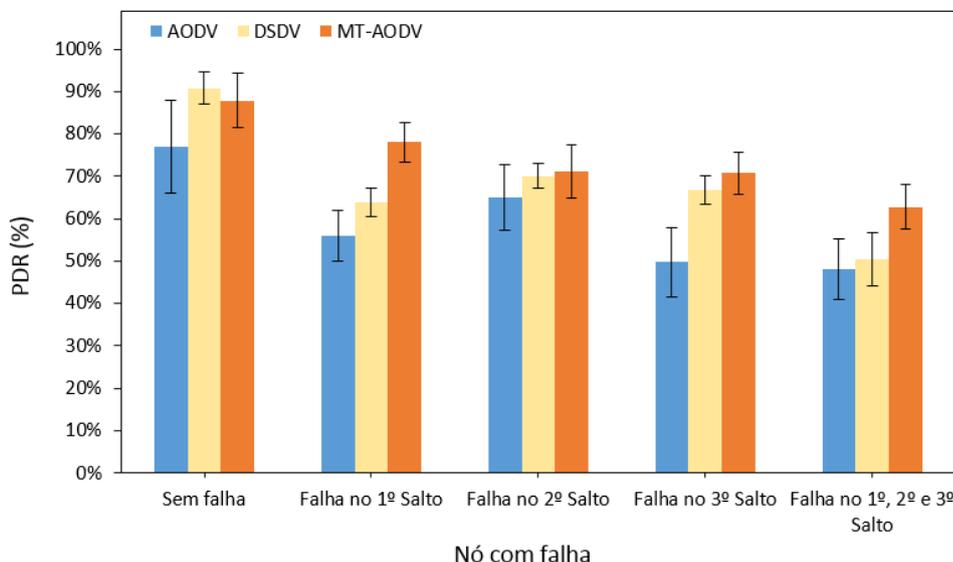


Figura 4.12: Resultados da métrica PDR para a simulação do experimento 1.

Na Tabela 4.9, observa-se que, para os saltos 1, 2 e 3, o protocolo MT-AODV apresenta PDR sempre acima de 70% e que, em nenhum momento, o AODV conseguiu superar o valor de 77%. Deve-se considerar a baixa performance de entrega para os testes em questão por conta da dificuldade implementada na simulação com o objetivo de simular o comportamento em um ambiente com excesso de falhas e onde os nós se encontram a uma distância considerada limite para o estabelecimento do link. Dessa forma, o MT-AODV obteve uma performance máxima em relação ao AODV em 39% e, em relação ao DSDV, em 24%.

Tabela 4.9: Resultados numéricos da métrica PDR para o experimento 1.

Nó com falha	PDR (%)			Ganho do MT-AODV	
	AODV	DSDV	MT-AODV	AODV	DSDV
	Sem falha	77 ± 11	91 ± 4	88 ± 7	26%
1º salto	56 ± 6	64 ± 3	78 ± 5	39%	22%
2º salto	65 ± 8	70 ± 3	71 ± 6	9%	2%
3º salto	50 ± 8	67 ± 3	71 ± 5	42%	6%
1º, 2º e 3º salto	48 ± 7	51 ± 6	63 ± 5	30%	24%

Pode-se ver na Figura 4.13 que a quantidade média de pacotes perdidos durante a simulação é aumentada conforme variam as falhas no ambiente. Em todos os casos, o protocolo AODV esteve com perdas superiores ao MT-AODV.

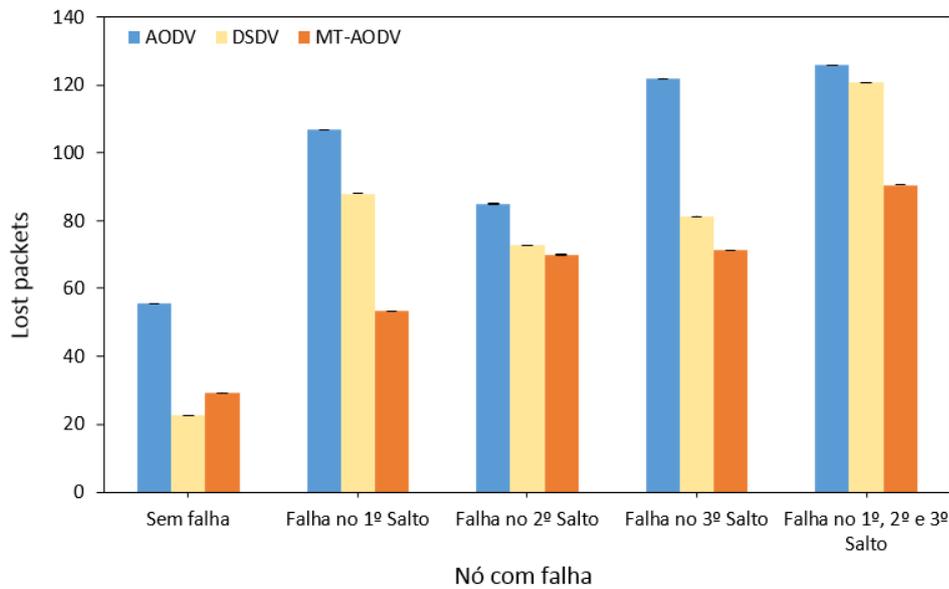


Figura 4.13: Resultados da métrica *lost packet* para a simulação do experimento 1.

Observa-se que, quando houve falhas nos nós a 1 salto de distância, a performance do protocolo MT-AODV superou o AODV em 100%. O pior caso registrado teve uma melhora de 21% em relação ao AODV. Já em relação ao DSDV, o MT-AODV obteve uma melhora máxima de 65% quando houve falha a 1 salto de distância e mínima de 4% onde ocorreu falha a 2 saltos de distância. Os valores da simulação estão representados na Tabela 4.10.

Tabela 4.10: Resultados da quantidade média de pacotes perdidos da métrica *lost packet* para o experimento 1.

Nó com falha	<i>lost packet</i>			Ganho do MT-AODV	
	AODV	DSDV	MT-AODV	AODV	DSDV
	Sem falha	55 ±0,11	23 ±0,04	29 ±0,07	90%
1º salto	107 ±0,06	88 ±0,03	88 ±0,05	100%	65%
2º salto	85 ±0,08	73 ±0,03	73 ±0,06	21%	4%
3º salto	122 ±0,08	81 ±0,03	71 ±0,05	71%	14%
1º, 2º e 3º salto	126 ±0,07	121 ±0,06	91 ±0,05	39%	33%

A quantidade média de saltos realizados pelos pacotes transmitidos do nó 0 para o nó 19, que é observada na Figura 4.14, ficou em aproximadamente 4 saltos, registrando valores maiores para as simulações onde ocorreram falhas a 1 salto de distância e nos 3 saltos juntos. A variação na quantidade de saltos está relacionada às falhas que ocorreram durante a simulação, ou seja, conforme ocorre uma falha, faz-se necessário recalculer uma outra rota para o destino, e essa rota pode não ser a melhor rota em termos de saltos, porém uma rota viável para realizar a comunicação entre o nó transmissor e receptor.

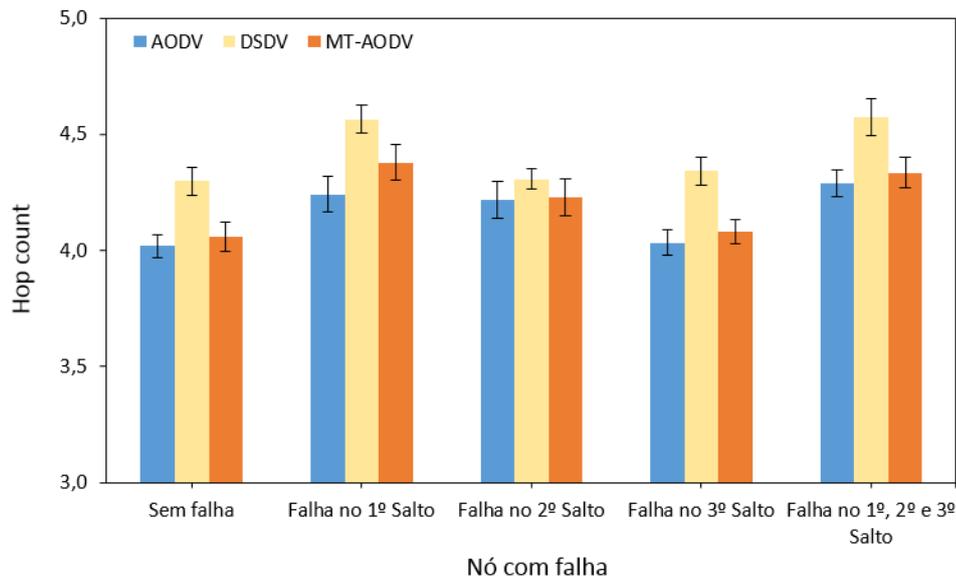


Figura 4.14: Resultados da métrica *hop count* para a simulação do experimento 1.

A variação de valores mínimos, que foram de 4,0 saltos para o AODV, 4,3 para o DSDV e de 4,1 para o MT-AODV, até o máximo de 4,3 para o AODV, 4,6 para o DSDV e de 4,3 para o MT-AODV, podem ser verificados na Tabela 4.11.

Tabela 4.11: Resultados da quantidade de saltos da métrica *hop count* para o experimento 1.

<i>hop count</i>					
Nó com falha	AODV	DSDV	MT-AODV	Ganho MT-AODV	
				AODV	DSDV
Sem falha	4,0 ±0,11	4,3 ±0,04	4,1 ±0,07	-1%	5,9%
1º salto	4,2 ±0,06	4,6 ±0,03	4,4 ±0,05	-3,1%	4,2%
2º salto	4,2 ±0,08	4,3 ±0,03	4,2 ±0,06	-0,3%	1,8%
3º salto	4,0 ±0,08	4,3 ±0,03	4,1 ±0,05	-1,2%	6,4%
1º, 2º e 3º salto	4,3 ±0,07	4,6 ±0,06	4,3 ±0,05	-1,1%	5,5%

O resultado da métrica carga de controle, que é apresentado na Figura 4.15, mostra o comportamento do protocolo AODV, DSDV e MT-AODV, comparando o ambiente sem falhas com os ambientes com falhas sugeridas anteriormente. Percebe-se que o protocolo MT-AODV não apresenta um aumento de carga de controle quando as falhas são inseridas nos ambientes. E que em todos os ambientes com falhas, ele apresenta um valor médio maior de carga de controle em relação ao AODV.

Como pode ser observado na Tabela 4.12, para o MT-AODV, o ambiente sem falha apresentou um valor de 47,2% de carga de controle onde as falhas aconteceram no primeiro salto contra um valor máximo de 49,6% quando ocorreu falhas no segundo salto. De

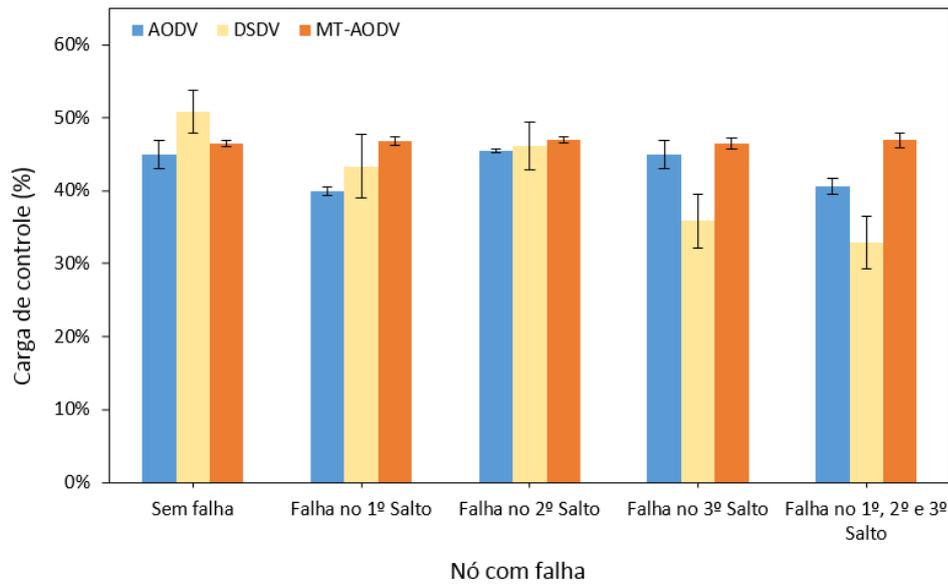


Figura 4.15: Resultados da métrica carga de controle para a simulação do experimento 1.

uma forma geral, o MT-AODV apresenta valores maiores para carga de controle quando comparado com o AODV.

Tabela 4.12: Resultados numéricos da métrica carga de controle para o experimento 1.

<i>Carga de Controle (%)</i>					
Nó com falha	AODV	DSDV	MT-AODV	Ganho MT-AODV	
				AODV	DSDV
Sem falha	45 ± 1,9	51 ± 2,9	46 ± 0,5	-3%	9%
1º salto	40 ± 0,6	43 ± 4,4	47 ± 0,6	-15%	-7%
2º salto	45 ± 0,3	46 ± 3,2	47 ± 0,4	-3%	-2%
3º salto	45 ± 1,9	36 ± 3,7	46 ± 0,7	-3%	-23%
1º, 2º e 3º salto	41 ± 1,1	33 ± 3,6	47 ± 1,0	-14%	-30%

4.6 Experimento 2: Cenário do Exp. 1 usando TCP

Para o experimento 2, foram seguidas as configurações do experimento 1, a partir do modelo de mobilidade simples do teste de funcionalidades básicas. São mantidas as falhas aleatórias em alguns nós dentro do conjunto, conforme o experimento 1. Porém neste caso, em vez de usar o protocolo UDP, será usado o TCP.

A configuração da mobilidade e do *script* no NS-3 será realizada conforme os parâmetros descritos na Tabela 4.13. As métricas de avaliação serão as mesmas que foram utilizadas nos experimentos anteriores. A configuração de espaçamento físico entre os nós deste experimento se mantém idêntica à executada no experimento 1 e que pode ser vista

Tabela 4.13: Parâmetros de configuração para o experimento 2.

Descrição	Parâmetros utilizados
Ambiente simulado	Rodovia
Distância percorrida	1.000 m
Tempo de simulação	100 s
Área de simulação	45.000 m^2
Velocidade dos nós	10 m/s
Quantidade de nós	20
Protocolo de transporte	TCP
Protocolo de roteamento	AODV, DSDV e MT-AODV
Tipo de aplicação	CBR
Tamanho do pacote	256 Bytes
Taxa de transmissão	5 kbit/s
Falha por desconexão	1, 2 e 3 saltos de distância do TX
Modelo de propagação	Espaço livre
Repetições	40
Confiabilidade	95%
Qtd. tabelas de roteamento MT-AODV	2

na Figura 4.2, porém com falhas ocorrendo a uma distância de 1 salto, 2 saltos e 3 saltos do nó transmissor, conforme a Figura 4.10.

Para avaliar o comportamento do protocolo TCP no experimento, as mesmas regras de falha nos nós do experimento 1 serão utilizadas. Com isso, podemos perceber na Figura 4.16 que o protocolo MT-AODV apresenta melhores resultados em relação ao AODV quando ocorrem falhas a 2 saltos, 3 saltos e 4 saltos de distância. Quando ocorre falha a 1 salto de distância, o MT-AODV, em relação ao AODV, apresenta melhor resultado em média, porém levando em conta a margem de incerteza, os resultados são considerados similares. A grande variação em escala da margem de incerteza se deve ao fato de os resultados terem variado consideravelmente durante a simulação, apresentando valores de *throughput* mínimo de 0,02 kbit/s até um máximo de 5,0 kbit/s. O protocolo MT-AODV também apresentou melhores resultados, em média, do que o DSDV quando houve falhas a 1 salto, 3 saltos e quando os 3 saltos foram combinados.

O valor baixo do *throughput* ocorre porque, no TCP, enquanto o transmissor não receber o *acknowledgement* do pacote que enviou, a aplicação não faz mais transmissões. Dessa forma, a quantidade de pacotes transmitidos nunca será a mesma em cada uma das simulações executadas. Isso é diferente do comportamento do UDP que fará o envio de um número máximo de dados dentro do tempo de simulação.

Em todos os casos, o *throughput* do MT-AODV teve valores mais altos que o do

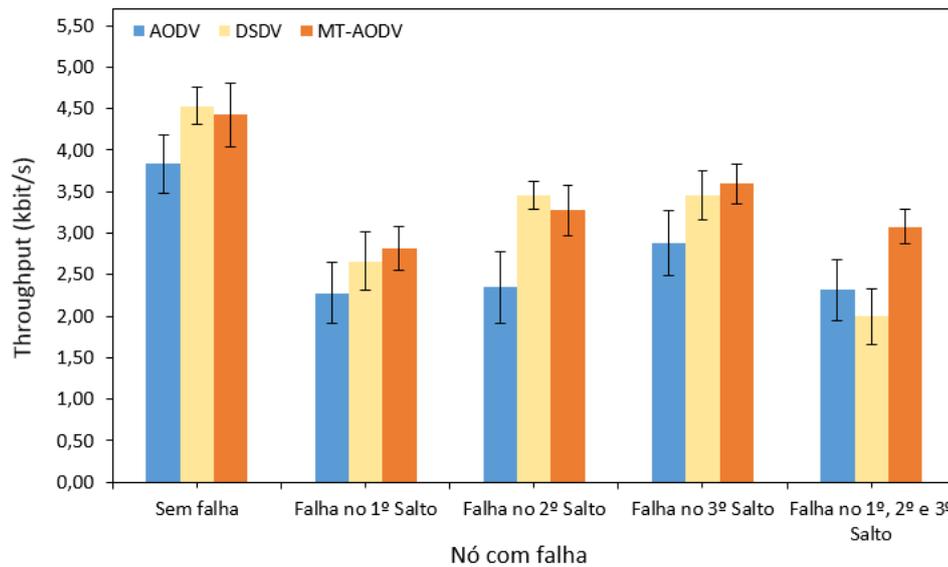


Figura 4.16: Resultados da métrica *throughput* para o experimento 2.

Tabela 4.14: Resultados numéricos da métrica *throughput* para o experimento 2.

<i>Throughput</i> (kbit/s)					
Nó com falha	AODV	DSDV	MT-AODV	Ganho do MT-AODV	
				AODV	DSDV
Sem falha	3,8 ± 0,4	4,5 ± 0,2	4,4 ± 0,4	15%	-2%
1º salto	2,3 ± 0,4	2,7 ± 0,4	2,8 ± 0,3	24%	6%
2º salto	2,3 ± 0,4	3,5 ± 0,2	3,3 ± 0,3	39%	-5%
3º salto	2,9 ± 0,4	3,5 ± 0,3	3,6 ± 0,2	25%	4%
1º, 2º e 3º salto	2,3 ± 0,4	2,0 ± 0,3	3,1 ± 0,2	33%	54%

AODV, chegando a obter uma melhora de performance máxima de 39% e a menor foi de 15%. Isso representa uma média de 26% de melhora do MT-AODV em relação ao AODV conforme pode ser observado na Tabela 4.14. Em relação ao DSDV, o MT-AODV chega a obter uma melhora de performance máxima de 54%, onde ocorreram falhas nos 3 saltos simultaneamente.

Avaliando o resultado da Figura 4.17, onde a métrica PDR está sendo usada, percebe-se que o MT-AODV apresenta melhores resultados em média, em relação ao AODV e ao DSDV nos casos onde ocorreram falhas a 1 salto, 2 saltos, 3 saltos e nos 3 saltos combinados. Porém, avaliando com a margem de incerteza, os resultados são considerados similares, com exceção no teste onde ocorreram falhas a 1 salto e nos 3 saltos combinados, pois o DSDV teve menor resultado.

Comparando-se a Figura 4.16 com a Figura 4.17, é possível observar que, nos ambientes onde ocorreram falhas, o PDR do MT-AODV teve um resultado acima dos 90%

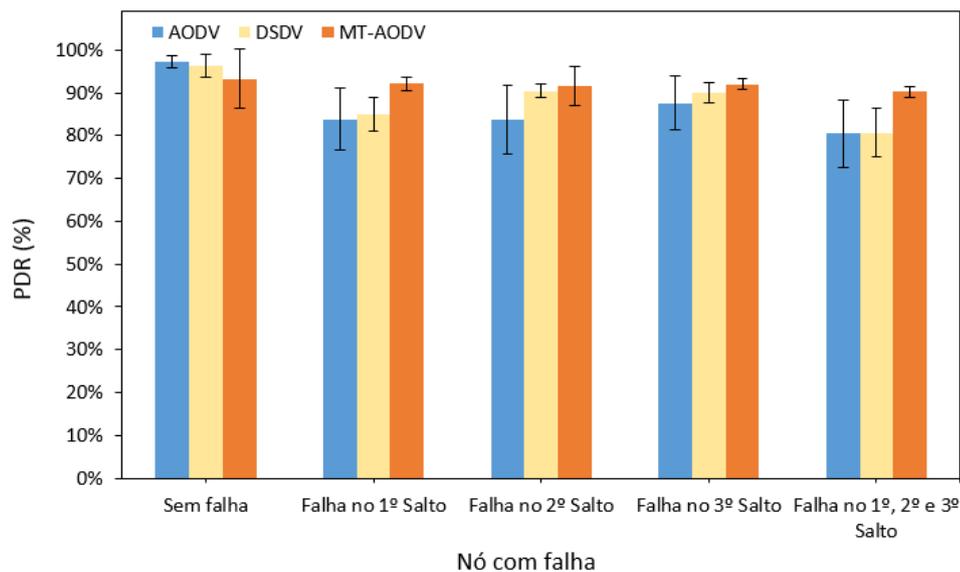


Figura 4.17: Resultados da métrica PDR para a simulação do experimento 2.

enquanto o *throughput*, apresentou baixas taxas de transmissão, com valores máximos de 3,6 kbit/s, considerando a taxa máxima de 5 kbit/s. Isso ocorre pois nos testes com o UDP há uma linearidade na quantidade de pacotes transmitidos, ou seja, em todas as simulações com o UDP, uma quantidade máxima de 244 pacotes foram transmitidas. No TCP, percebe-se que essa quantidade varia em todas as simulações, ficando em um valor médio de 156 pacotes transmitidos durante as simulações. A consequência é que há casos em que é apresentado um baixo valor *throughput* e um alto valor de PDR, pois embora tenha transmitido poucos pacotes, não houve perdas. Em outras situações, há um alto valor de *throughput* com baixo PDR, pois, embora tenha transmitido muitos pacotes, poucos chegaram no destino.

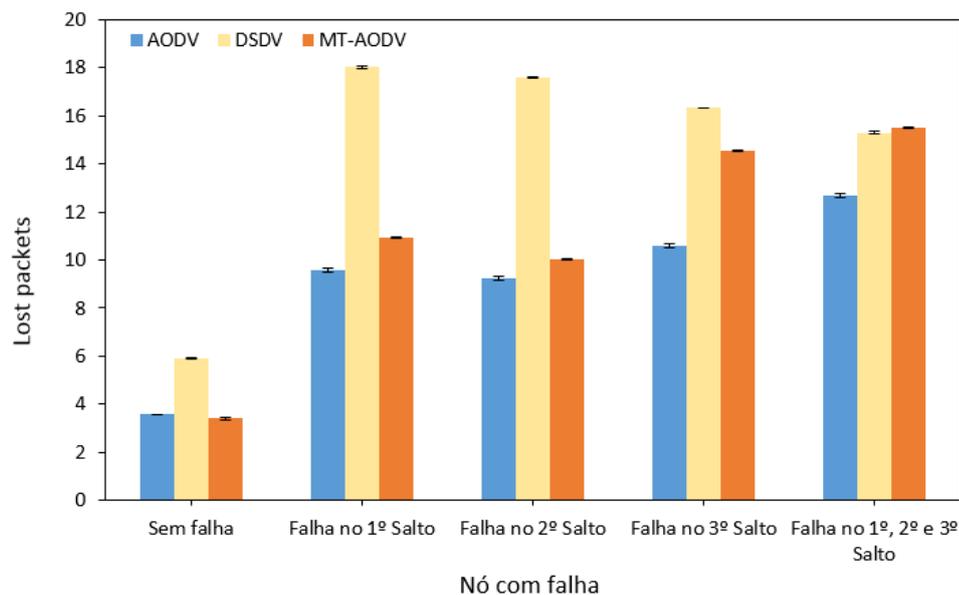
Embora a variação de quantidade de pacotes transmitidos tenha apresentado esse comportamento acima, percebe-se, na Tabela 4.15, que o protocolo MT-AODV apresentou melhores resultados em média que o AODV e o DSDV em todos os experimentos onde houveram falhas. Chega ao máximo de performance com 12% quando comparados com os 2 protocolos.

Quando se comparam os protocolos MT-AODV, AODV e DSDV com a métrica de perda de pacotes, na Figura 4.18, fica evidente que todos os protocolos apresentaram um aumento na quantidade média de perda de pacotes conforme aumentou o nível de dificuldade em relação a quantidade de falhas no ambiente. O DSDV é o protocolo que tem o pior desempenho em relação aos demais.

Embora o MT-AODV tenha apresentado valor médio maior que o AODV em todas

Tabela 4.15: Resultados numéricos da métrica PDR para o experimento 2.

Nó com falha	PDR (%)				
	AODV	DSDV	MT-AODV	Ganho do MT-AODV	
				AODV	DSDV
Sem falha	97 ±1	96 ±3	93 ±7	-4%	-3%
1º salto	84 ±7	85 ±4	92 ±2	10%	8%
2º salto	84 ±8	90 ±2	91 ±5	9%	1%
3º salto	88 ±6	90 ±2	92 ±1	5%	2%
1º, 2º e 3º salto	81 ±8	81 ±6	90 ±1	12%	12%

Figura 4.18: Resultados da métrica *lost packet* para a simulação do experimento 2.

as simulações, ao observar a Tabela 4.16, podemos perceber que o MT-AODV e o DSDV enviaram muito mais pacotes do que o AODV. Conseqüentemente, a média de pacotes perdidos para cada experimento acaba sendo maior que o AODV. MT-AODV e DSDV enviaram 35.794 e 34.368 pacotes durante todas as simulações do experimento 2, respectivamente e o AODV enviou somente enviou 28.564 pacotes. Já na perda de pacotes, o MT-AODV perdeu 2.167 o DSDV 2.926 e o AODV 1.827, o que representa um percentual de perda de pacotes no MT-AODV de 6,08%, no AODV o percentual foi de 6,4% e no DSDV 8,51%.

Tabela 4.16: Resultados do experimento 2.

Protocolo	Qtd. pacote transmitido	Qtd. pacote perdido	Percentual de perda
AODV	28.564	1.827	6,4%
DSDV	34.368	2.926	8,51%
MT-AODV	35.794	2.176	6,08%

4.7 Experimento 3: Variando o número de tabelas de roteamento para o MT-AODV

Para o experimento 3, foram seguidas as configurações do experimento 1 e o modelo de mobilidade do experimento 2. São mantidas as falhas aleatórias em alguns nós dentro do conjunto, conforme o experimento 1. Neste caso, são usados os protocolos TCP e UDP, e há uma alteração na quantidade de tabelas de roteamento que o protocolo MT-AODV pode configurar, variando de 2 tabelas até 8 tabelas.

Tabela 4.17: Parâmetros de configuração para o experimento 3.

Descrição	Parâmetros utilizados
Ambiente simulado	Rodovia
Distância percorrida	1.000 m
Tempo de simulação	100 s
Área de simulação	45.000 m^2
Velocidade dos nós	10 m/s
Quantidade de nós	40
Protocolo de transporte	TCP e UDP
Protocolo de roteamento	MT-AODV
Tipo de aplicação	CBR
Tamanho do pacote	256 Bytes
Taxa de transmissão	5 kbit/s/s
Falha por desconexão	1, 2 e 3 saltos de distância do TX
Modelo de propagação	Espaço livre
Repetições	40
Confiabilidade	95%
Qtd. tabelas de roteamento MT-AODV	2, 3, 4, 5, 6, 7 e 8

Para o experimento 3, será feita a configuração da mobilidade e do *script* no NS-3 seguindo os parâmetros descritos na Tabela 4.17 e, então, é avaliado com base nas métricas citadas nos parágrafos anteriores.

4.7.1 Experimento 3 com UDP

Avaliando a Figura 4.19 onde foi feita a simulação com o protocolo MT-AODV utilizando UDP, pode-se perceber os resultados foram muito próximos, e que permaneceram na mesma faixa de valores, quando consideramos a margem de incerteza de 95%. Quando observamos o valor médio da simulação, é possível perceber que, quando a quantidade de tabelas foi 7 ou 8, os resultados do MT-AODV foram piores.

Quando comparamos os valores na Tabela 4.18, é possível observar que os valores

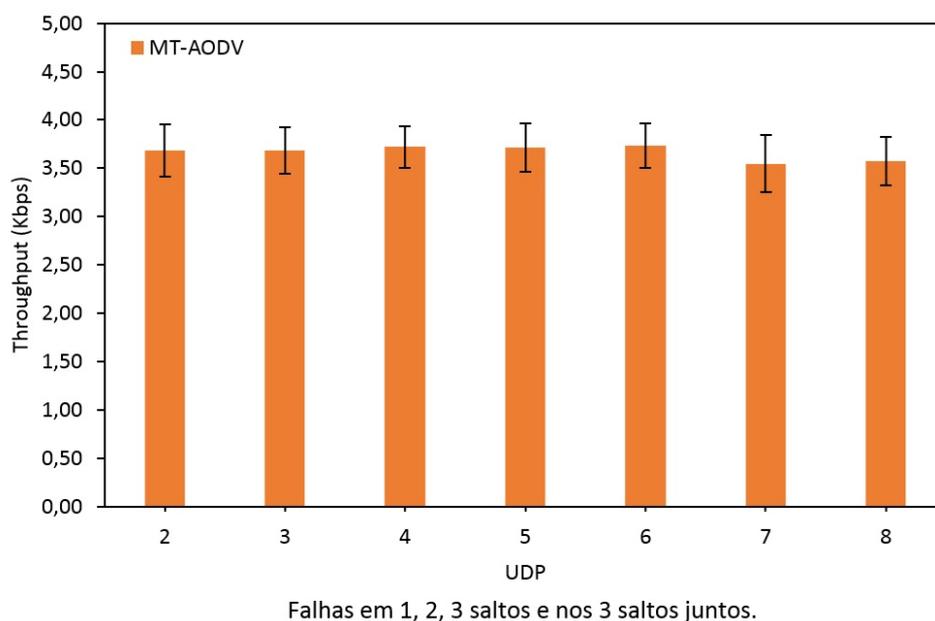


Figura 4.19: Resultados da métrica *throughput* para a simulação do experimento 3 considerando UDP.

mais baixos ocorreram quando os testes foram realizados com 7 e 8 tabelas, entregando resultados de 3,55 kbit/s e 3,57 kbit/s, contra um valor máximo do experimento para 3,73 kbit/s e isso representa uma diferença de 5%. Isso ocorre pois o MT-AODV executar mais cálculos para montar as tabelas de roteamento, o que acaba por levar mais tempo e inevitavelmente ter rotas secundárias que nem sempre são as melhores.

Tabela 4.18: Resultados numéricos da métrica *throughput* para o experimento 3, considerando o uso de UDP.

Quantidade de tabelas	MT-AODV
2	3,69 kbit/s
3	3,68 kbit/s
4	3,72 kbit/s
5	3,72 kbit/s
6	3,73 kbit/s
7	3,55 kbit/s
8	3,57 kbit/s

Podemos perceber o mesmo comportamento quando a métrica PDR é avaliada na Figura 4.20, ou seja, apresentam resultados similares, porém com uma leve piora, em média, quando a quantidade de tabelas aumenta.

O resultado numérico da Tabela 4.19 apresenta a mesma característica do *throughput*, onde os piores resultados ficaram concentrados nos testes com 7 e 8 tabelas de roteamento. Uma diferença de 5% quando comparamos o melhor resultado que, neste caso, foi 74,72%

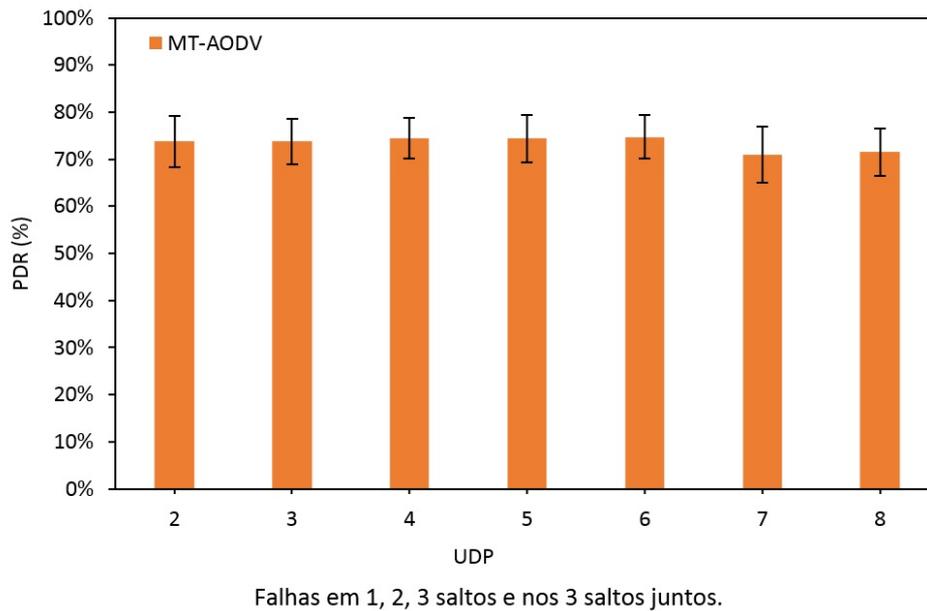


Figura 4.20: Resultados da métrica PDR para a simulação do experimento 3 considerando UDP.

contra o pior deles que ficou em 70,96%.

Tabela 4.19: Resultados numéricos da métrica PDR para o experimento 3, considerando UDP.

Quantidade de tabelas	MT-AODV
2	73,77%
3	73,71%
4	74,42%
5	74,37%
6	74,72%
7	70,96%
8	71,47%

Na Figura 4.21, a quantidade média de pacotes perdidos para os testes com 7 e 8 tabelas, apresentaram um valor maior que os demais testes com menos tabelas. Isso ocorre por conta de nem sempre a rota secundária ser a melhor rota para o encaminhamento e pode ocorrer falha por desconexão, o que leva à perda de pacotes.

Quando se avalia a quantidade de saltos na comunicação na Figura 4.22, quanto maior o número de tabelas de roteamento que o protocolo MT-AODV utiliza, maior é a quantidade de saltos na simulação. A ideia do protocolo de roteamento é buscar a menor rota, porém, quando se trabalha com mais de uma rota para o destino, outras rotas serão utilizadas e não necessariamente essas rotas serão melhores do que a primeira rota escolhida. Em muitos casos, a segunda ou terceira rota leva a uma quantidade maior de

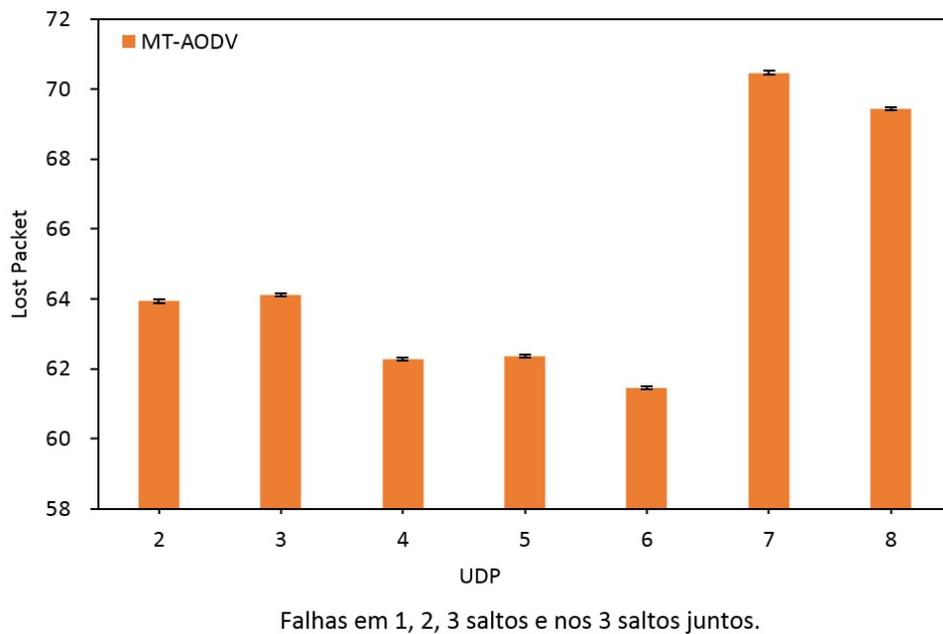


Figura 4.21: Resultados da métrica *lost packet* para a simulação do experimento 3 considerando UDP.

saltos que as primeiras. Dessa forma, quanto maior a quantidade de tabelas de roteamento que o protocolo utiliza, maior será a quantidade de saltos no experimento.

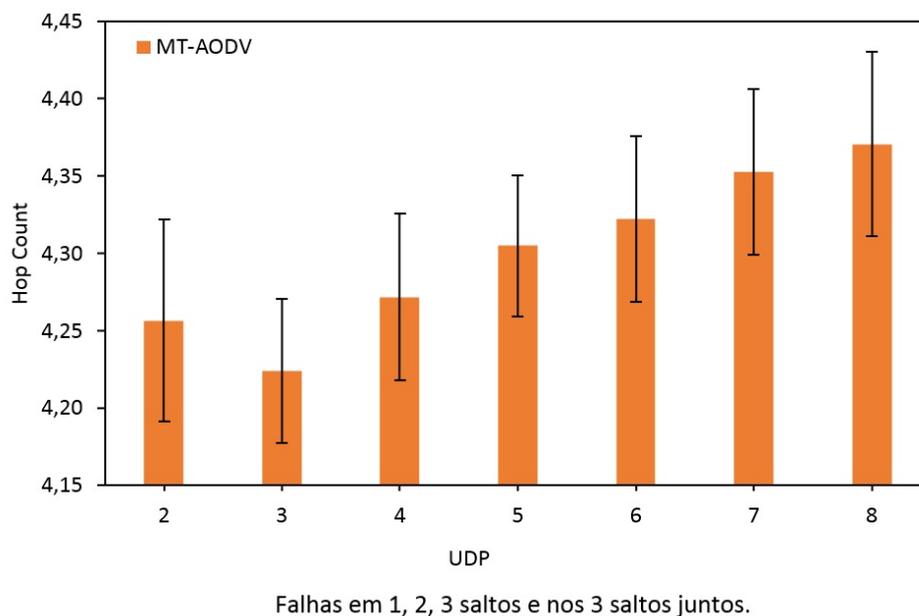


Figura 4.22: Resultados da métrica *hop count* para a simulação do experimento 3 considerando UDP.

Ao avaliar a Figura 4.23, pode-se observar que o E2ED apresenta melhor resultado quando a quantidade de tabelas de roteamento são menores. Quando a quantidade de tabelas foi configurada para duas unidades, o menor valor foi de 11,7 ms, e o valor máximo

foi de 18,2 ms para o E2ED, como pode ser observado na Tabela 4.20.

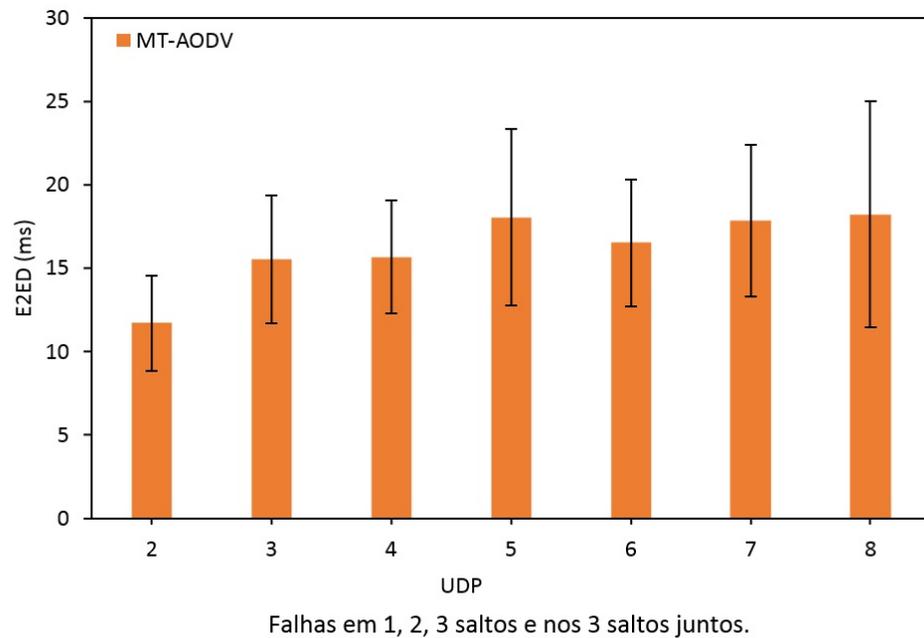


Figura 4.23: Resultados da métrica E2ED para a simulação do experimento 3 com UDP.

Os valores de máximo e o mínimo do E2ED, representam uma diferença de 56%, ao compararmos os resultados das tabelas 2 e 8, conforme a Tabela 4.20.

Tabela 4.20: Resultados numéricos da métrica E2ED para o experimento 3 com UDP.

Quantidade de tabelas	E2ED
2	11,7 ms
3	15,5 ms
4	15,7 ms
5	18,0 ms
6	16,5 ms
7	17,8 ms
8	18,2 ms

4.7.2 Experimento 3 com TCP

Desta vez, avalia-se a utilização do TCP em cenário semelhante ao da subseção anterior. Na Figura 4.24, percebe-se que o protocolo MT-AODV, quando varia a quantidade de tabelas de roteamento, não apresenta uma variação de resultado expressiva, ou seja, numericamente os resultados foram iguais, porém com uma leve tendência para o pior quando a quantidade de tabelas de roteamento aumentam. O comportamento, quando foi usado o TCP, ficou muito parecido com o do uso do UDP na Figura 4.19 apresentada no início desta seção.

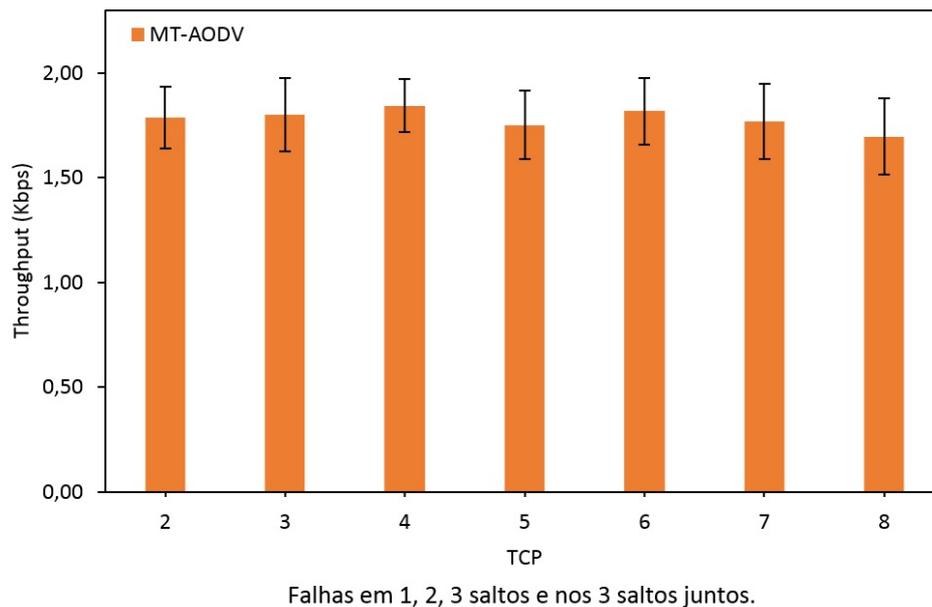


Figura 4.24: Resultados da métrica *throughput* para o experimento 3 usando TCP.

Avaliando a Tabela 4.21, observa-se um pior resultado em média quando o teste utilizou 8 tabelas de roteamento. A diferença de valor dos testes do TCP para o UDP se justificam pelo mesmo motivo citado no experimento 2 acima.

Tabela 4.21: Resultados numéricos da métrica *throughput* para o experimento 3, considerando TCP.

Quantidade de tabelas	MT-AODV
2	1,79 kbit/s
3	1,80 kbit/s
4	1,84 kbit/s
5	1,75 kbit/s
6	1,82 kbit/s
7	1,77 kbit/s
8	1,70 kbit/s

Da mesma forma que o protocolo UDP, o TCP na Figura 4.25 também apresentou resultado bem linear e com uma pequena tendência a piora da métrica quando a quantidade de tabelas aumenta.

Analisando os resultados da Tabela 4.22 referente a Figura 4.25, nota-se que o pior resultado, em média, foi apresentado quando o teste foi realizado com 8 tabelas de roteamento. Quando comparamos esses números com a Tabela 4.19 do exemplo citado anteriormente com UDP, fica evidente que o protocolo TCP apresenta melhor performance, mas o comportamento em relação a quantidade de tabelas permanece o mesmo. O pior caso apresentado nos testes ocorre quando utilizamos o protocolo com 8 tabelas,

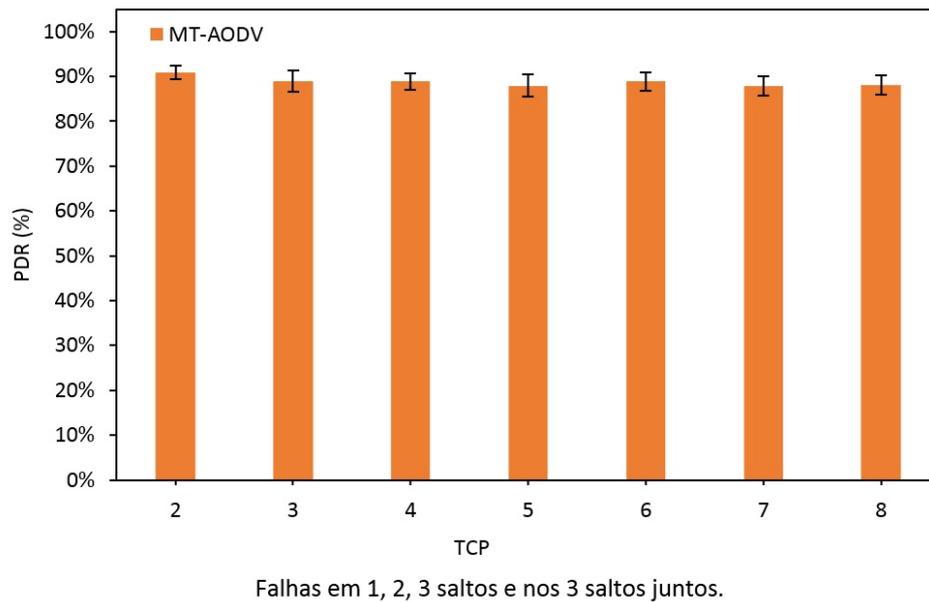


Figura 4.25: Resultados da métrica PDR para a simulação do experimento 3 considerando TCP.

onde houve uma PDR de 88,1%. O melhor caso apresentado nos testes ocorre quando foram utilizadas apenas 2 tabelas, obtendo um resultado de 90,9% para o MT-AODV. Essa diferença entre o pior e o melhor caso representa um valor de 3% de melhora na performance.

Tabela 4.22: Resultados numéricos da métrica PDR para o experimento 3, considerando TCP.

Quantidade de tabelas	MT-AODV
2	90,9%
3	89,9%
4	88,8%
5	87,9%
6	89,9%
7	87,9%
8	88,1%

Na Figura 4.26, podemos verificar a média de pacotes perdidos durante a simulação enquanto há avaliação de tabelas. Percebe-se que, com apenas duas tabelas, o protocolo MT-AODV tem uma menor média de perda de pacotes durante a simulação.

O mesmo comportamento em relação a quantidade de saltos do teste com o UDP se replica com o TCP, ou seja, quanto maior é a quantidade de tabelas de roteamento, maior também é a quantidade de saltos que o pacote fará durante a simulação, conforme pode ser visto na Figura 4.27.

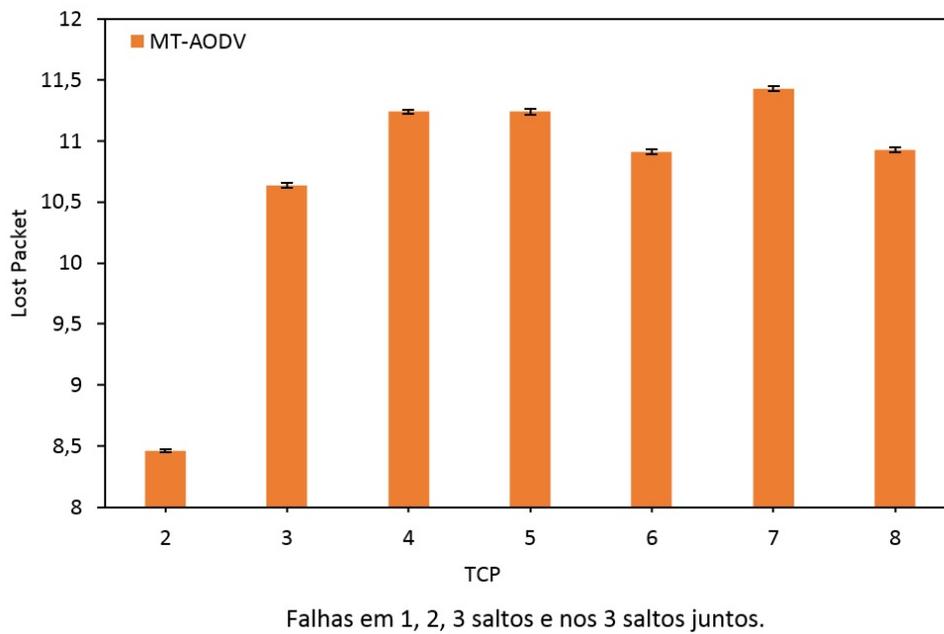


Figura 4.26: Resultados da métrica *lost packet* para o experimento 3 com TCP.

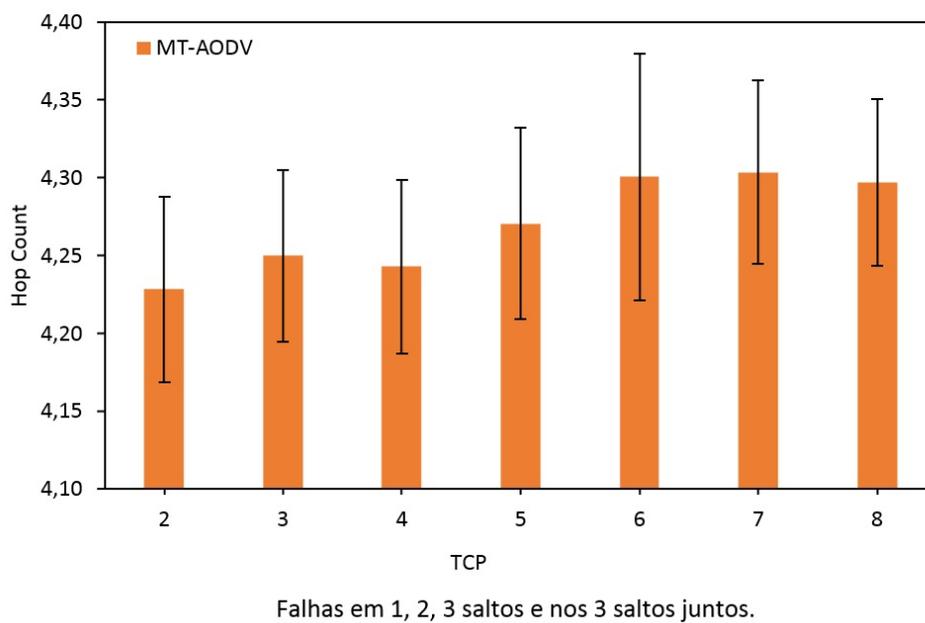


Figura 4.27: Resultados da métrica *hop count* para o experimento 3 com TCP.

Ao se avaliar a Figura 4.28, pode-se observar que o E2ED apresenta valores melhores quando a quantidade de tabelas de roteamento são menores. Quando a quantidade de tabelas estava configurada para duas unidades, os valores das medidas foram, em média, 44,2 ms.

Neste caso, na avaliação do E2ED, o valor máximo foi de 62 ms, como pode ser observado na Tabela 4.23.

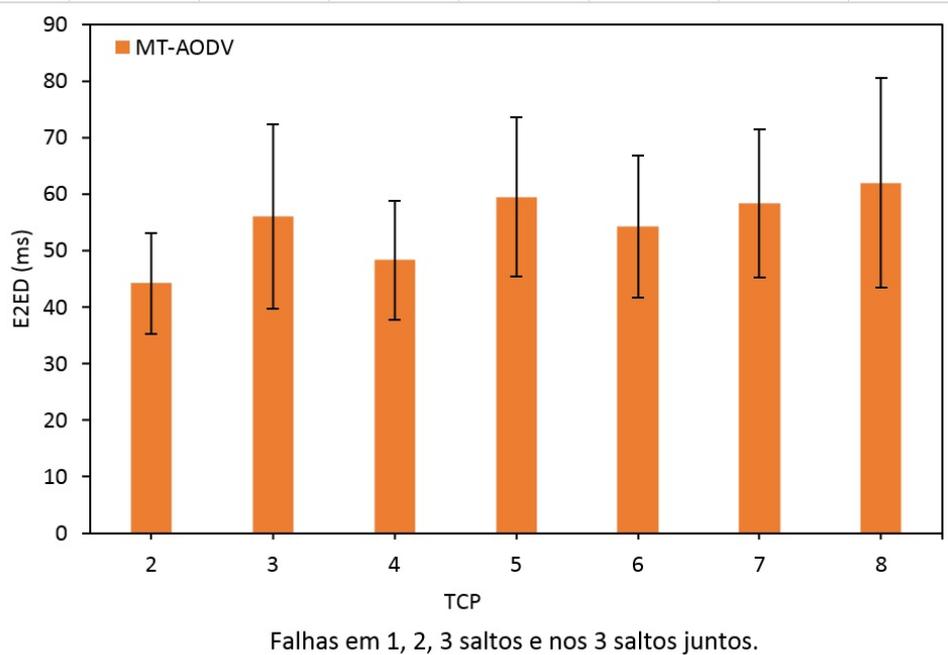


Figura 4.28: Resultados da métrica E2ED para o experimento 3 com TCP.

Tabela 4.23: Resultados numéricos da métrica E2ED para o experimento 3 com TCP.

Quantidade de tabelas	E2ED
2	44,2 ms
3	56,0 ms
4	48,3 ms
5	59,5 ms
6	54,3 ms
7	58,3 ms
8	62,0 ms

4.8 Experimento 4: Nós com movimento variável

Nesta seção, serão realizados testes com os nós com velocidades variáveis entre si mantendo, inicialmente, a proximidade dos testes anteriores, com aproximadamente 40 m de distância entre eles e, posteriormente, uma nova simulação será realizada com a aproximação dos nós, mantendo a distância entre eles em aproximadamente 20 m de distância.

4.8.1 Nós mantendo a proximidade de 40 m

Para o experimento 4 com 40 m, foram utilizadas novas configurações, com base no experimento 1 onde foram implementadas falhas em alguns nós. Já o modelo de mobilidade teve uma alteração significativa, pois, nesse momento, os nós não estarão em velocidade

constante, mas sim em velocidades que podem variar de 9 m/s até 11 m/s.

Tabela 4.24: Parâmetros de configuração para o experimento 4 com 40 m.

Descrição	Parâmetros utilizados
Ambiente simulado	Rodovia
Distância percorrida	1.000 m
Tempo de simulação	100 s
Área de simulação	45.000 m^2
Velocidade dos nós	9 m/s até 11 m/s
Quantidade de nós	20
Protocolo de transporte	UDP
Protocolo de roteamento	AODV, DSDV MT-AODV
Tipo de aplicação	CBR
Tamanho do pacote	256 Bytes
Taxa de transmissão	5 kbit/s
Falha por desconexão	1, 2 e 3 saltos de distância do TX
Modelo de propagação	Espaço livre
Repetições	40
Confiabilidade	95%
Qtd. tabelas de roteamento MT-AODV	2
Proximidade dos nós	40 m

Para o experimento 4 com 40 m, será feita a configuração da mobilidade e do *script* no NS-3 seguindo os parâmetros descritos na Tabela 4.24 e, a seguir, os algoritmos são avaliados com base nas métricas citadas nos parágrafos anteriores.

Observa-se na Figura 4.29 que os nós, no tempo inicial 0 s, estão completamente alinhados e com o passar do tempo, a sua configuração inicial vai sendo desfeita, porém, sempre se mantém a proporcionalidade de distância entre eles de forma que não se perca a possibilidade de criar uma rota entre o nó de origem e o nó destino. Essa variação de velocidade vai se refletir apenas no eixo X, que é o eixo que representa o deslocamento do veículo na pista, não havendo movimentação no eixo Y. Por esse motivo, a configuração do ambiente no final do experimento será bem diferente de quando ele iniciou.

Percebe-se que, na Figura 4.30, durante o período de simulação, diferentes tipos de rotas foram criadas pelo protocolo de roteamento MT-AODV para que o pacote pudesse ser transmitido do nó 0 para o nó 19. Em alguns casos, sendo necessário realizar 4 saltos e em outros casos até 6 saltos foram identificados. Outras rotas foram testadas, mas essas apresentadas são algumas que foram utilizadas em momentos específicos.

Quando avaliamos os protocolos AODV, DSDV e MT-AODV, na Figura 4.31, podemos perceber que o MT-AODV apresentou melhor performance em média do que o

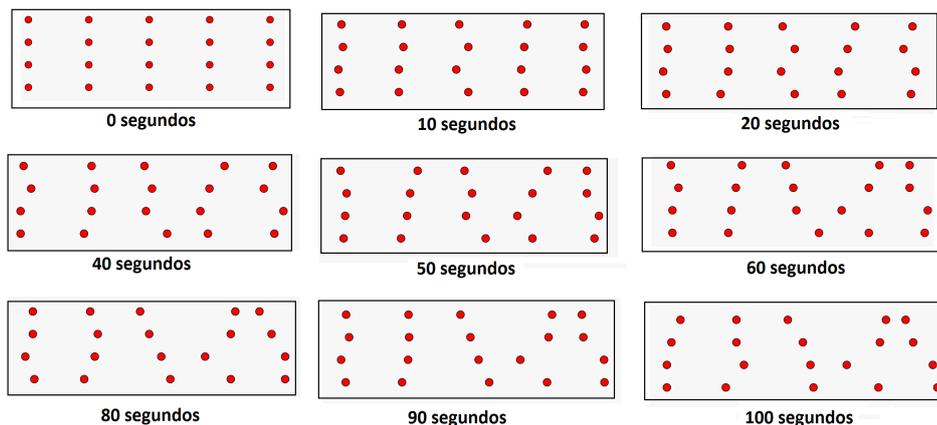


Figura 4.29: Posição dos nós durante a simulação de 100 s.

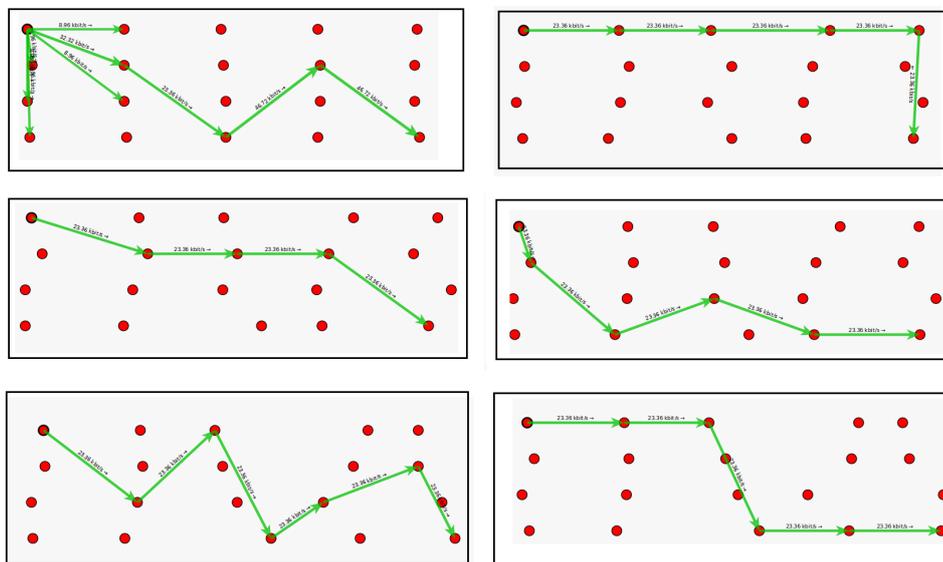


Figura 4.30: Variação de algumas rotas criadas durante a simulação de 100 s.

AODV e do que o DSDV nos casos onde houve falhas no 1º, 2º, 3º saltos e quando ocorreram falhas no 1º, 2º e 3º saltos juntos. Observa-se que, considerando-se a incerteza na medição, é possível dizer que foram estatisticamente similares, com exceção do resultado onde houve falhas combinadas, pois o MT-AODV foi melhor que o AODV e DSDV.

É possível observar na Tabela 4.25 que, comparando o ambiente em que não houve falha com os demais ambientes, todos os protocolos apresentaram valores menores em função de ter encontrado maiores dificuldades em rotear, por conta das falhas. Para o teste onde houve falhas combinadas, o protocolo MT-AODV chegou a apresentar uma melhora de performance, em relação ao AODV de 19%, que foi o melhor resultado apresentado. Em média, o MT-AODV entregou melhores resultados, quando comparado ao AODV, e DSDV em todos os testes onde houve falha. Em média, considerando-se todas as simulações, o

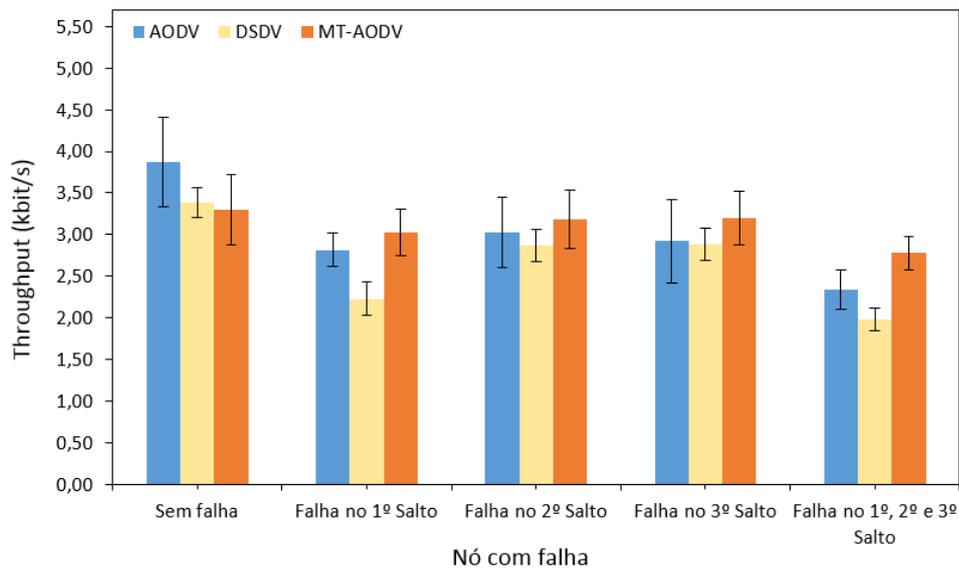


Figura 4.31: Resultados da métrica *throughput* para a simulação do experimento 4 com 40 m.

MT-AODV obteve uma performance final melhor em 4% em relação ao AODV e de 16% em relação ao DSDV.

Tabela 4.25: Resultados numéricos da métrica *throughput* para o experimento 4 com 40 m.

Nó com falha	<i>throughput</i> (kbit/s)			Ganho MT-AODV	
	AODV	DSDV	MT-AODV	AODV	DSDV
	Sem falha	3,9 ± 0,5	3,4 ± 0,2	3,3 ± 0,4	-15%
1º salto	2,8 ± 0,2	2,2 ± 0,2	3,0 ± 0,3	7%	36%
2º salto	3,0 ± 0,4	2,9 ± 0,2	3,2 ± 0,3	5%	11%
3º salto	2,9 ± 0,5	2,9 ± 0,2	3,2 ± 0,3	10%	11%
1º, 2º e 3º salto	2,3 ± 0,2	2,0 ± 0,1	2,8 ± 0,2	19%	40%

Na Figura 4.32, observa-se que o comportamento do PDR acompanha as características do *throughput* citado no parágrafo anterior, onde o MT-AODV apresentou melhor performance em média do que o AODV e o DSDV em todas as simulações onde ocorreu falhas no ambiente. Considerando a margem de incerteza, pode-se dizer que foram similares, com exceção do experimento onde ocorreram falhas combinadas, no qual o MT-AODV apresentou melhor resultado final.

Os valores numéricos da média da Figura 4.32 podem ser observados na Tabela 4.26. Isso deixa claro que, embora os valores sejam bem próximos, considerando a média de todas as simulações, o MT-AODV apresentou resultado superior em 2%. O ambiente que tinha falha combinada apresenta a maior margem de resultado médio entre o valor médio

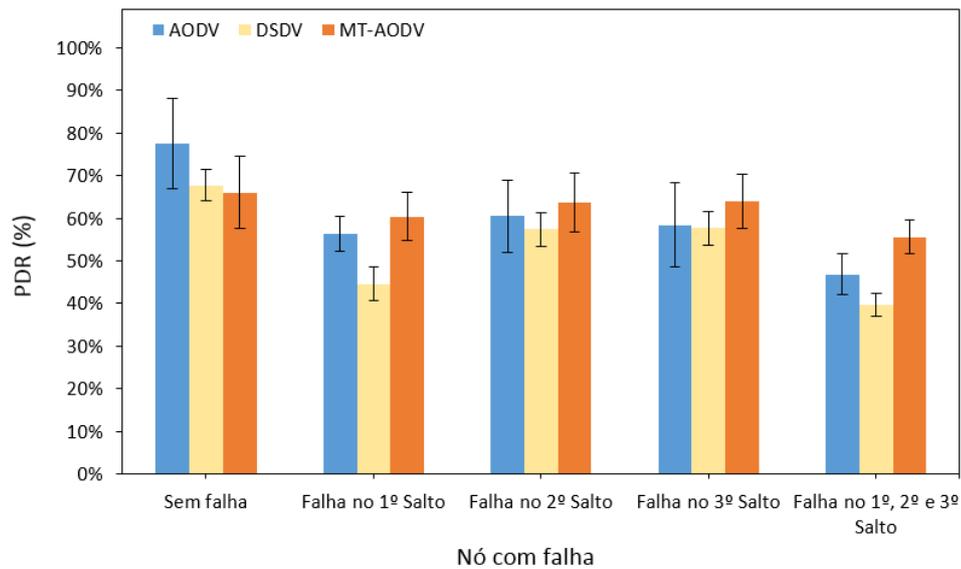


Figura 4.32: Resultados da métrica PDR para a simulação do experimento 4 com 40 m.

do AODV e do MT-AODV, chegando a uma melhora de performance de 19%. O mesmo pode ser observado quando comparamos o protocolo MT-AODV com o DSDV, porém, nesse caso, chegando a uma melhora de performance de 40%.

Tabela 4.26: Resultados numéricos da métrica PDR para o experimento 4 com 40 m.

Nó com falha	PDR (%)				
	AODV	DSDV	MT-AODV	Ganho MT-AODV	
				AODV	DSDV
Sem falha	78 ± 11	68 ± 4	66 ± 8	-15%	-2%
1º salto	56 ± 4	45 ± 4	60 ± 6	7%	36%
2º salto	60 ± 8	57 ± 4	64 ± 7	5%	11%
3º salto	58 ± 10	58 ± 4	64 ± 6	10%	11%
1º, 2º e 3º salto	47 ± 5	40 ± 3	56 ± 4	19%	40%

Quando se analisa o percentual de carga de controle da simulação, na Figura 4.33, identificamos que o protocolo MT-AODV apresenta maiores valores do que o AODV em todas as simulações, sendo que, nos ambientes com falha combinada, a diferença de desempenho foi mais acentuada. Em relação ao DSDV, também teve maior carga de controle, com exceção ao ambiente onde não houve falhas. Conforme ocorrem interrupções de enlace durante uma transmissão, faz-se necessário recalculas as rotas para o destino. Dessa forma, o MT-AODV aumenta a quantidade de mensagens para operação na rede.

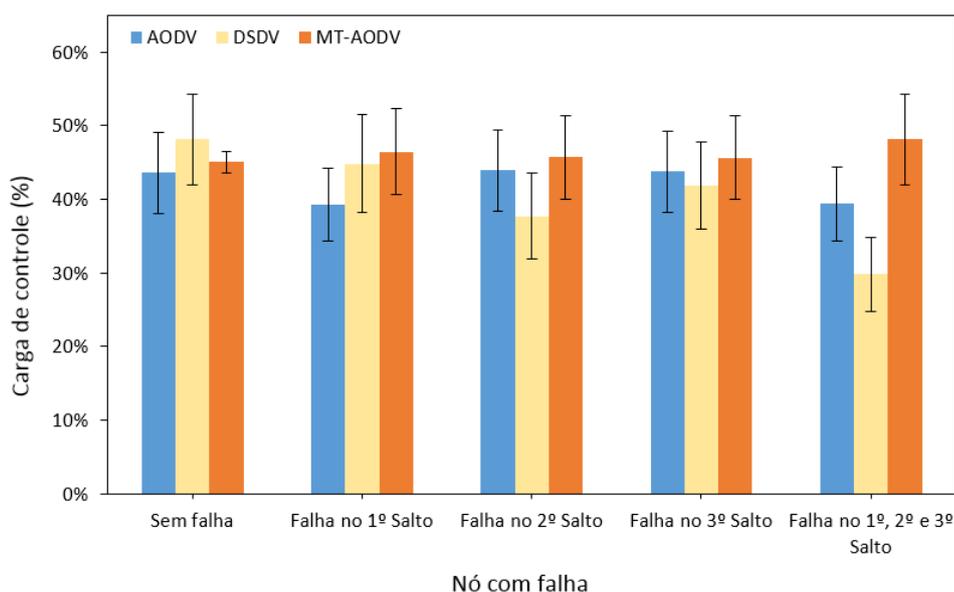


Figura 4.33: Resultados da métrica carga de controle para a simulação do experimento 4 com 40 m.

4.8.2 Nós mantendo a proximidade de 20 m

Nesta configuração, foi utilizado como base o experimento 4 com 40 m, onde os nós estarão com velocidade aleatória entre si variando de 9 m/s até 11 m/s, porém, neste caso, a distância inicial entre os nós é reduzida em relação ao experimento anterior. No início da simulação do experimento 4, os nós apresentavam uma distância de 40 m, enquanto agora, os nós iniciarão com distâncias máximas de 20 m.

Para o experimento 4 com 20 m, será feita a configuração da mobilidade e do *script* no NS-3 seguindo os parâmetros descritos na Tabela 4.27 e então, é avaliado com base nas métricas citadas nos parágrafos anteriores.

Da mesma forma que o experimento 4 com 40 m, observa-se na Figura 4.34 que os nós, no tempo 0 s, estão completamente alinhados e, com o passar do tempo, a sua configuração inicial vai sendo desfeita, porém sempre mantendo uma proporcionalidade de distância entre esses nós de forma que não se perca a possibilidade de criar uma rota entre o nó transmissor e o nó receptor. Essa variação de velocidade vai se refletir apenas no eixo X, que é o eixo que representa o deslocamento do veículo na pista, não havendo movimentação no eixo Y. Como as distâncias no início do experimento 4 são diferentes deste teste agora e a variação da velocidade dos nós é aleatória, a configuração deles ao longo da simulação terá formas diferentes no início do experimento 4, quando comparado ao próximo teste.

Tabela 4.27: Parâmetros de configuração para o experimento 4 com 20 m.

Descrição	Parâmetros utilizados
Ambiente simulado	Rodovia
Distância percorrida	1.000 m
Tempo de simulação	100 s
Área de simulação	45.000 m^2
Velocidade dos nós	9 m/s até 11 m/s
Quantidade de nós	20
Protocolo de transporte	UDP
Protocolo de roteamento	AODV, MT-AODV e DSDV
Tipo de aplicação	CBR
Tamanho do pacote	256 Bytes
Taxa de transmissão	5 kbit/s
Falha por desconexão	1, 2 e 3 saltos de distância do TX
Modelo de propagação	Espaço livre
Repetições	40
Confiabilidade	95%
Proximidade dos nós	20 m

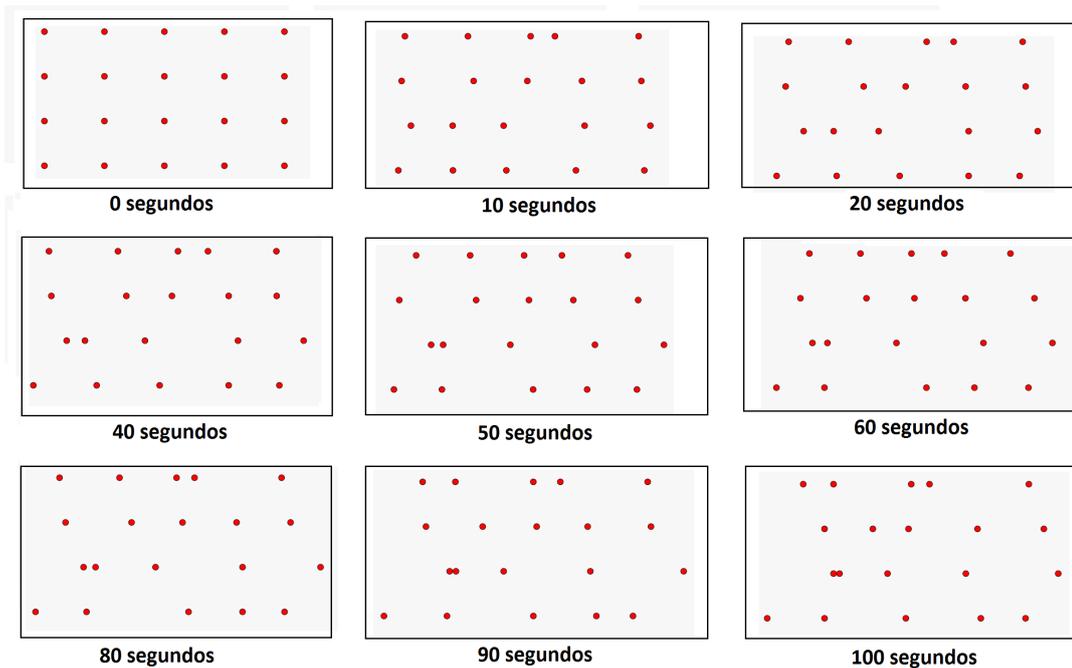


Figura 4.34: Variação de algumas rotas criadas durante a simulação de 100 s para o experimento 4 com 20 m.

Percebe-se na Figura 4.35 que, durante o período de simulação, diferentes tipos de rotas foram criadas, pelo MT-AODV, para que o pacote pudesse ser transmitido do nó 0 para o nó 19. Quando comparado o cenário de 40 m com este, fica evidente que haverá uma quantidade menor de saltos no experimento 4 com 20 m, por conta da proximidade dos nós.

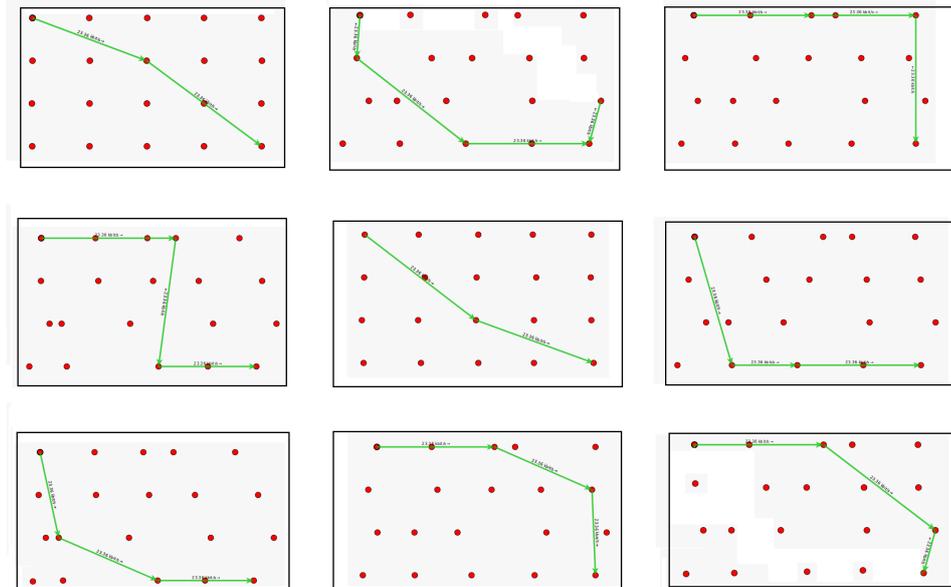


Figura 4.35: Variação de algumas rotas criadas durante a simulação de 100 s para o experimento 4 com 20 m.

Quando avaliamos a Figura 4.36, podemos observar que a média do *throughput* desta simulação é superior ao da simulação do experimento 4 com 40 m. Isso se deve à menor distância total entre o nó de origem até o nó de destino, e também por ocorrerem menos saltos para que os pacotes fossem transmitidos da origem até o destino. O protocolo MT-AODV apresentou melhores resultados em média nos casos onde houve falhas a 1, 2 e 3 saltos de distância do nó transmissor e onde houveram falhas combinadas, sendo superior aos protocolos AODV e DSDV. Em todos os casos onde ocorreram falhas no ambiente, o protocolo MT-AODV apresentou uma média de *throughput* maior que a dos demais protocolos testados. Porém, quando consideramos a margem de incerteza, percebemos que os resultados foram estatisticamente similares.

Observando a Tabela 4.28 veremos que, no caso onde ocorreram falhas nos 3 saltos, a performance do protocolo MT-AODV foi superior ao AODV em 16%, e ao DSDV em 34%. O AODV teve uma taxa média de 3,8 kbit/s, o DSDV 3,75 kbits/s e o MT-AODV 3,95 kbit/s. A média de todas as simulações o AODV teve uma melhora de performance em relação ao AODV de 4% e em relação ao DSDV em, 5%.

Ao se avaliar a Figura 4.37, é possível observar que o PDR também teve o mesmo comportamento apresentado na métrica *throughput* mencionada anteriormente, onde o MT-AODV apresentou melhores resultados em média nos casos onde houve falhas a 1, 2 e 3 saltos de distância do nó transmissor e onde houve falha combinada em todos os saltos. Fica evidente nessa figura o fato de que, em geral, os números apresentados foram

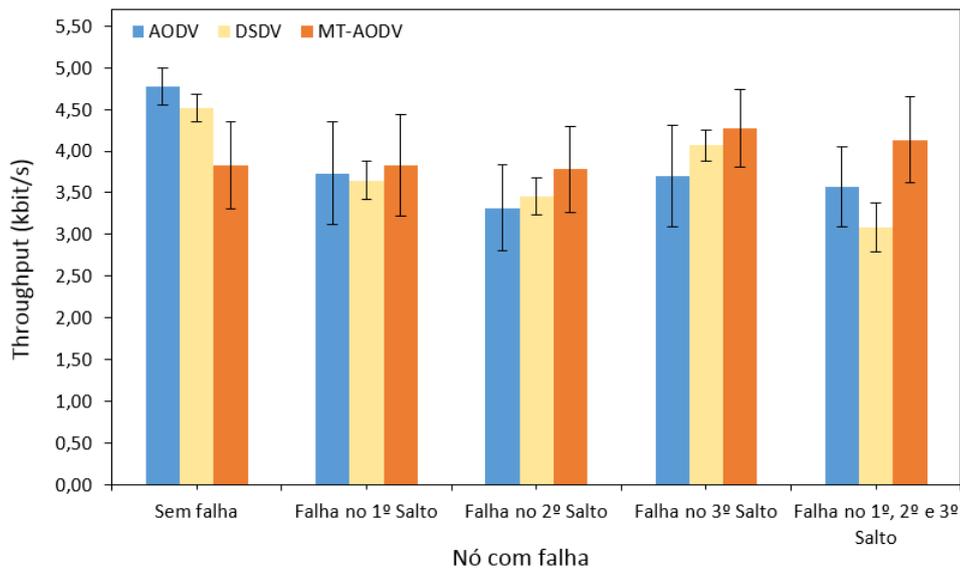


Figura 4.36: Resultados da métrica *throughput* para a simulação do experimento 4 com 20 m.

Tabela 4.28: Resultados numéricos da métrica *throughput* para o experimento 4 com 20 m.

Nó com falha	<i>throughput</i> (kbit/s)			Ganho do MT-AODV	
	AODV	DSDV	MT-AODV	AODV	DSDV
Sem falha	4,8 ± 0,2	4,5 ± 0,2	3,8 ± 0,5	-20%	-15%
1º salto	3,7 ± 0,6	3,6 ± 0,2	3,8 ± 0,6	3%	5%
2º salto	3,3 ± 0,5	3,5 ± 0,2	3,8 ± 0,5	1%	9%
3º salto	3,7 ± 0,6	4,1 ± 0,2	4,1 ± 0,5	15%	5%
1º, 2º e 3º salto	3,6 ± 0,5	3,1 ± 0,3	3,1 ± 0,5	16%	34%

maiores do que no experimento 4 com 40 m, por conta da proximidade dos nós durante a simulação. Considerando a margem de incerteza, os experimentos foram estatisticamente similares.

Como foi citado anteriormente, sobre a proximidade dos nós serem diferentes nesse último teste em relação ao teste no início do experimento 4, observa-se na Figura 4.38 que, em média, houve menos saltos nessa simulação, ficando a média entre 2 e 2,5 saltos. Pode ser observado que, dentre os três protocolos testados, o DSDV foi o que apresentou maior média de saltos durante as simulações, tanto no ambiente sem falha quanto no ambiente com falhas.

A métrica carga de controle, apresentada na Figura 4.39, deixa claro que o protocolo MT-AODV gera uma maior carga de controle para seu funcionamento, onde, em todos os casos testados, MT-AODV apresenta um valor maior que o AODV, sendo o caso que

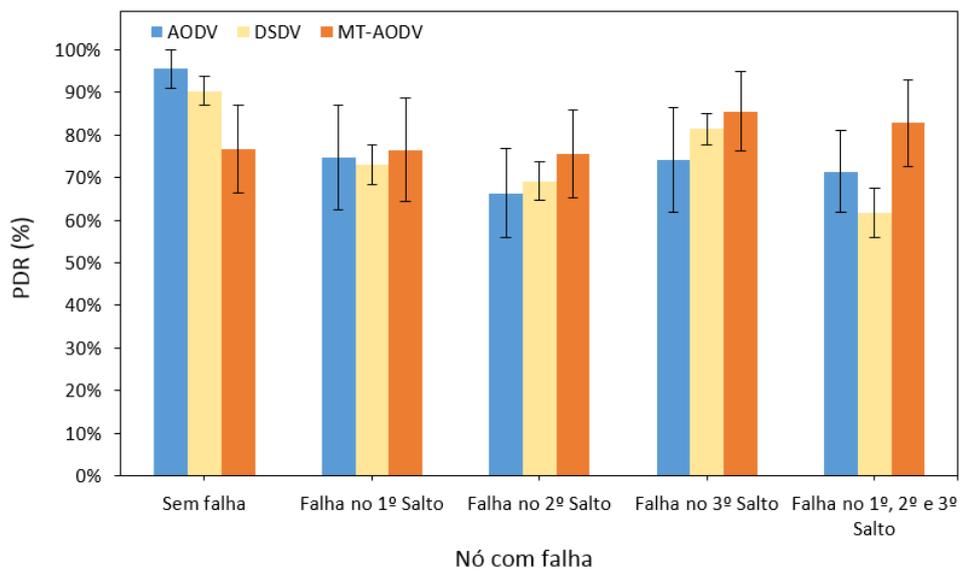


Figura 4.37: Resultados da métrica PDR para a simulação do experimento 4 com 20 m.

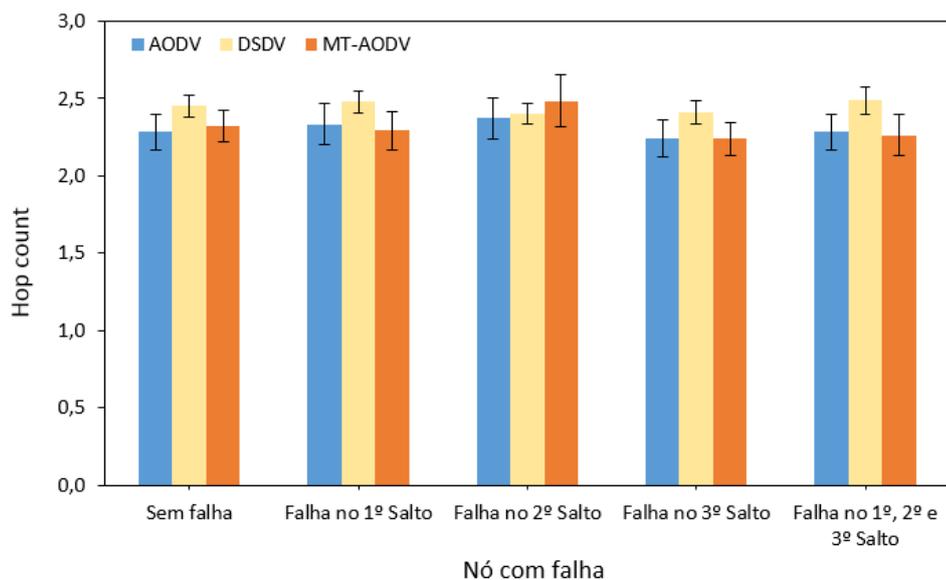


Figura 4.38: Resultados da métrica HopCount para a simulação do experimento 4 com 20 m.

gera maior margem foi onde ocorreram falhas a 1 e 3 saltos de distância. O caso em que os algoritmos praticamente apresentaram o mesmo valor foi onde não houve falhas. Isso ocorreu, pois, quando não há falhas, o ambiente fica mais controlado, evitando-se a execução de novos cálculos de rota. Quando o MT-AODV é comparado com o DSDV, MT-AODV apresenta menores resultados, pois o DSDV é um protocolo de comportamento proativo e tende a ter um maior número de pacotes transmitidos por conta da busca constante por novas rotas.

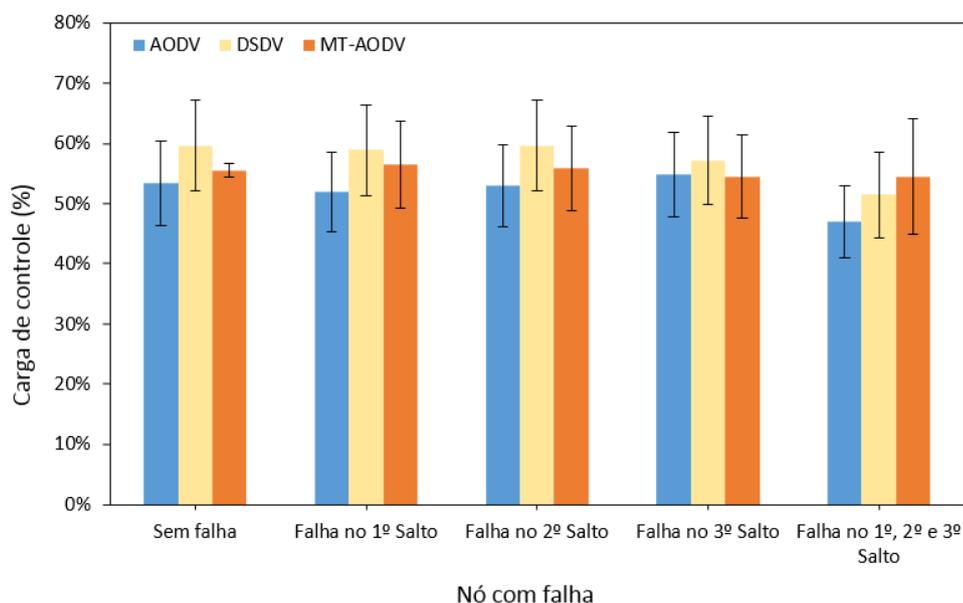


Figura 4.39: Resultados da métrica carga de controle para a simulação do experimento 4 com 20 m.

4.9 Experimento 5: Incremento na quantidade de Nós

Para o experimento 5, foram seguidas as configurações do experimento 4, onde houve uma aproximação dos nós. Houve uma alteração na velocidade média dos veículos saindo de uma média de 10 m/s para 15 m/s. Também foi modificada a quantidade de nós da simulação, saindo de 20 nós para 30 nós. Como no experimento anterior, são inseridas falhas aleatórias em alguns nós, com o objetivo de forçar a comunicação seguir por outro caminho, para avaliar a performance do protocolo MT-AODV quando submetido a um ambiente veicular com falhas na comunicação.

Para o experimento 5, é feita a configuração da mobilidade e do *script* no NS-3 seguindo os parâmetros descritos na Tabela 4.29 e então, o experimento é avaliado com base nas métricas citadas nos parágrafos anteriores.

Da mesma forma que no experimento 4 com 20 m, observa-se na Figura 4.40 que a posição dos nós, com o passar do tempo, vai perdendo sua configuração inicial, porém sempre se mantém a proporcionalidade de distância entre os nós de forma que não se perca a possibilidade de criar uma rota entre o nó transmissor e o nó receptor. Essa variação de velocidade vai refletir apenas no eixo X, que é o eixo que representa o deslocamento do veículo na pista, não havendo movimentação no eixo Y. Como as distâncias iniciais do experimento 5 são diferentes do experimento 4 com 20 m e a variação da velocidade dos nós é aleatória, a configuração dos nós ao longo da simulação terá formas diferentes

Tabela 4.29: Parâmetros de configuração para o experimento 5.

Descrição	Parâmetros utilizados
Ambiente simulado	Rodovia
Distância percorrida	1.000 m
Tempo de simulação	100 s
Área de simulação	45.000 m^2
Velocidade dos nós	15 m/s
Quantidade de nós	30
Protocolo de transporte	UDP
Protocolo de roteamento	AODV, e MT-AODV
Tipo de aplicação	CBR
Tamanho do pacote	256 Bytes
Taxa de transmissão	5 kbit/s
Falha por desconexão	Aleatória
Modelo de propagação	Espaço livre
Repetições	40
Confiabilidade	95%
Qtd. tabelas de roteamento MT-AODV	2

no experimento 5 quando comparado ao experimento 4 com 20 m. Também é possível perceber que haverá mais interações visto que houve um acréscimo de 50% na quantidade de nós na rede.

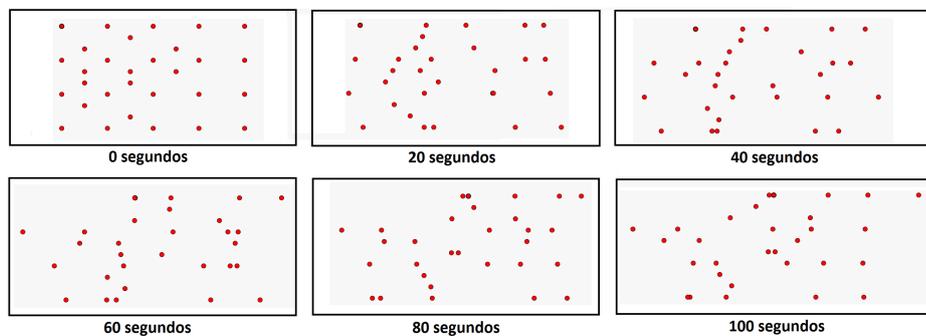


Figura 4.40: Posição dos nós com o passar do tempo da simulação do experimento 5.

Percebe-se na Figura 4.41 que, durante o período de simulação, diferentes tipos de rotas foram criadas, pelo MT-AODV, para que o pacote pudesse ser transmitido do nó 0 para o nó 19. Quando comparado o experimento anterior com este, fica evidente que há uma quantidade maior de interação de comunicação pois houve um acréscimo de nós em 50%.

Quando se avalia a Figura 4.42, pode-se observar que os protocolos AODV e DSDV tiveram um desempenho pior quando são realizados os testes em um ambiente sem falha e em um ambiente com falha. O protocolo MT-AODV se mantém estável quando

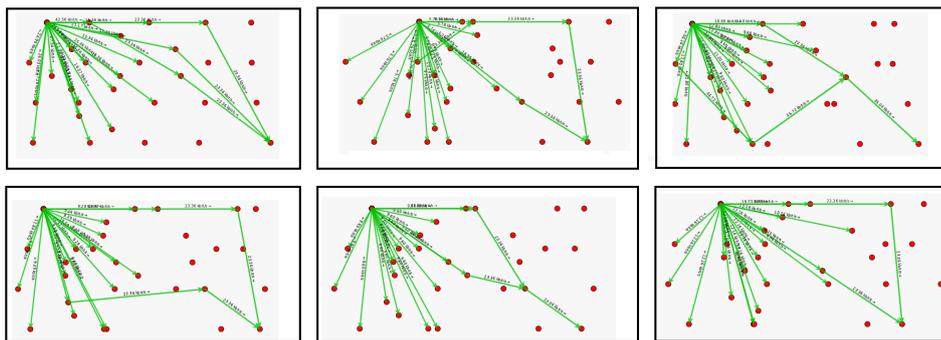


Figura 4.41: Rotas criadas durante a simulação do experimento 5.

há a variação de ambiente com e sem falhas. Conseqüentemente, os testes realizados pelo MT-AODV no ambiente, com falhas aleatórias, apresentam melhores resultados de *throughput* quando comparados ao protocolo AODV, porém não é superior ao do teste com o DSDV. Quando se considera a margem de incerteza, são considerados similares. Os três protocolos AODV, MT-AODV e DSDV são testados a uma taxa de 5 kbits/s. O motivo pelo qual os valores finais dos testes ficaram abaixo de 3,5 kbits/s são fatores como solicitações de descoberta de rota, que levam a um aumento na sobrecarga da rede, o que resulta em congestionamento e atrasos na transmissão de dados. Outro fator é a distância entre os nós, pois, com o aumento da velocidade média, há um distanciamento maior entre os nós durante a simulação. Verifica-se que o tráfego de rede aumenta, com um incremento de 50% na quantidade de nós na rede.

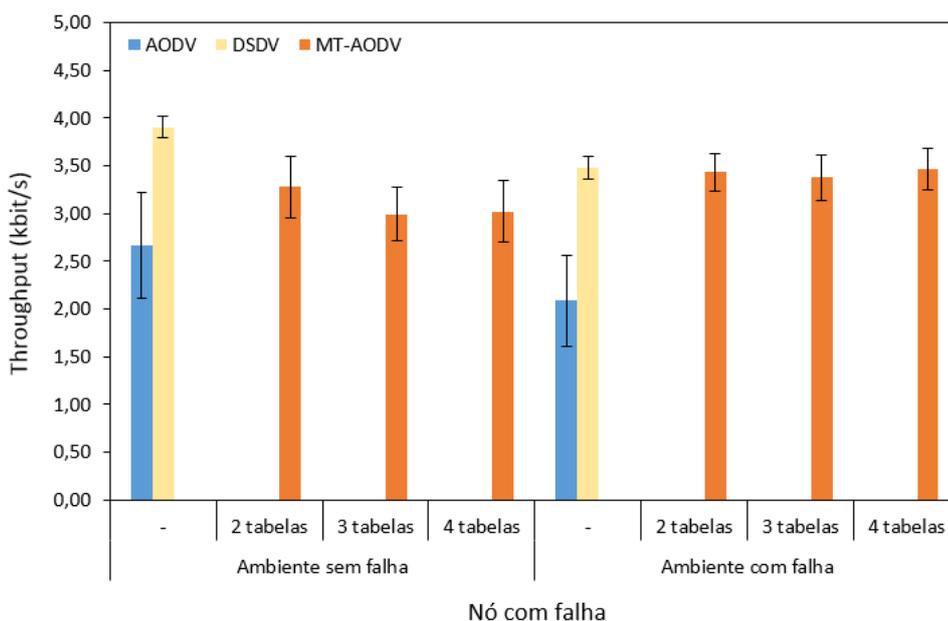


Figura 4.42: Resultados do *throughput* para a simulação do experimento 5.

Na Tabela 4.30, pode-se perceber o comportamento dos protocolos no ambiente onde

não há falhas. É possível comparar o teste do protocolo AODV e DSDV com o protocolo MT-AODV nas configurações de 2, 3 e 4 tabelas de roteamento. Neste experimento, o protocolo DSDV apresenta melhor resultado quando comparados com os testes de 2, 3 e 4 tabelas do MT-AODV, pois por atuar de forma pró-ativa, nesse experimento não perdeu tantos pacotes quanto os demais protocolos, visto que atualizou antecipadamente sua tabela de roteamento com o caminho adequado para o destino. O protocolo AODV não consegue ter uma boa performance em relação ao MT-AODV, pois no ambiente com muitas interação e com grande quantidade de veículos próximos, quando o protocolo precisa recalculer um novo caminho, acaba perdendo mais pacotes que o MT-AODV, conseqüentemente, teve um menor *throughput* médio.

Tabela 4.30: Resultados numéricos da métrica *throughput* para o experimento 5 sem falhas.

<i>throughput</i> (kbit/s) - Ambiente sem falha					
Qtd. tabelas de roteamento	AODV	DSDV	MT-AODV	Ganho MT-AODV	
				AODV	DSDV
-	2,7 ±0,6	3,9 ±0,1			
2 tabelas			3,3 ±0,3	23%	-16%
3 tabelas			3,0 ±0,3	12%	-23%
4 tabelas			3,0 ±0,3	13%	-23%

Na Tabela 4.31, são apresentados os resultados dos testes dos protocolos, agora no ambiente com falhas. É possível comparar o teste do protocolo AODV e DSDV com o protocolo MT-AODV nas configurações de 2, 3 e 4 tabelas de roteamento. Neste experimento, fica evidente que o protocolo MT-AODV apresenta melhor resultado nos testes de 2, 3 e 4 tabelas quando comparado com o teste do AODV, pois da mesma forma que perdeu muitos pacotes no ambiente sem falhas, quando as falhas são inseridas, o comportamento piora. O MT-AODV não é superior ao DSDV, pois considerando a margem de incerteza, são considerados estatisticamente similares.

Tabela 4.31: Resultados numéricos da métrica *throughput* para o experimento 5 com falhas.

<i>throughput</i> (kbit/s) - Ambiente com falha					
Qtd. tabelas de roteamento	AODV	DSDV	MT-AODV	Ganho MT-AODV	
				AODV	DSDV
-	2,1 ±0,5	3,5 ±0,1			
2 tabelas			3,4 ±0,2	65%	-1%
3 tabelas			3,4 ±0,2	62%	-2%
4 tabelas			3,5 ±0,2	66%	-0%

Quando a métrica PDR é avaliada, é possível observar na Figura 4.43 que o protocolo

MT-AODV apresenta melhores resultados em média quando comparado ao AODV no ambiente onde ocorreram falhas durante a simulação. Em comparação ao DSDV, o resultado não é superior. Quando o ambiente não apresenta falhas, percebe-se que os protocolos apresentam valores próximos quando se considera a margem de incerteza. Fica evidente que nos 2 testes, com e sem falha, o protocolo MT-AODV tende a não sofrer tanto com a variação de falhas no ambiente, mostrando ser mais resiliente para casos como esse. O protocolo AODV tem uma redução grande quando é submetido a um ambiente com falhas.

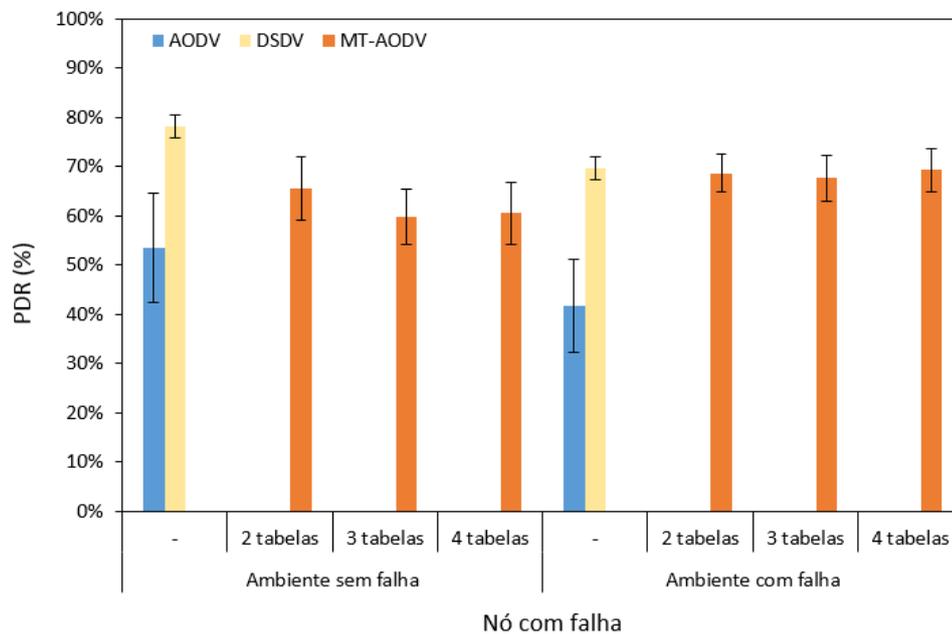


Figura 4.43: Resultados do PDR para a simulação do experimento 5.

Na Tabela 4.32, pode-se perceber o comportamento dos protocolos no ambiente onde não há falhas. É possível comparar o teste dos protocolos AODV e DSDV com o protocolo MT-AODV nas configurações de 2, 3 e 4 tabelas de roteamento. Nesse experimento, os protocolos AODV não apresenta melhor resultado quando comparados com os testes de 2, 3 e 4 tabelas do MT-AODV. O protocolo DSDV apresenta estatisticamente o mesmo resultado do MT-AODV quando se considera a margem de incerteza. O PDR apresentou um comportamento semelhante ao teste do *throughput*, onde o AODV não teve boa performance, em virtude das perdas de pacotes que ocorreram na simulação.

Na Tabela 4.33, são apresentados os resultados dos testes dos protocolos no ambiente onde, neste caso, houve falhas. É possível comparar o teste dos protocolos AODV e DSDV com o protocolo MT-AODV nas configurações de 2, 3 e 4 tabelas de roteamento. O protocolo MT-AODV apresenta melhor resultado nos testes de 2, 3 e 4 tabelas quando

Tabela 4.32: Resultados numéricos da métrica PDR para o experimento 5 sem falhas.

PDR (%) - Ambiente sem falha					
Qtd. tabelas de roteamento	AODV	DSDV	MT-AODV	Ganho MT-AODV	
				AODV	DSDV
-	53 ±11	78 ±2			
2 tabelas			66 ±6	23%	-16%
3 tabelas			60 ±6	12%	-23%
4 tabelas			61 ±6	13%	-23%

comparado ao teste do AODV, chegando a superar em 66%, porém não é superior ao resultado do DSDV, pois apresentam estatisticamente os mesmos resultados, considerando a margem de incerteza observada.

Tabela 4.33: Resultados numéricos da métrica PRD para o experimento 5 com falhas.

PDR (%) - Ambiente com falha					
Qtd. tabelas de roteamento	AODV	DSDV	MT-AODV	Ganho MT-AODV	
				AODV	DSDV
-	42 ±10	70 ±2			
2 tabelas			69 ±4	65%	-1%
3 tabelas			68 ±5	62%	-3%
4 tabelas			69 ±4	66%	-1%

Avaliando-se a métrica E2ED, na Figura 4.44, pode-se perceber que o protocolo MT-AODV apresentou melhores resultados, em média, quando comparado ao AODV no ambiente onde ocorrem falhas durante a simulação. O DSDV em ambos os testes, com e sem falhas, apresenta um resultado pior que os outros dois protocolos. Quando o ambiente não apresenta falhas, o protocolo AODV apresenta valores de E2ED mais baixos que os valores do MT-AODV. Observa-se também que o protocolo MT-AODV se mantém estável quando se realiza a simulação com e sem falhas no ambiente, mostrando-se resiliente nesse cenário, pois, em média, seus valores não variaram muito. O aumento da quantidade de falhas no ambiente faz com que o AODV realize mais solicitações de roteamento para descobrir caminhos alternativos em torno das falhas. Essas solicitações levam a um aumento no E2ED, já que a descoberta de rotas alternativas pode levar mais tempo. Falhas na rede ocasionam retransmissões de pacotes, o que aumenta ainda mais o E2ED. O DSDV, por ser um protocolo pró-ativo, pode não funcionar bem em redes grandes e dinâmicas, pois as tabelas de roteamento crescem com o tamanho e a densidade da rede. A sobrecarga de anúncios de rotas de inundação para manter a convergência acaba por causar atrasos na comunicação e por conta disso, seus valores foram bem mais elevados que os valores dos protocolos AODV e MT-AODV.

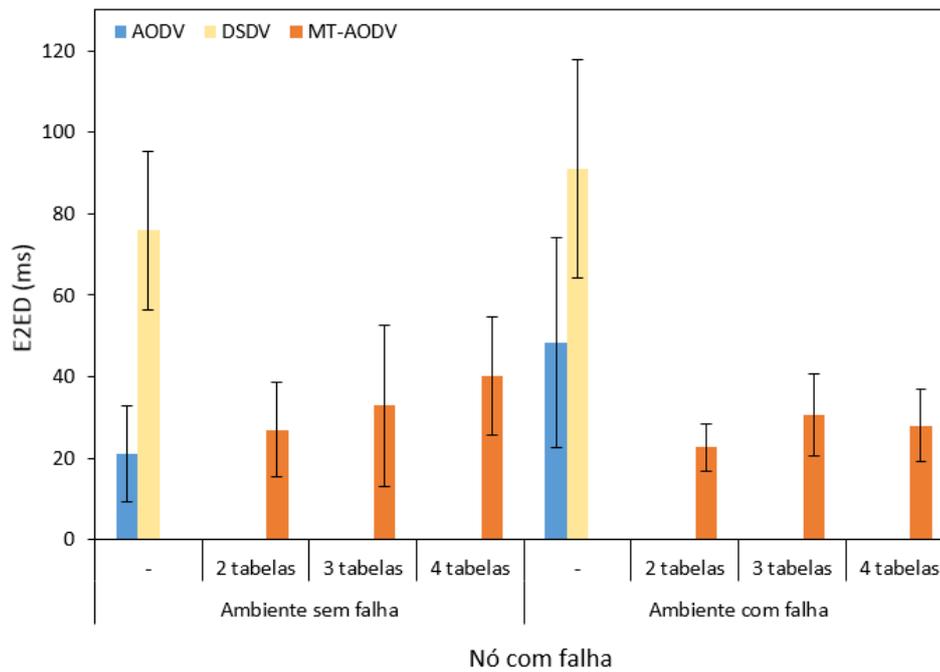


Figura 4.44: Resultados do E2ED para a simulação do experimento 5.

Na Tabela 4.34, pode-se perceber o comportamento dos protocolos no ambiente onde não houve falhas. É possível comparar o teste do protocolo AODV e DSDV com o protocolo MT-AODV nas configurações de 2, 3 e 4 tabelas de roteamento. Neste experimento, o protocolo AODV apresentou um valor médio de E2ED de 21 ms, o que fica abaixo dos valores do protocolo MT-AODV, com resultados de 27 ms, 33 ms e 40 ms nas configurações de tabelas de roteamento 2, 3 e 4 respectivamente e também em comparação com o DSDV que apresentou um valor de 76 ms.

Tabela 4.34: Resultados numéricos da métrica E2ED para o experimento 5 sem falhas.

E2ED (ms) - Ambiente sem falha				
Qtd. tabelas de roteamento	AODV	DSDV	MT-AODV	Ganho MT-AODV
				AODV
-	21 ±12	76 ±20		
2 tabelas			27 ±12	-22% 181%
3 tabelas			33 ±20	-36% 130%
4 tabelas			40 ±15	-48% 89%

Na Tabela 4.35, são apresentados os resultados dos testes dos protocolos no ambiente onde, nesse caso, houve falhas. É possível comparar o teste do protocolo AODV e DSDV com o protocolo MT-AODV nas configurações de 2, 3 e 4 tabelas de roteamento. O protocolo MT-AODV apresentou melhor resultado nos testes de 2, 3 e 4 tabelas quando comparado com o teste do AODV. MT-AODV apresenta um desempenho superior, com valor máximo de 114% quando configurado com 2 tabelas de roteamento, e o menor valor

ficou em 58% quando configurado com 3 tabelas de roteamento. Em comparação com o protocolo DSDV, o desempenho do MT-AODV foi superior em mais de 300%.

Tabela 4.35: Resultados numéricos da métrica E2ED para o experimento 5 com falhas.

E2ED (ms) - Ambiente com falha					
Qtd. tabelas de roteamento	AODV	DSDV	MT-AODV	Ganho MT-AODV	
				AODV	DSDV
-	48 ±26	91 ±27			
2 tabelas			23 ±6	114%	302%
3 tabelas			31 ±10	58%	198%
4 tabelas			28 ±9	73%	226%

Quando avaliamos a Figura 4.45, podemos observar que os protocolos AODV e DSDV tiveram aumento na quantidade de perda de pacotes quando foram submetidos ao ambiente com falhas. Percebe-se ainda que, no ambiente sem falhas, o protocolo MT-AODV não teve comportamento semelhante ao do AODV e que teve melhor resultado quando utilizadas 3 tabelas de roteamento. Em um ambiente com falhas, é possível perceber que o protocolo MT-AODV teve menos perda de pacotes nas configurações de 2, 3 e 4 tabelas de roteamento, porém o DSDV apresentou menos perda em relação aos demais. Embora o DSDV tenha apresentado em média uma menor quantidade de perda de pacotes, ele apresenta um valor muito alto de E2ED conforme pode ser observado na figura e tabelas anteriores.

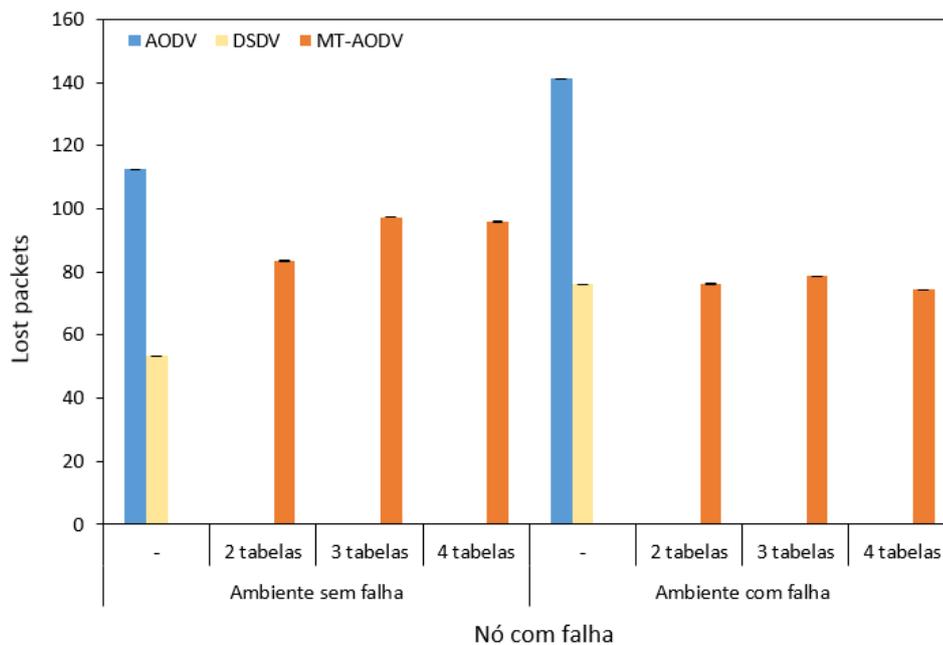


Figura 4.45: Quantidade de pacotes perdidos para o experimento 5.

Na Tabela 4.36, podemos perceber o comportamento dos protocolos no ambiente onde

não houve falhas. É possível comparar o teste do protocolo AODV e DSDV com o protocolo MT-AODV nas configurações de 2, 3 e 4 tabelas de roteamento. Neste experimento, o protocolo AODV apresenta um valor médio de 112 pacotes perdidos, o DSDV 53, enquanto o protocolo MT-AODV, apresenta, nas configurações de 2, 3 e 4 tabelas, respectivamente, 83, 97 e 96 pacotes perdidos durante a simulação. O protocolo MT-AODV teve uma melhora máxima de performance em relação ao AODV 35% na configuração de 2 tabelas.

Tabela 4.36: Quantidade de pacotes perdidos para o experimento 5 sem falhas.

Lost Packets - Ambiente sem falha					
Qtd. tabelas de roteamento	AODV	DSDV	MT-AODV	Ganho MT-AODV	
				AODV	DSDV
-	112 \pm 0,11	53 \pm 0,02			
2 tabelas			83 \pm 0,06	35%	-36%
3 tabelas			97 \pm 0,06	16%	-45%
4 tabelas			96 \pm 0,06	17%	-44%

Na Tabela 4.37, pode-se perceber que o protocolo AODV apresenta um valor médio de 141 pacotes perdidos, o DSDV 76, enquanto o protocolo MT-AODV, apresenta, nas configurações de 2, 3 e 4 tabelas, respectivamente, 76, 79 e 74 pacotes perdidos durante a simulação. Como é esperado, a simulação com falhas apresenta uma maior perda de pacotes, pois quando ocorre a falha em algum nó da rede, é necessário recalcular rotas, aumentando a sobrecarga na rede por solicitações de novas rotas. O protocolo MT-AODV tem uma melhora de desempenho em relação ao AODV em 85%, 80% e 90% nas configurações de 2, 3 e 4 tabelas, respectivamente. Isso resulta em uma média de 85% de melhora quando consideramos todas as simulações. Em comparação com o DSDV, o MT-AODV teve melhor performance máxima de 2% na configuração com 4 tabelas de roteamento.

Tabela 4.37: Quantidade de pacotes perdidos para o experimento 5 com falhas.

Lost Packets - Ambiente com falha					
Qtd. tabelas de roteamento	AODV	DSDV	MT-AODV	Ganho MT-AODV	
				AODV	DSDV
-	141 \pm 0,09	76 \pm 0,02			
2 tabelas			76 \pm 0,04	85%	0%
3 tabelas			79 \pm 0,05	80%	-3%
4 tabelas			74 \pm 0,04	90%	2%

Capítulo 5

Conclusão

O estudo de redes veiculares V2V envolve manter a comunicação em um ambiente com dificuldades diversas. Muitos protocolos tiveram suas performances avaliadas na literatura, porém, até onde sabemos, nunca houve uma avaliação com um protocolo desenvolvido originalmente para aplicações em MANET / WBAN em ambiente veicular V2V. A avaliação do protocolo de roteamento MT-AODV, que evoluiu a partir do protocolo AODV, e com a finalidade de ser aplicado em monitoramento de saúde de militares em operações, também mostrou ser uma opção para utilização em redes VANETs. Esta dissertação propõe avaliar o protocolo MT-AODV e outros protocolos baseados em topologia em variados ambientes veiculares com a utilização do simulador de redes de eventos discretos NS-3.

As simulações tiveram como base um teste inicial e posteriores evoluções desse cenário com variações que pudessem comprovar a performance do protocolo em ambientes com maiores complexidades. No primeiro experimento, os nós se movimentaram sem alteração da mobilidade entre si, e observa-se que o protocolo MT-AODV apresenta um E2ED de 6,9 ms, enquanto o AODV apresenta 5,8 ms, o que não representa uma melhora do MT-AODV em relação ao AODV. No experimento seguinte, foram inseridas falhas aleatórias em alguns nós dentro do conjunto, com o objetivo de forçar a comunicação seguir por outro caminho e o resultado do PDR do MT-AODV obteve as melhores taxas de entrega de pacotes nos testes onde houve falhas nos nós a 1 salto, 3 saltos de distância e quando houve falhas combinadas nos saltos 1, 2 e 3. Quando são avaliadas as variações da quantidade de tabelas de roteamento, nota-se que os piores resultados de PDR do MT-AODV ficam concentrados nos testes com 7 e 8 tabelas. Uma diferença de 5% quando comparamos o melhor resultado, que neste caso é 74,72% contra o pior deles que fica em 70,96%. No experimento onde é inserida a movimentação dos nós, o MT-AODV apresenta o melhor resultado de PDR, no caso onde houve falhas combinadas, quando se considera a margem

de confiança de 95%. Nos casos onde houve falhas a 1 salto, a 2 saltos e a 3 saltos de distância do nó transmissor, seus resultados, em média, também são melhores do que o AODV. Por fim, no experimento onde há um incremento de nós na rede, um aumento da velocidade média e uma maior aproximação dos nós, o MT-AODV apresenta melhor resultado que o AODV, em termos de perda de pacotes, tanto no ambiente sem falha, quando no ambiente com falha, tendo uma melhora de desempenho de aproximadamente 35% em relação ao AODV. O MT-AODV apresenta melhor resultado em termos de E2ED, chegando a ter ganhos superiores a 100% em relação ao AODV e superiores a 300% em relação ao DSDV. E também apresenta melhores resultados em termos de PDR e *throughput* em relação ao AODV, chegando a uma melhora de 23% no ambiente sem falha e 66% no ambiente com falha.

Fica evidente que o MT-AODV tem uma maior resiliência, em relação aos demais protocolos testados, quando o experimento é submetido a falhas aleatórias no ambiente, mantendo-se mais estável quando comparamos os ambientes com e sem falhas. Como consequência, o MT-AODV apresenta melhores resultados, em termos de PDR, *throughput* e E2ED, quando o ambiente é submetido a falhas. O MT-AODV não tem bom desempenho, em comparação ao AODV, quando os nós no ambiente não apresentam falhas, e tem piores resultados de carga de controle nos testes onde houve falhas. Observou-se também uma tendência do MT-AODV de elevar o número de saltos quanto maior é a quantidade de tabelas de roteamento configuradas. Dessa forma, o protocolo MT-AODV mostra-se melhor que o AODV e DSDV quando é utilizado em ambientes com movimentação e falhas aleatórias.

Embora o protocolo DSDV tenha apresentado alguns resultados melhores que os protocolos AODV e MT-AODV em termos de *throughput* e PDR, o fato de ter apresentado um alto valor de E2ED, deixa-o em desvantagem em relação ao MT-AODV pois, para aplicações de segurança no trânsito é interessante que se tenha menores taxas de atraso possível. De uma forma geral, é percebido em todos os experimentos que o protocolo MT-AODV pode ser aplicado também em redes veiculares, pois apresenta em diversos experimentos melhores resultados em relação aos demais protocolos de roteamento testados.

É importante avaliar, em trabalhos futuros, o comportamento do protocolo MT-AODV, em ambientes simulados com a utilização do SUMO e OSM para verificar o impacto na qualidade da comunicação em um ambiente mais realista. Ao realizar testes com ambientes de mobilidades gerados por essas aplicações, é possível simular o movimento realista

dos veículos em um ambiente urbano e testar o desempenho do AODV e MT-AODV em condições mais próximas da realidade. Deve-se implementar modificações no MT-AODV com o objetivo de se atingir melhor performance tanto nos cenários onde o MT-AODV não foi bem, quanto nos cenários gerados pelos demais simuladores. Isso é possível pois podem ser gerados diferentes cenários de teste para avaliar o desempenho em diferentes condições, como densidade de tráfego, tipo de estrada e horário do dia, o que permite obter uma compreensão mais completa do comportamento dos protocolos de roteamento nessas situações e avaliar a eficácia em cenários reais.

Referências

- [1] UZCÁTEGUI, R. A.; SUCRE, A. J. D.; ACOSTA-MARUM, G. Wave: A tutorial. *IEEE Communications magazine*, IEEE, v. 47, n. 5, p. 126–133, 2009.
- [2] FIRMINO, R. M.; MATTOS, D. M.; MEDEIROS, D. S. Mt-aodv: Provendo resiliência em redes ad-hoc móveis militares através de múltiplas tabelas de roteamento sob demanda.
- [3] ALTAYEB, M.; MAHGOUB, I. A survey of vehicular ad hoc networks routing protocols. *International Journal of Innovation and Applied Studies*, v. 3, p. 829–846, 2013. Disponível em: <<https://api.semanticscholar.org/CorpusID:18474215>>.
- [4] BACCOUCH, H.; ADJIH, C.; MÜHLETHALER, P. *Ey-Wifi: active signaling for the ns-3 802.11 model*. Tese (Doutorado) — INRIA, 2013.
- [5] SANTANA, E. F. Z.; CHAVES, A. P.; GEROSA, M. A.; KON, F.; MILOJICIC, D. S. Software platforms for smart cities: Concepts, requirements, challenges, and a unified reference architecture. *ACM Computing Surveys (Csur)*, ACM New York, NY, USA, v. 50, n. 6, p. 1–37, 2017.
- [6] LOO, J.; MAURI, J. L.; ORTIZ, J. H. *Mobile ad hoc networks: current status and future trends*. Taylor & Francis, 2011.
- [7] WEBER, J. S.; NEVES, M.; FERRETO, T. Vanet simulators: an updated review. *Journal of the Brazilian Computer Society*, SpringerOpen, v. 27, n. 1, p. 1–31, 2021.
- [8] TOYOTA. *Toyota to Bring Vehicle-Infrastructure Cooperative Systems to New Models in 2015*. 2022. Disponível em: <https://global.toyota/en/detail/4228471>. Acesso em: 12 de novembro 2022.
- [9] CAR 2 CAR. *Communication Consortium*. 2022. Disponível em: <https://www.car-2-car.org/>. Acesso em: 12 de novembro 2022.
- [10] AKYILDIZ, I. F.; SU, W.; SANKARASUBRAMANIAM, Y.; CAYIRCI, E. A survey on sensor networks. *IEEE Communications magazine*, IEEE, v. 40, n. 8, p. 102–114, 2002.
- [11] LEE, M. J.; ZHENG, J.; KO, Y.-B.; SHRESTHA, D. M. Emerging standards for wireless mesh technology. *IEEE Wireless Communications*, IEEE, v. 13, n. 2, p. 56–63, 2006.
- [12] AKYILDIZ, I. F.; WANG, X.; WANG, W. Wireless mesh networks: a survey. *Computer networks*, Elsevier, v. 47, n. 4, p. 445–487, 2005.

- [13] ALOTAIBI, E.; MUKHERJEE, B. A survey on routing algorithms for wireless ad-hoc and mesh networks. *Computer networks*, Elsevier, v. 56, n. 2, p. 940–965, 2012.
- [14] TRANSPORTATION, F. H. A. U.S. Department of. *MANAGING DEMAND THROUGH TRAVEL INFORMATION SERVICES*. 2023. Disponível em: https://ops.fhwa.dot.gov/publications/manag_demand_tis/travelinfo.htm. Acesso em: 6 de março 2023.
- [15] ALVES, R. d. S.; CAMPBELL, I. d. V.; COUTO, R. d. S.; CAMPISTA, M. E. M.; MORAES, I. M.; RUBINSTEIN, M. G.; COSTA, L. H. M.; DUARTE, O. C. M.; ABDALLA, M. Redes veiculares: Princípios, aplicações e desafios. *Minicursos do Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores, SBRC*, p. 17–24, 2009.
- [16] AMARANTE, T. C.; BARCELOS, V. P.; D’ALESSANDRE, L. D.; CORREIA, L. H. Detecção automática e alerta de acidentes em redes veiculares reais. 2015.
- [17] GUERRERO-IBANEZ, A.; FLORES, C.; DAMIAN-REYES, P.; BARBA, A.; REYES, A. A performance study of the 802.11 p standard for vehicular applications. In: IEEE. *2011 Seventh International Conference on Intelligent Environments*. [S.l.], 2011. p. 165–170.
- [18] RUBINSTEIN, M. G.; MORAES, I. M.; CAMPISTA, M. E. M.; COSTA, L. H. M.; DUARTE, O. C. A survey on wireless ad hoc networks. In: SPRINGER. *IFIP International Conference on Mobile and Wireless Communication Networks*. [S.l.], 2006. p. 1–33.
- [19] HOGIE, L.; BOUVRY, P.; GUINAND, F. An overview of manets simulation. *Electronic notes in theoretical computer science*, Elsevier, v. 150, n. 1, p. 81–101, 2006.
- [20] HINDS, A.; NGULUBE, M.; ZHU, S.; AL-AQRABI, H. A review of routing protocols for mobile ad-hoc networks (manet). *International journal of information and education technology*, IACSIT Press, v. 3, n. 1, p. 1, 2013.
- [21] KUMAR, G. V.; REDDYR, Y. V.; NAGENDRA, M. Current research work on routing protocols for manet: a literature survey. *international Journal on computer Science and Engineering*, Citeseer, v. 2, n. 3, p. 706–713, 2010.
- [22] REDDY, A. S. Performance of vanet over manet in mobile computing environment. In: IEEE. *2022 7th International Conference on Communication and Electronics Systems (ICCES)*. [S.l.], 2022. p. 659–664.
- [23] NHTSA - National Highway Traffic Safety Administration. *Vehicle-to-Vehicle Communication - Overview*. 2022. Disponível em: <https://www.nhtsa.gov/technology-innovation/vehicle-vehicle-communication>. Acesso em: 12 de novembro 2022.
- [24] Audi Newsroom. *Audi joins Spoke Safety, Qualcomm, Commsignia to help protect bicyclists through connected technology*. 2022. Disponível em: <https://media.audiusa.com/en-us/releases/514>. Acesso em: 12 de novembro 2022.
- [25] TABAR, S.; AZADMANESH, A. Quality of service in vehicular ad hoc networks. In: WORLD SCIENTIFIC. *IAENG transactions on engineering sciences: Special issue for the International Association of Engineers Conferences 2016*. [S.l.], 2018. p. 388–401.

- [26] JARUPAN, B.; EKICI, E. A survey of cross-layer design for vanets. *Ad Hoc Networks*, Elsevier, v. 9, n. 5, p. 966–983, 2011.
- [27] LABERTEAUX, K.; HARTENSTEIN, H. *VANET: vehicular applications and inter-networking technologies*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2009.
- [28] SUMO. *Simulation of Urban MObility*. 2022. Disponível em: <https://eclipse.dev/sumo/>. Acesso em: 29 de novembro 2022.
- [29] VANETsim. *VANETsim project*. 2022. Disponível em: <https://svs.informatik.uni-hamburg.de/vanet/>. Acesso em: 29 de novembro 2022.
- [30] OPNET. *OpNetProjects*. 2022. Disponível em: <https://opnetprojects.com/opnet-network-simulator/>. Acesso em: 29 de novembro 2022.
- [31] TRIAL-USE Standard for Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE) - Resource Manager. *IEEE Std 1609.1, 2006*, p. 1–71, 2006.
- [32] IEEE Trial-Use Standard for Wireless Access in Vehicular Environments - Security Services for Applications and Management Messages. *IEEE Std 1609.2, 2006*, p. 1–105, 2006.
- [33] GTA. *Princípios, Aplicações e Desafios*. 2022. Disponível em: <http://www.gta.ufrj.br/ftp/gta/TechReports/ACC09.pdf>. Acesso em: 29 de novembro 2022.
- [34] DEVANGAVI, A. D.; GUPTA, R. Routing protocols in vanet — a survey. In: *2017 International Conference On Smart Technologies For Smart Nation (SmartTechCon)*. [S.l.: s.n.], 2017. p. 163–167.
- [35] LU, N.; CHENG, N.; ZHANG, N.; SHEN, X.; MARK, J. W. Connected vehicles: Solutions and challenges. *IEEE internet of things journal*, IEEE, v. 1, n. 4, p. 289–299, 2014.
- [36] ETSI. *Adopts Car Connectivity Consortium’s MirrorLink Technical Specification*. 2022. Disponível em: <http://tiny.cc/etsiorg1newsroom>. Acesso em: 30 de novembro 2022.
- [37] TIWARI, P.; KUSHWAH, R. S. Traffic analysis for vanet using wave and wimax. In: IEEE. *2015 International Conference on Communication Networks (ICCN)*. [S.l.], 2015. p. 343–346.
- [38] GRILLI, G. Data dissemination in vehicular ad-hoc networks. Università degli Studi di Roma"Tor Vergata", 2010.
- [39] ABDULLA, M.; SHAYAN, Y. R. Harnessing simultaneously the benefits of uwb and mbwa: A practical scenario. In: IEEE. *2009 Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*. [S.l.], 2009. p. 508–513.
- [40] NAMPALLY, V.; SHARMA, D. M. R. Information sharing standards in communication for vanet. *International Journal of Scientific Research in Computer Science Applications and Management Studies (IJSRCSAMS)*, v. 7, n. 4, p. 2319–1953, 2018.

- [41] ERNST, T.; NEBEHAJ, V.; SØRÅSEN, R. Cvis: Calm proof of concept preliminary results. In: IEEE. *2009 9th International Conference on Intelligent Transport Systems Telecommunications, (ITST)*. [S.l.], 2009. p. 80–85.
- [42] BHARGAV, K. K.; SINGHAL, R. Zigbee based vanets for accident rescue missions in 3g wcdma networks. In: IEEE. *2013 IEEE Global Humanitarian Technology Conference: South Asia Satellite (GHTC-SAS)*. [S.l.], 2013. p. 310–313.
- [43] GUERAA, A. E.; SAADANE, R.; ABOUTAJDINE, D. Impact of mobility model on packet transmission in vehicular ad hoc network based on ir-uwb. In: IEEE. *2015 International Conference on Wireless Networks and Mobile Communications (WINCOM)*. [S.l.], 2015. p. 1–5.
- [44] QURESHI, K. N.; ABDULLAH, A. H. Localization-based system challenges in vehicular ad hoc networks: survey. *SmartCR*, v. 4, n. 6, p. 515–528, 2014.
- [45] FUXJÄGER, P.; COSTANTINI, A.; VALERIO, D.; CASTIGLIONE, P.; ZACHEO, G.; ZEMEN, T.; RICCIATO, F. Ieee 802.11 p transmission using gnuradio. In: KARLSRUHE GERMANY. *6th Karlsruhe Workshop on Software Radios (WSR)*. [S.l.], 2010. p. 1–4.
- [46] COMMITTEE, I. C. S. L. S. Ieee standard for information technology-telecommunications and information exchange between systems-local and metropolitan area networks-specific requirements part 11: Wireless lan medium access control (mac) and physical layer (phy) specifications. *IEEE Std 802.11[^]*, 2007.
- [47] MIR, Z. H.; FILALI, F. Lte and ieee 802.11 p for vehicular networking: a performance evaluation. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, Springer, v. 2014, n. 1, p. 1–15, 2014.
- [48] CASTRO, M. S. d. Rede de sensores sem fio para aquisição de dados de malhas de aterramento submetidas a correntes impulsivas. Universidade Federal de Campina Grande, 2016.
- [49] BRENDHA, R.; PRAKASH, V. S. J. A survey on routing protocols for vehicular ad hoc networks. In: *2017 4th International Conference on Advanced Computing and Communication Systems (ICACCS)*. [S.l.: s.n.], 2017. p. 1–7.
- [50] ROYER, E. M.; PERKINS, C. E. Ad-hoc on-demand distance vector routing. In: *Proceedings of the 2nd IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications*. [S.l.: s.n.], 1999. v. 2, n. 1999, p. 90–100.
- [51] SHAREF, B. T.; ALSAQOUR, R. A.; ISMAIL, M. Vehicular communication ad hoc routing protocols: A survey. *Journal of Network and Computer Applications*, v. 40, p. 363–396, 2014. ISSN 1084-8045. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1084804513001963>>.
- [52] MALIK, S.; SAHU, P. K. A comparative study on routing protocols for vanets. *Heliyon*, v. 5, n. 8, p. e02340, 2019. ISSN 2405-8440. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405844019360001>>.

- [53] PERKINS, C. E.; BHAGWAT, P. Highly dynamic destination-sequenced distance-vector routing (dsv) for mobile computers. *ACM SIGCOMM computer communication review*, ACM New York, NY, USA, v. 24, n. 4, p. 234–244, 1994.
- [54] ALGHAMDI, S. A. Load balancing maximal minimal nodal residual energy ad hoc on-demand multipath distance vector routing protocol (lbmmre-aomdv). *Wireless networks*, Springer, v. 22, n. 4, p. 1355–1363, 2016.
- [55] BETTSTETTER, C.; HARTENSTEIN, H.; PÉREZ-COSTA, X. Stochastic properties of the random waypoint mobility model. *Wireless networks*, Springer, v. 10, p. 555–567, 2004.
- [56] MISRA, S.; OBAIDAT, M. S.; SARMA, B. (Ed.). *Handbook of Vehicular Ad Hoc Networks for Routing, Security, and Privacy*. [S.l.]: Springer, 2014.
- [57] FIRMINO, R. M. Um protocolo de roteamento multitabelas para monitoramento de sinais vitais em cenários de operações militares.
- [58] TALEB, A. A. Vanet routing protocols and architectures: An overview. *J. Comput. Sci.*, v. 14, n. 3, p. 423–434, 2018.
- [59] RASHEED, A.; GILLANI, S.; AJMAL, S.; QAYYUM, A. Vehicular ad hoc network (vanet): A survey, challenges, and applications. *Vehicular Ad-Hoc Networks for Smart Cities*, Springer, p. 39–51, 2017.
- [60] SINGH, S.; AGRAWAL, S. Vanet routing protocols: Issues and challenges. In: *2014 Recent Advances in Engineering and Computational Sciences (RAECS)*. [S.l.: s.n.], 2014. p. 1–5.
- [61] KHORASANI, G.; TATARI, A.; YADOLLAHI, A.; RAHIMI, M. Evaluation of intelligent transport system in road safety. *International Journal of Chemical, Environmental & Biological Sciences (IJCEBS)*, v. 1, n. 1, p. 110–118, 2013.
- [62] YAN, X.; ZHANG, H.; WU, C. Research and development of intelligent transportation systems. In: *2012 11th International Symposium on Distributed Computing and Applications to Business, Engineering and Science*. [S.l.: s.n.], 2012. p. 321–327.
- [63] CAMARGO, R. F. de. *Sistemas inteligentes no transporte público coletivo por ônibus*. 144 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.
- [64] MARÈ, R. M.; MARTE, C. L.; CUGNASCA, C. E. Visible light communication applied to intelligent transport systems: an overview. *IEEE Latin America Transactions*, IEEE, v. 14, n. 7, p. 3199–3207, 2016.
- [65] XU, Q.; MAK, T.; KO, J.; SENGUPTA, R. Vehicle-to-vehicle safety messaging in dsrc. In: *Proceedings of the 1st ACM international workshop on Vehicular ad hoc networks*. [S.l.: s.n.], 2004. p. 19–28.
- [66] ZALDIVAR, J.; CALAFATE, C. T.; CANO, J. C.; MANZONI, P. Providing accident detection in vehicular networks through obd-ii devices and android-based smartphones. In: IEEE. *2011 IEEE 36th Conference on Local Computer Networks*. [S.l.], 2011. p. 813–819.

- [67] GONZÁLEZ, V.; SANTOS, A. L.; PINART, C.; MILAGRO, F. Experimental demonstration of the viability of IEEE 802.11 b based inter-vehicle communications. In: *4th International ICST Conference on Testbeds and Research Infrastructures for the Development of Networks & Communities*. [S.l.: s.n.], 2010.
- [68] FITAH, A.; BADRI, A.; MOUGHIT, M.; SAHEL, A. Performance of dsrc and wifi for intelligent transport systems in vanet. *Procedia Computer Science*, Elsevier, v. 127, p. 360–368, 2018.
- [69] UPADHYAYA, N.; SHAH, D. J. Aodv routing protocol implementation in vanet. *International Journal of Advanced Research in Engineering and Technology*, v. 10, n. 2, 2019.
- [70] CHANDEL, N.; GUPTA, M. V. Comparative analysis of aodv, dsr and dsdv routing protocols for vanet city scenario. *International Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication*, v. 2, n. 6, p. 1380–1384, 2014.
- [71] SHABAN, A. M.; KURNAZ, S.; SHANTAF, A. M. Evaluation dsdv, aodv and olsr routing protocols in real live by using sumo with ns3 simulation in vanet. In: IEEE. *2020 International Congress on Human-Computer Interaction, Optimization and Robotic Applications (HORA)*. [S.l.], 2020. p. 1–5.
- [72] SAINI, H.; MAHAPATRA, R. Implementation and performance analysis of aodv routing protocol in vanets. *Int. J. Emerg. Sci. Eng*, Citeseer, v. 2, p. 24–29, 2014.
- [73] MANTORO, T.; REZA, M. Performance analysis of aodv and dsdv using sumo, move and ns2. In: IEEE. *2016 International Conference on Informatics and Computing (ICIC)*. [S.l.], 2016. p. 372–376.
- [74] SALLAM, G.; MAHMOUD, A. Performance evaluation of olsr and aodv in vanet cloud computing using fading model with sumo and ns3. In: IEEE. *2015 International Conference on Cloud Computing (ICCC)*. [S.l.], 2015. p. 1–5.
- [75] TALEB, T.; OCHI, M.; JAMALIPOUR, A.; KATO, N.; NEMOTO, Y. An efficient vehicle-heading based routing protocol for vanet networks. In: *IEEE Wireless Communications and Networking Conference, 2006. WCNC 2006*. [S.l.: s.n.], 2006. v. 4, p. 2199–2204.
- [76] RONDON, L.; ROCHA-FILHO, G.; VILLAS, L. Protocolos eficientes para comunicação v2v em redes veiculares de dados nomeados. In: *Anais Estendidos do XXXIX Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos*. Porto Alegre, RS, Brasil: SBC, 2021. p. 177–184. ISSN 2177-9384.
- [77] DESAI, R.; PATIL, B. Performance analysis of ad hoc routing protocols. In: *3rd International Conference on Recent Trends in Engineering & Technology (ICRTET'2014)*. ISBN. [S.l.: s.n.], 2014. p. 5107–220.
- [78] MAHDI, H. F.; ABOOD, M. S.; HAMDY, M. M. Performance evaluation for vehicular ad-hoc networks based routing protocols. *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*, v. 10, n. 2, p. 1080–1091, 2021.

- [79] RAJHI, M.; MADKHALI, H.; DAGHRIRI, I. Comparison and analysis performance in topology-based routing protocols in vehicular ad-hoc network (vanet). In: IEEE. *2021 IEEE 11th Annual Computing and Communication Workshop and Conference (CCWC)*. [S.l.], 2021. p. 1139–1146.
- [80] KHAIRNAR, M.; VAISHALI, D.; KOTECHA, D. K. Simulation-based performance evaluation of routing protocols in vehicular ad-hoc network. *arXiv preprint arXiv:1311.1378*, 2013.
- [81] JEVTIC, N. J.; MALNAR, M. Z. Novel etx-based metrics for overhead reduction in dynamic ad hoc networks. *IEEE Access*, IEEE, v. 7, p. 116490–116504, 2019.
- [82] PIMENTA, T. M. da C. *Simulação de protocolos de encaminhamento para redes AdHoc usando o NS-3*. Tese (Doutorado) — Universidade do Minho (Portugal), 2013.
- [83] SANTOS, G. d. *Análise de desempenho dos protocolos de roteamento DSDV, AODV e OLSR, aplicados a uma rede de comunicação VANET*. Tese (Doutorado) — Instituto Superior de Engenharia do Porto, 2016.
- [84] KUMAR, R.; DAVE, M. A comparative study of various routing protocols in vanet. *arXiv preprint arXiv:1108.2094*, 2011.
- [85] nsnam. *Network Simulator*. 2022. Disponível em: <https://www.nsnam.org>. Acesso em: 29 de novembro 2022.
- [86] nsnam. *Network Simulator Tutorial*. 2022. Disponível em: <https://www.nsnam.org/docs/tutorial-pt-br/ns-3-tutorial.pdf>. Acesso em: 29 de novembro 2022.
- [87] BUSSAB, W. O.; MORETIN, P. Métodos quantitativos, estatística básica, 5^a edição. São Paulo: Editora Saraiva, 2002.