

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

WAGNER A. JUSSIANI

**DESEMPENHO E CONECTIVIDADE DE REDES HÍBRIDAS EM
SISTEMAS DE TRANSPORTE INTELIGENTE COOPERATIVO**

DISSERTAÇÃO

CURITIBA

2019

WAGNER A. JUSSIANI

**DESEMPENHO E CONECTIVIDADE DE REDES HÍBRIDAS EM
SISTEMAS DE TRANSPORTE INTELIGENTE COOPERATIVO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial da Universidade Tecnológica Federal do Paraná como requisito parcial para obtenção do grau de “Mestre em Ciências” – Área de Concentração: Telecomunicações e Redes.

Orientadora: Professora Doutora Keiko Verônica
Ono Fonseca

CURITIBA

2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

Jussiani, Wagner Antonio

Desempenho e conectividade de redes híbridas em sistemas de transporte inteligente cooperativo [recurso eletrônico] / Wagner Antonio Jussiani. -- 2019.

1 arquivo eletrônico (135 f.) : PDF ; 4,33 MB.

Modo de acesso: World Wide Web.

Texto em português com resumo em inglês.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial. Área de Concentração: Telecomunicações e Redes, Curitiba, 2019.

Bibliografia: f. 120-127.

1. Engenharia elétrica - Dissertações. 2. Redes veiculares ad hoc (Redes de computadores). 3. Sistemas inteligentes de veículos rodoviários. 4. Sistemas de comunicação móvel. 5. Sistemas de comunicação sem fio. 6. Sistemas de transmissão de dados. 7. Protocolos de roteamento (Protocolos de redes de computadores). 8. IEEE 802.11 (Normas). 9. Interconexão de redes (Telecomunicações). 10. Tecnologias disruptivas. 11. Desempenho. 12. Métodos de simulação. I. Fonseca, Keiko Verônica Ono, orient. II. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial. III. Título.

CDD: Ed. 23 -- 621.3

Biblioteca Central do Câmpus Curitiba - UTFPR
Bibliotecária: Luiza Aquemi Matsumoto CRB-9/794

TERMO DE APROVAÇÃO DE DISSERTAÇÃO Nº 848

A Dissertação de Mestrado intitulada “**Desempenho e Conectividade de Redes Híbridas em Sistemas de Transporte Inteligente Cooperativo**” defendida em sessão pública pelo candidato **Wagner Antonio Jussiani**, no dia **25 de novembro de 2019**, foi julgada para a obtenção do título de Mestre em Ciências, área de concentração **Engenharia Biomédica**, e aprovada em sua forma final, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial.

BANCA EXAMINADORA:

Profa. Dra. Keiko Verônica Ono Fonseca - Presidente – UTFPR

Prof. Dr. Emílio Carlos Gomes Wille - UTFPR

Prof. Dr. Evelio Martín García Fernández – UFPR

A via original deste documento encontra-se arquivada na Secretaria do Programa, contendo a assinatura da Coordenação após a entrega da versão corrigida do trabalho.

Curitiba, 25 de novembro de 2019.

Dedico este trabalho à minha família, pela
paciência e motivação que me deram.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente ao Senhor DEUS, Criador de todas as coisas, por me fazer existir, gozar da remissão e ter esta oportunidade em minha vida.

Também ao meu pai (in memoriam) e minha mãe, por me receberem em seus braços, me criarem e passarem valores humanos e espirituais. À minha esposa e filhas, pela paciência que tiveram comigo e incentivo que me deram.

À minha professora orientadora, que me brindou com mais uma oportunidade de encontrar-se em minha caminhada e contribuir significativamente na minha carreira profissional.

A todos os professores por meio dos quais tive a honra de receber conhecimento, fazendo-me um pouco maior como profissional e como pessoa, a minha sincera gratidão.

*“Elevo meus olhos para os montes; de onde me virá o socorro?
O meu socorro vem do Senhor, que fez o céu e a terra.
Não deixará vacilar o teu pé; Aquele que te guarda não tosquenejará.
Eis que não tosquenejará nem dormirá o Guarda de Israel.
O Senhor é quem te guarda; o Senhor é a tua sombra à tua direita.
O sol não te molestará de dia e nem a lua de noite.
O Senhor te guardará de todo o mal; Ele guardará a tua alma.
O Senhor guardará a tua entrada e a tua saída, desde agora e para
sempre.”*
(Bíblia Sagrada, Salmos 121)

RESUMO

JUSSIANI, Wagner. DESEMPENHO E CONECTIVIDADE DE REDES HÍBRIDAS EM SISTEMAS DE TRANSPORTE INTELIGENTE COOPERATIVO. 135 f. Dissertação – Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2019.

O Sistema Inteligente de Transporte (*Intelligent Transportation System*) permite o gerenciamento dos diferentes meios de transporte e do trânsito de forma inteligente, e é estendido pelo Sistema de Transporte Inteligente Cooperativo (*Cooperative Intelligent Transportation System*), onde os componentes compartilham informações entre si. Como meio de comunicação, o Sistema de Transporte Inteligente Cooperativo tem à mão as redes móveis celulares e os sistemas comunicações de curto alcance (*Short Range Communication*) com uma topologia híbrida, composta de uma rede veicular ad-hoc (*Veicular Ad-Hoc Network*) acrescida de elementos de infraestrutura. Desta forma, a rede veicular ad-hoc mostra-se como uma possível solução de comunicação visando o atendimento das propostas do Sistema de Transporte Inteligente Cooperativo. Este estudo analisa topologias distintas de redes híbridas quanto à conectividade e o desempenho, que poderiam servir como uma rede híbrida provendo recursos de telecomunicações para um Sistema de Transporte Inteligente Cooperativo. Neste trabalho, o sistema de transporte coletivo é composto de nós móveis, constituídos por veículos de transporte público dotados de recursos de comunicação, e nós fixos, constituídos por elementos de infraestrutura dotados de recursos de comunicação, formando uma rede de topologia híbrida. Os nós fixos desta rede híbrida podem atuar como repetidores, colaborando para a comunicação entre nós que de outra forma não seria possível. A implantação desta rede fixa pode ser feita em elementos de controle de trânsito e outras estruturas públicas, formando redes de topologia linear e em grade, conforme a distribuição geográfica destes elementos e a importância da via onde se localizam. São analisadas redes com diversas distâncias entre nós, múltiplos do comprimento de uma quadra, e considerado o desempenho de cada configuração e a sua conectividade. Dependendo da distância entre os nós, a rede pode tornar-se disruptiva, e métodos de melhorias de redes disruptivas foram considerados. São analisados dois métodos de melhorias em uma rede disruptiva e feita a avaliação do ganho de desempenho com as melhorias. As melhorias escolhidas consistiram (i) no aumento no número e no tempo de duração dos contatos entre os nós, e (ii) no uso de nós fixos atuando como “data mule” estáticos, destinados a transferir os dados entre os nós móveis que passam por ele.

Palavras-chave: VANET, Redes Híbridas, Redes disruptivas, Comunicação veicular

ABSTRACT

JUSSIANI, Wagner. PERFORMANCE AND CONNECTIVITY OF HYBRI NETWORKS IN COOPERATIVE INTELLIGENT TRANSPORT SYSTEMS. 135 f. Dissertação – Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2019.

The Intelligent Transportation System enables intelligent management of different modes of transport and traffic, and is extended by the Cooperative Intelligent Transportation System, where components share information with each other. As a means of communication, the Cooperative Intelligent Transportation System has cellular mobile networks and Short Range Communication with a hybrid topology composed of an vehicular ad-hoc network plus infrastructure elements. Thus, vehicular ad-hoc network is shown as a possible communication solution aimed at meeting Cooperative Intelligent Transportation System proposals. This study is designed to analyze distinct hybrid network topologies for connectivity and performance, which could serve as a vehicular hybrid network providing telecommunications capabilities for a Cooperative Intelligent Transportation System. In this work, the public transport system composed of mobile nodes, consisting of public transport vehicles with communication resources, and fixed nodes, consisting of infrastructure elements with communication resources, forming a hybrid topology network. This study considers the implementation of a fixed network composed of nodes that act as repeaters collaborating for communication between nodes that would not otherwise be possible. This fixed network can be deployed in traffic control elements and other public structures, forming linear and grid topology networks, according to the geographic distribution of these elements and the importance of the road where they are located, with distances between nodes multiples of the length of a block. Performance and connectivity are considered. Depending on the distance between the nodes, the network can become disruptive, and two disruptive network improvement methods have been considered. The improvements chosen consisted of increasing the number and time of contact between nodes and the use of fixed nodes acting as static data mules to transfer data between the mobile nodes passing through it.

Keywords: VANET, Hybrid Network, Disruptive Tolerant Network, Vehicular Communications

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1	– Rede a ser considerada.	21
FIGURA 2	– Tipos de acesso DSRC/WAVE.	31
FIGURA 3	– Planos de gerenciamento de dados IEEE1609.3/4 e fluxo dos pacotes IP. .	32
FIGURA 4	– Áreas de cobertura de nós vizinhos.	40
FIGURA 5	– Fases de conectividade de N_m com os nós N_i e N_j	42
FIGURA 6	– Distribuição de semáforos na região central de São Paulo/SP.	44
FIGURA 7	– Distribuição de semáforos em uma avenida na periferia de São Paulo/SP .	45
FIGURA 8	– Topologia da rede a ser estudada.	46
FIGURA 9	– Modelo de simulação para a distribuição de sinalização em linha.	47
FIGURA 10	– Modelo de simulação para a distribuição de sinalização em grade.	48
FIGURA 11	– Movimento do nó móvel na rede em grade.	48
FIGURA 12	– Rede referência para análise das retransmissões.	55
FIGURA 13	– Taxa de retransmissão acumulada normalizada - d = 300 m.	56
FIGURA 14	– Taxa de retransmissão acumulada normalizada - d = 450 m.	56
FIGURA 15	– Taxa de retransmissão acumulada normalizada - d = 600 m.	57
FIGURA 16	– Modelo de referência para redes em linha com dois canais.	57
FIGURA 17	– Modelo de referência para redes em grade com dois canais.	58
FIGURA 18	– Cenário para determinar o comportamento do canal simulado.	61
FIGURA 19	– Nível de sinal medido.	62
FIGURA 20	– Nível de sinal simulado com o NS-2.	62
FIGURA 21	– Desvanecimento devido à distribuição de Nakagami-m, simulação no NS2. .	63
FIGURA 22	– Taxa de pacotes de 415 kbps, 23 dBm EIRP.	64
FIGURA 23	– Taxa de pacotes de 415 kbps, 33 dBm EIRP.	64
FIGURA 24	– Cobertura com nós fixos distribuídos uniformemente a 300m, Pt a 23 e 33 dBm EIRP.	66
FIGURA 25	– Estratificação normalizada dos eventos associados ao desempenho da rede 24(a).	67
FIGURA 26	– Estratificação normalizada dos eventos com redução da taxa CBR/UDP. ..	68
FIGURA 27	– Desempenho com RTS/CTS habilitado, Pt a 23 dBm EIRP, nós fixos espaçados a 300 m.	69
FIGURA 28	– Ocorrências de retransmissão e de descarte por limite de backoff, nós a 300 m.	70
FIGURA 29	– Consolidação dos resultados para potência de 23 dBm EIRP, nós a 300 m. .	72
FIGURA 30	– Consolidação dos resultados para potência de 23 dBm EIRP, nós a 300 m. .	72
FIGURA 31	– Comportamento da rede, nós separados a 300 m, propagação “dois raios”. .	73
FIGURA 32	– Comportamento da rede, nós separados a 300 m, propagação “dois raios”, controle RTS/CTS e taxa de pacotes a 415 kbps.	74
FIGURA 33	– Cobertura, nós fixos distribuídos uniformemente a 450m, Pt a 23 e 33 dBm EIRP.	76
FIGURA 34	– Estratificação normalizada dos eventos associados ao desempenho da Figura 33(b).	77
FIGURA 35	– Comportamento para taxas de CBR/UDP de 250 e 125 kbps, nós fixos a	

	450 m.	78
FIGURA 36	– Ocorrências de retransmissão e de descarte por limite de <i>backoff</i> , nós a 450 m.	79
FIGURA 37	– Consolidação dos resultados para potência de 23 dBm EIRP, nós a 450 m.	80
FIGURA 38	– Cobertura da rede com nós fixos distribuídos uniformemente, 600m, 23 e 33 dBm EIRP.	81
FIGURA 39	– Estratificação dos eventos associados à instabilidade do throughput, nós a 600 m.	82
FIGURA 40	– Comportamento para taxas CBR/UDP de 250 e 125 kbps, nós fixos a 600 m.	83
FIGURA 41	– Ocorrências de retransmissão e de descarte por limite de <i>backoff</i> , nós a 600 m.	84
FIGURA 42	– Consolidação dos resultados para potência de 23 dBm EIRP, nós a 600 m.	85
FIGURA 43	– Cobertura da rede com nós fixos distribuídos uniformemente a 900m, Pt a 33 dBm EIRP.	85
FIGURA 44	– Estratificação dos eventos associados ao desempenho, nós a 900 m.	87
FIGURA 45	– Comportamento da rede para taxas de CBR/UDP de 250 e 125 kbps, nós fixos espaçados a 900 m.	88
FIGURA 46	– Ocorrências de retransmissão e de descarte por limite de <i>backoff</i> , nós a 900 m.	89
FIGURA 47	– Consolidação dos resultados para potência de 33 dBm EIRP, nós a 900 m.	89
FIGURA 48	– Cobertura da rede com nós fixos distribuídos uniformemente a 1800m, Pt a 23 e 33 dBm EIRP.	90
FIGURA 49	– Comunicação veicular em ambiente urbano.	93
FIGURA 50	– Nível do sinal acima do mínimo [dB].	94
FIGURA 51	– Movimento dos nós móveis na rede em grade.	94
FIGURA 52	– Rede em grade com 16 nós a 300 m - topologia e temporização.	95
FIGURA 53	– Rede em grade com 16 nós a 300 m - desempenho.	96
FIGURA 54	– Rede em grade com 9 nós a 450 m - topologia e temporização.	97
FIGURA 55	– Rede em grade com 9 nós a 450 m - desempenho.	97
FIGURA 56	– Rede em grade com 16 nós a 450 m - topologia e temporização.	98
FIGURA 57	– Rede em grade com 16 nós a 450 m - desempenho.	99
FIGURA 58	– Rede em grade com 16 nós a 600 m - topologia e temporização.	100
FIGURA 59	– Rede em grade com 16 nós a 600 m - desempenho.	100
FIGURA 60	– Trajetos e rede de referência.	104
FIGURA 61	– Rede com nós fixos.	105
FIGURA 62	– Capacidade versus distância.	108
FIGURA 63	– Histograma dos <i>delays</i> dos <i>bundles</i> , cobertura de 100 m.	110
FIGURA 64	– Distribuição do desempenho individual por <i>bundle</i> das simulações realizadas nas redes propostas.	110
FIGURA 65	– Histograma dos <i>delays</i> dos <i>bundles</i> , cobertura de 450 m.	112
FIGURA 66	– Distribuição do desempenho individual por <i>bundle</i> das simulações realizadas nas redes propostas.	113

LISTA DE TABELAS

TABELA 1	– <i>Throughput</i> versus distância (PER).	27
TABELA 2	– Razão de entrega de pacotes em função da distância e do ambiente.	27
TABELA 3	– Valores obtidos para o modelo em média escala.	28
TABELA 4	– Valores obtidos para o modelo em pequena escala.	29
TABELA 5	– Comparação entre as configurações do SCH nos SRC.	34
TABELA 6	– Diferenças entre 802.11a e 802.11p.	35
TABELA 7	– Esquema de modulação e taxa de dados 802.11p.	35
TABELA 8	– EDCA: Parâmetros padrão para o IEEE 802.11p.	36
TABELA 9	– Probabilidade de <i>outage</i> versus distância.	49
TABELA 10	– Tabela de temporizações típicas do padrão 802.11p.	51
TABELA 11	– Variação do <i>throughput</i> , nós a 300 m.	66
TABELA 12	– Variabilidade inicial do <i>throughput</i> , nós a 450 m.	75
TABELA 13	– Tabela das rotas e cronogramas da rede ilustrada na Figura 60(a).	104
TABELA 14	– Tabela de espera acrescida à rede de referência.	106
TABELA 15	– Tabela-resumo dos gráficos da Figura 63.	109
TABELA 16	– Tabela-resumo dos gráficos da Figura 65.	111

LISTA DE SIGLAS

TIC	Tecnologias da Informação e Comunicação
ITS	<i>Intelligent Transportation System</i>
C-ITS	<i>Cooperative Intelligent Transportation System</i>
OBU	<i>Onboard Unit</i>
SRC	<i>Short Range Communications</i>
V2V	<i>Vehicle to vehicle</i>
V2I	<i>Vehicle to Infraestructure</i>
I2I	<i>Infraestructure to Infraestructure</i>
RSU	<i>Roadside Unit</i>
PTS	<i>Public Transportation System</i>
BRT	<i>Bus Rapid Transit</i>
PDR	<i>Packet Discard Rate</i>
GW	<i>Gateway</i>
RF	<i>Relay Fixo</i>
VANET	<i>Vehicular Ad-Hoc Network</i>
GEMV ²	<i>Geometry-based Efficient propagation Model for V2V communication</i>
ETSI	<i>European Telecommunications Standards Institute</i>
ITS-G5	<i>ETSI Intelligent Transportation System - G5</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
PER	<i>Packet Error Rate</i>
DSRC	<i>Dedicated Short-Range Communications</i>
WAVE	<i>Wireless Access for Vehicular Environments</i>
C2C-CC	<i>CAR to CAR Communication Consortium</i>
EIRP	<i>Effective Isotropic Radiated Power</i>
SCH	<i>Service Channel</i>
CCH	<i>Control Channel</i>
WSA	<i>Wave Service Advertisement</i>
WSMP	<i>Wave Short Message Protocol</i>
IP	<i>Internet Protocol</i>
IPv6	<i>IP versão 6</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
CALM	<i>Communications Architecture for Land and Mobile</i>
RLAN	<i>Radio Local Area Networks</i>
BRAN	<i>Broadband Radio Access Networks</i>
CEPT	<i>European Conference of Postal and Telecommunications Administrations</i>
ASV	<i>Advanced Safety Vehicles</i>
PHY	<i>Physical Layer</i>
ARIB	<i>Association of Radio Industries and Businesses</i>
OFDM	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>
BPSK	<i>Binary Phase Shift Keying</i>
QPSK	<i>Quadrature Phase Shift Keying</i>

QAM	<i>Quadrature Amplitude Modulation</i>
EDCA	<i>Enhanced Distributed Channel Access</i>
QoS	<i>Quality of Service</i>
AC	<i>Access Category</i>
CW	<i>Contention Window</i>
AIFS[AC]	<i>Arbitrary Inter-Frame Space</i>
AIFSN[AC]	<i>Arbitrary Inter-Frame Space Number</i>
DIFS	<i>DCF Inter-Frame Space</i>
DCF	<i>Distributed Coordination Function</i>
CSMA-CA	<i>Carrier sense multiple access with collision avoidance</i>
CWmin(AC)	<i>Minimum contention window for Access Category AC</i>
CWmax(AC)	<i>Maximum contention window for Access Category AC</i>
V2X	<i>Vehicle-to-Everything</i>
5GAA	<i>5G Automotive Association</i>
C-V2X	<i>Cellular Vehicle-to-Everything</i>
LTE	<i>Long Term Evolution</i>
MANET	<i>Mobile Ad hoc NETWORK</i>
SCAF	<i>Store, Carry and Forward</i>
AODV	<i>Ad hoc On demand Distance Vector</i>
CET	<i>Companhia de Engenharia de Tráfego de São Paulo</i>
RM	<i>Relay móvel</i>
DTN	<i>Delay/Disruption Tolerant Networking</i>
CC	<i>Centro de controle do C-ITS</i>
SINR	<i>Signal-to-Noise-plus-Interference Ratio</i>
SNR	<i>Signal to Noise Ratio</i>
SIFS	<i>Short Inter Frame Space</i>
MAC	<i>Medium Access Control</i>
ACK	<i>Acknowledge</i>
CP	<i>OFDM Cyclic prefix</i>
CBR	<i>Constant Bit Rate</i>
ARQ	<i>Automatic Repeat reQuest</i>
RTS	<i>Request To Send</i>
CTS	<i>Clear To Send</i>
TCP	<i>Transport Control Protocol</i>
BPSK	<i>Binary Phase Shift Keying</i>
QPSK	<i>Quadrature Phase Shift Keying</i>
QAM	<i>Quadrature Amplitude Modulation</i>
BRT	<i>Bus Rapid Transport</i>
UDP	<i>User Datagram Protocol</i>
NAV	<i>Network Allocation Vector</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

E_i	Aresta i de um grafo
V_i	Vértice i de um grafo
h_r	Altura da antena do receptor
h_t	Altura da antena do transmissor
λ	Comprimento da onda eletromagnética
γ	Expoente de Propagação
σ	Desvio padrão do ganho do canal em dB.
P_r	Potência de recepção
$P_r(d_0)$	Potência de recepção no ponto de referência (d_0)
d_0	Distância de referência
d_c	Distância crítica
χ_σ	Variável gaussiana de média zero e desvio padrão σ [dB]
P_t	Potência de transmissão
G_t	Ganho da antena de transmissão
G_r	Ganho da antena de recepção
f	Frequência da onda eletromagnética
c_0	Velocidade da luz no espaço livre
s_t	<i>Slot Time</i>
n	Número inteiro
l_i	Caminho a ser percorrido pelo N_m sob cobertura do nó fixo N_i
N_i	Nó fixo i
N_m	Nó móvel
d_i	Eixo da cobertura no projeção da linha de visada entre N_i e o nó fixo vizinho.
D_c	Índice de conectividade
\bar{t}_c	Tempo médio de contato
$\bar{\mathcal{V}}_i$	Volume médio de contato
\bar{C}_i	Capacidade média de comunicação
\mathcal{O}	Probabilidade de <i>outage</i> do canal.
T_{tx}	Tempo total para transferência de um pacote entre dois nós
T_{SIFS}	Tempo de duração do SIFS
$AIFSN[3]$	Número de <i>slot times</i> da CW para um pacote com nível de prioridade 3 na pilha EDCA
T_p	Tempo de duração do campo de preâmbulo
T_s	Tempo de duração do campo de sinal
T_{SOFDM}	Tempo de duração de cada símbolo OFDM
$bits_{sv}$	Número de bits do campo de serviço
$bits_{tl}$	Número de bits do campo “tail”.
L_{MAC_H}	Tamanho do campo de cabeçalho em bytes
L_{Dados}	Número de bytes do campo de dados (<i>payload</i>)
$N_{bit_{symbol}}$	Número de bits por símbolo OFDM
L_{ACK}	Número de bytes do campo ACK
T_{SIFS}	Tempo de duração do SIFS

$CW_{min_{AISFN}^{[3]}}$	Mínima duração da CW, em s_t , para um serviço prioridade 3
$CW_{mx_{AISFN}^{[3]}}$	Máxima duração da CW, em s_t , para um serviço prioridade 3
b	Número inteiro
k	Número inteiro
N_{ret}	Taxa de retransmissão em pac/s
N_{tx}	Taxa de transmissão de pacotes em pac/s
R_{ret}	Taxa de retransmissão acumulada normalizada

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	18
1.1 CENÁRIO	18
1.2 MOTIVAÇÃO	19
1.3 OBJETIVOS	20
1.3.1 Objetivo Geral	20
1.3.2 Objetivos Específicos	21
1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	23
2 DESENVOLVIMENTO	24
2.1 INTRODUÇÃO TEÓRICA	24
2.1.1 Fenômenos de propagação:	24
2.1.2 Modelo de propagação	25
2.1.3 Padrões das Redes	30
2.1.4 Protocolos de Roteamento	37
2.2 ANÁLISE TEÓRICA	38
2.2.1 Conectividade da rede	39
2.2.1.1 Classificação da Conectividade	39
2.2.2 Cenários do estudo	44
2.2.2.1 Probabilidade de <i>outage</i> do canal de comunicação e ser empregado	47
2.2.2.2 Análise das redes:	49
2.2.3 Considerações sobre o trabalho	57
2.3 SIMULAÇÃO DOS CENÁRIOS	61
2.3.1 Primeira etapa - Perdas devido à propagação	61
2.3.2 Segunda etapa - Rede em linha	65
2.3.2.1 Conclusão sobre a topologia de rede linear	88
2.3.3 Terceira etapa - Rede em grade uniforme	91
2.3.3.1 Conclusão sobre topologia de redes em grade	101
2.3.4 Conclusão sobre os modelos de redes conectadas estudadas	102
2.3.5 Quarta etapa - Redes disruptivas	103
2.3.5.1 Configuração da rede e do simulador	107
2.3.5.2 Resultados e conclusões	109
3 CONCLUSÃO	115
3.1 GERAL	115
3.2 ANÁLISE DAS REDES CONECTADAS:	115
3.3 ANÁLISE DAS REDES DISRUPTIVAS:	116
4 DESENVOLVIMENTO FUTURO:	118
4.1 TRABALHOS DECORRENTES	118
REFERÊNCIAS	120
Apêndice A – CONFIGURAÇÃO DO NS-2	128

1 INTRODUÇÃO

1.1 CENÁRIO

O conceito de cidade inteligente (*Smart City*) tem como fundamento as Tecnologias da Informação e Comunicação (TIC), que são utilizadas para melhorar o funcionamento das cidades, sua eficiência, competitividade e permitir novas abordagens os problemas de pobreza e privação social (BATTY et al., 2012).

Utilizadas adequadamente, estas TIC contribuem para a melhora da mobilidade urbana, tendo como benefício melhoria nas acessibilidades aos empregos, lazer, oportunidades sociais e assim por diante, envolvendo ou não o espaço urbano, permitindo assim que os cidadãos aumentem sua qualidade de vida (BATTY et al., 2012).

O sistema de transporte público de uma cidade inteligente deve primar pela segurança e satisfação do usuário, provendo, entre outras coisas, rastreamento da localização dos veículos em tempo real e disponibilizando estas informações (LUCENT-ALCATEL, 2019).

O ITS (*Intelligent Transportation System*) refere-se a um conjunto de aplicativos avançados que aplicam informações inteligentes e tecnologias de comunicação no serviço de gerenciamento de transporte e do trânsito . O ITS combina várias tecnologias (coleta de dados, comunicação, mineração de dados, aprendizado de máquina, inteligência artificial e gerenciamento de banco de dados), fornecendo várias aplicações (controle de tráfego, sistemas de detecção de falhas, sistemas de informações e navegação no veículo e sistemas de assistência ao motorista) (ZEAR et al., 2016).

A relevância do transporte público na mobilidade urbana dentro do conceito de Cidades Inteligentes, associada à necessidade de prover o cidadão com um serviço eficiente, confiável, seguro e de custo acessível, é a principal motivação para a realização deste trabalho.

O C-ITS (*Cooperative Intelligent Transportation System*) é um conceito de ITS onde os componentes do sistema compartilham informações entre si com o objetivo de disponibilizar segurança, eficiência, conforto e sustentabilidade a patamares inviáveis em sistemas isolados. O

conceito de C-ITS envolve diversos sistemas de transporte, entre os quais destaca-se o transporte público (HORTON et al., 2016).

1.2 MOTIVAÇÃO

O transporte público desempenha um papel importante na mobilidade urbana dos grandes centros, como exemplo se pode citar o caso de Curitiba, onde o sistema de transporte coletivo é responsável pela movimentação mais que 1,3 milhões de passageiros diariamente (URBS-2019, 2019).

Com base nos conceitos C-ITS é possível à frota trocar mensagens entre si, com os elementos de sinalização viários e com centros de controle. Um dos escopos do C-ITS versa sobre comunicação entre seus componentes (HORTON et al., 2016).

Como trata-se de um sistema complexo, o C-ITS exige que os veículos sejam equipados com uma OBU (*Onboard Unit*) e que os elementos do sistema sejam interconectados por meio de uma infra-estrutura de comunicação, como *backbones* ópticos, sistemas de celular móveis e SRC (*Short Range Communications*) em uma topologia compreendendo comunicação Veículo a Veículo (V2V - *Vehicle to vehicle*), Veículo a Infraestrutura (V2I - *Vehicle to Infrastructure*) e Infraestrutura a Infraestrutura (I2I - *Infrastructure to Infrastructure*) (FESTAG, 2014) (BERENS et al., 2015).

Assim, apresenta-se a necessidade de comunicação entre os componentes cooperativos do C-ITS. O conceito de C-ITS é abrangente e suas propostas visam solucionar questões de mobilidade e segurança do sistemas de transporte, ao passo que as redes formadas por SRC se apresentam como solução para a comunicação no âmbito do C-ITS.

No contexto de redes veiculares híbridas, as unidades de comunicação presentes nos veículos correspondem às OBU e constituem o conjunto de nós móveis da rede. Os elementos à margem das vias formam a infraestrutura e as unidades de comunicação presentes nelas são as RSU (*Roadside Unit*). A rede resultante das OBU e RSU oferecem o suporte de telecomunicações para um C-ITS (HORTON et al., 2016).

A conectividade desta rede veicular híbrida e seu conceito são temas abordados no trabalho (DOUSSE et al., 2002) onde os autores denominam como ad hoc pura a rede formada somente por nós móveis que se comunicam entre si por canal sem fio, e híbrida a rede ad hoc pura acrescida de nós fixos interconectados por rede cabeada. Como extensão daquele conceito de rede veicular híbrida, neste trabalho alguns nós fixos comporão a rede ad hoc pura com os nós móveis e outros nós fixos estabelecerão uma rede cabeada interconectada entre si.

O sistema de transporte público (PTS - *Public Transportation System*) desempenha um papel importante para a mobilidade urbana e pode tirar vantagem imediata de os benefícios C-ITS ao operar sob condições controladas (por exemplo, prioridade do veículo nos cruzamentos) em uma mesma infraestrutura, ou em uma infraestrutura dedicada como do BRT (*Bus Rapid Transit*), por exemplo (DONG et al., 2011) (SEREDYNSKI; VITI, 2016).

Neste cenário proposto, as RSUs podem atuar como *gateway* quando se destinam a conectar as OBU e demais RSUs com a rede externa, ou como *relay* se intermediarem cooperativamente decodificando e repetindo as informações entre outros nós que estiverem simultaneamente ao seu alcance ou entre nós móveis que passam por ele em momentos diferentes, conforme os critérios de encaminhamento do protocolo de roteamento a ser empregado (COTTATELLUCCI et al., 2009).

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 OBJETIVO GERAL

Uma vez disponibilizado recursos de comunicação para os elementos do PST, formando uma rede composta por dispositivos dotados de tecnologia SRC, torna-se possível a implementação de várias funcionalidades propostas pelo C-ITS. O principal objetivo deste trabalho é avaliar o SRC para aplicações C-ITS típicas, como de coleta de informações de PTS (frota de ônibus e RSU de suporte), enviar instruções aos motoristas, permitir comunicação entre os veículos da frota de ônibus e interações com o sistema de controle de trânsito.

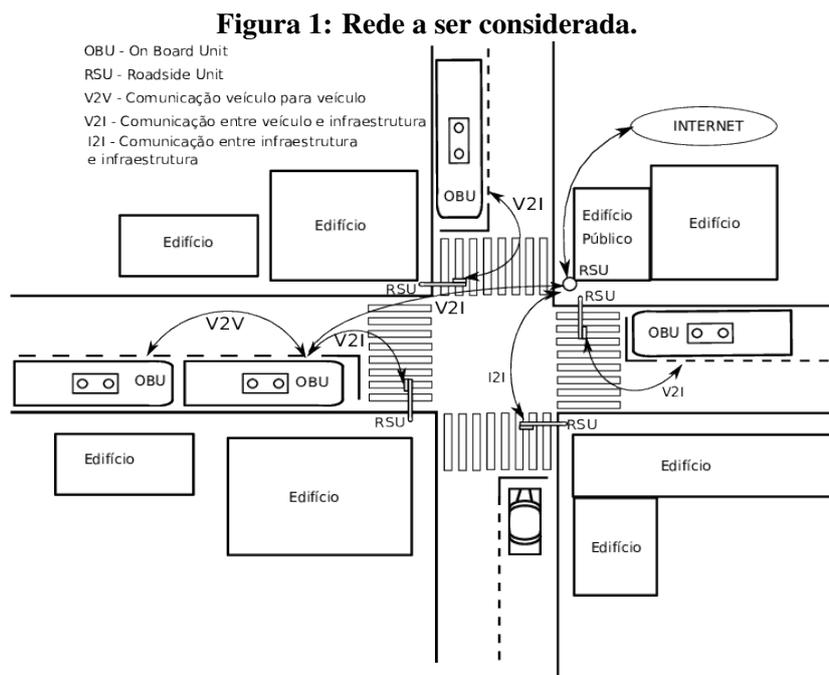
Os nós fixos serão instalados em vias por onde circulam veículos da rede de transporte público, porém ainda surge a necessidade de responder à pergunta: **Qual é a faixa ideal de distâncias a serem observadas entre as várias RSUs?**

A resposta reveste-se de particular importância, uma vez que o custo da implantação e operação da rede será tão grande quanto o número de estações instaladas. A contribuição deste trabalho é estabelecer diretrizes para a distribuição geográfica das RSU em um cenário de rede cooperativa e avaliar o impacto da configuração da rede no desempenho devido ao comportamento do canal e ao protocolo de roteamento.

Além disso, no caso da rede ser disruptiva, nossa contribuição é apresentar duas técnicas de melhorias dos contatos entre os nós e avaliar o ganho obtido na taxa de transferência e a redução do *delay* por meio dessas melhorias.

1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Por meio da Figura 1 é possível compreender o cenário de comunicação entre os diversos elementos do PTS e que serão consideradas neste trabalho. Nela observa-se que os veículos (OBU) podem trocar mensagens entre si e com nós da infraestrutura (RSU) e estes poderão trocar mensagens com outras redes. Tanto um nó móvel como um fixo podem receber e encaminhar mensagens de outros nós.



Fonte: Autoria própria.

A conectividade entre os nós que compõe uma rede define-se, neste trabalho, como sendo a disponibilidade de um caminho (ou rota) formado por uma ou várias arestas E_i , $\{E_1, E_2, \dots, E_k\}$, conectando determinados vértices de interesse, $\{V_i\}$ e $\{V_j\}$. Neste caso a rede é representada pelo grafo $G(V, E)$, onde V é o conjunto de vértices (ou nós) e E é o conjunto de arestas (ou enlaces) (WANG, 2015).

Este trabalho propõe-se avaliar a variação das métricas a serem consideradas, que são o *throughput*, o *delay* e a taxa de descarte de pacotes (PDR - *Packet Discard Rate*) a que uma OBU está sujeita ao circular entre as diversas RSU, considerando um canal com perdas. Para que o impacto nas métricas seja decorrente principalmente devido ao comportamento do canal, será considerado neste trabalho apenas uma OBU por RSU operando como *gateway*.

O *throughput* é o volume de bits úteis recebidos no destinatário com sucesso durante determinado intervalo de tempo, enquanto que a PDR é a taxa de pacotes descartados (diferença

entre os transmitidos e os recebidos) em relação aos transmitidos, durante determinado intervalo de tempo.

Os pontos-chave no roteiro de execução deste trabalho são:

1. Considerar modelos de rede teóricos baseados em cenários urbanos, compostos por nós móveis que se constituem em veículos (com OBU) e por nós fixos que correspondem à infraestrutura (com RSU). Estes nós fixos são distribuídos geograficamente conforme topologia dos elementos de sinalização de trânsito.
2. Neste trabalho tanto os nós fixos como os móveis atuarão como repetidores da mensagem (função de *relay*). Os nós fixos que fazem conexão com outras redes são designados *gateways*.
3. Pesquisa bibliográfica para determinar o modelo de propagação a ser empregado na análise das comunicações na camada física entre os diversos nós, bem como do protocolo de roteamento a ser aplicado neste trabalho.
4. Avaliar a conectividade apresentada pela rede nas comunicações V2V e V2I e o desempenho apresentado em cenários teóricos baseados na distribuição geográfica de elementos de sinalização de trânsito.
5. Com base nos resultados das simulações a serem realizadas na etapa de análise dos modelos teóricos busca-se responder à pergunta: **“Dado um número de nós fixos em uma rede veicular híbrida, como se comporta o desempenho da rede nas diferentes separações entre os nós fixos e qual a cobertura assegurada a dado GW (*Gateway*) contando com reencaminhamento dos pacotes por diversos RF (*Relay Fixo*), quando da troca de mensagens entre elementos desta rede fixa e determinado nó móvel?”**.

Para alcançar o objetivo, será necessário analisar as seguintes questões:

- (a) Que modelo de propagação e parâmetros são adequados para a condução do presente estudo?
- (b) Há um padrão na distribuição dos elementos de sinalização de trânsito em determinadas regiões urbanas?
- (c) Qual a tecnologia empregada nas comunicações veiculares, sua faixa de frequência, potência dos dispositivos, antenas e os padrões aplicáveis?
- (d) Qual o impacto que o número de repetições traz para o *throughput* e PDR da rede?
- (e) Qual o impacto da separação dos nós fixos e da taxa de transmissão de pacotes no desempenho da rede, em termos de PDR e de *throughput*?

Este trabalho terá como premissas globais:

- Este estudo destina-se a analisar uma rede aplicável a PTS no contexto de C-ITS, composta de veículos de transporte público (nós móveis) e elementos de sinalização viária

- (nós fixos) dotados de recursos de comunicação, formando uma rede de topologia híbrida;
- Pela rede assim constituída circularão as mensagens geradas e tratadas pelas aplicações que executam na rede. A topologia da rede proposta neste trabalho deve possuir uma distribuição dos nós tal que represente os padrões encontrados nos grandes centros urbanos e que permita sua aplicação posterior em um cenário real;
 - Os nós móveis se comunicarão entre si (V2V) e com os nós fixos de infraestrutura (V2I) e os nós fixos de infraestrutura se comunicarão entre si também (I2I), tal como pensado para o C-ITS (EZE et al., 2016). Alguns nós de infraestrutura serão os *gateways* para a rede externa e outros atuarão como *relays* juntamente com os veículos que não são a fonte ou o destino das mensagens;
 - Os pacotes serão encaminhados quando um nó móvel cruzar com outro ou com um ponto fixo atuando como *relay*, que atenda aos critérios de encaminhamento em conformidade com o protocolo de roteamento empregado, ou ao passar por um nó de infraestrutura que opere como *gateway*;
 - Será assumida a hipótese de que o mesmo modelo de canal de propagação será aplicável nas comunicações entre os nós móveis, entre os nós fixos, e entre estes e os nós móveis. Considerações envolvendo as diferenças entre os canais, encontradas nas diversas situações V2V, V2I e I2I serão objetos de trabalho futuro;
 - Os nós fixos serão instalados nos pontos ótimos dos cruzamentos, quando forem implantados nestes locais;

1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O presente trabalho está organizado da seguinte maneira:

O Capítulo 2 é realizada pesquisa bibliográfica para delinear a condução deste estudo ao longo da seção 2.1. Neste capítulo é discutida a teoria que fundamenta o escopo deste trabalho e as justificativas para as diversas decisões e escolhas. É realizado o desenvolvimento do trabalho tendo como fundamentação a revisão bibliográfica realizada e os objetivos apresentados na introdução. Ainda neste Capítulo estão os dados utilizados na execução do trabalhos, as justificativas para as escolhas e a demonstração dos resultados.

No Capítulo 3 é apresentada a conclusão do trabalho com as observações sobre os resultados, análise do desempenho e determinação dos fatores que impactaram nos resultados.

No Capítulo 4 são relacionados os trabalhos a serem realizados futuramente.

No Apêndice A são apresentados os *scripts* empregados nas simulações.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 INTRODUÇÃO TEÓRICA

A VANET (*Vehicular Ad-Hoc Network*) é uma das modalidades de redes sem fio, e se caracteriza pela sua mobilidade e abrangência geográfica. A transmissão das mensagens entre os diversos nós envolvidos se dá por meio de modulação das portadoras, codificação de sinal e mecanismos de controle de acesso ao meio.

A onda eletromagnética modulada se propaga no meio livre, interagindo com o ambiente à volta dos nós durante o processo de comunicação, ficando esta onda sujeita aos diversos fenômenos de propagação. Portanto o conhecimento de um modelo de propagação adequado é muito importante na avaliação do comportamento esperado para a rede.

A mobilidade da rede em estudo faz com sua topologia física seja dinâmica (se modifique constantemente) e isto se reflete no comportamento do canal de comunicação entre os elementos da rede, e conseqüentemente nas eventuais rotas dos pacotes criadas pelo protocolo de roteamento.

Para a análise do desempenho dessa rede é necessária a escolha de modelos de propagação (AKHTAR et al., 2013) e protocolos de roteamento adequados e aplicáveis à topologia da rede em estudo (ALVES JUNIOR, 2016) (ZHU et al., 2014). A capacidade de vazão da rede deve ser levada em consideração, pois impacta no desempenho de todo o sistema e na banda disponível aos nós móveis (JARDOSH et al., 2005) (SUN et al., 2012).

Deve-se ainda considerar a possibilidade de interrupção na rede, evento que leva à indisponibilidade de rotas entre alguns elementos da rede e conseqüentemente à impossibilidade de troca de mensagens.

2.1.1 FENÔMENOS DE PROPAGAÇÃO:

Ao se propagar, a onda eletromagnética interage com os elementos do meio, refletindo, difratando, refratando e difundindo. O canal de comunicação sem fio entre a fonte e o

destino apresenta diversos percursos (ou trajetórias) percorridos pela onda eletromagnética, e a interação desta com os diversos elementos ao longo do percurso depende do comprimento de onda e da natureza dos objetos com os quais interage, mas também é influenciada pela mobilidade relativa entre os nós e os elementos do meio (GOLDSMITH, 2005) (RAPPAPORT, 2001) (KRAUS; CARVER, 1973).

A mobilidade dos nós impacta na estimativa das bandas de guarda espectral e temporal, na largura de banda espectral utilizável, no esquema de modulação e no método de acesso ao meio, uma vez que todos eles são afetados pelos efeitos dos mecanismos de propagação no canal (GOLDSMITH, 2005) (RAPPAPORT, 2001). Por isso é necessário um padrão que atenda às especificidades desta rede (CHENG et al., 2008).

A alta mobilidade dos nós leva a um tempo de coerência pequeno. O tempo de coerência é definido como sendo o intervalo de tempo no qual o canal se apresenta invariante. A existência de obstáculos a uma distância considerável comparada àquela os nós, leva a uma banda de coerência comparativamente estreita. A banda de coerência é definida como sendo a largura espectral do canal que apresenta o mesmo ganho. A dinamicidade da rede tem como consequência a dificuldade na equalização do canal (FERNANDEZ et al., 2012).

O nível recebido é influenciado principalmente pelo meio onde a onda eletromagnética se propaga, configuração (inclusive dos nós) e dinamicidade (rapidez de mudança) da rede e frequência da portadora. Há modelos matemáticos para estimar as perdas no canal devido à propagação e ao desvanecimento, alguns empíricos e outros determinísticos (GOLDSMITH, 2005) (RAPPAPORT, 2001) (STÜBER, 2002).

Aspectos também relevantes, são as características da antena a ser empregada. A diretividade consiste na concentração da energia do campo eletromagnético em determinada região espacial, o que deve ser levado em consideração. Igualmente relevante é o ponto de instalação no veículo, uma vez que a onda eletromagnética incidente sobre a antena também pode interagir com outras antenas no veículo e sua estrutura (ECKHOFF et al., 2016) (GAVILANES et al., 2013).

2.1.2 MODELO DE PROPAGAÇÃO

A distribuição dos obstáculos que interagem com a onda eletromagnética e as circunstâncias destas interações são muito complexas. Para o desenvolvimento do presente trabalho, é necessária a realização de pesquisa na literatura objetivando determinar o comportamento do canal em ambiente urbano na frequência empregada nos SRC.

Como ferramentas computacionais para análise do canal, tanto o GEMV², uma implementação em MatLab fundamentada na óptica geométrica (BOBAN et al., 2014), como o 3D-Ray Launching (3D-RL), um modelo computacional baseado em óptica geométrica e Teoria Geométrica da Difração (GRANDA et al., 2017), são muito precisas. Porém, é necessário considerar um sistema que permita a avaliação do desempenho da rede a nível de protocolo também. Esta característica faz parte de simuladores de rede como o NS2 ou o OMNet++.

Há uma implementação do GEMV² sobre o framework Artery do OMNet++ (VIEIRA, 2018). O Artery baseia-se no padrão ETSI (*European Telecommunications Standards Institute*) ITS-G5 (*ETSI Intelligent Transportation System*), um padrão ITS europeu, e o roteamento é baseado no GeoNetworking e no Protocolo de Roteamento Básico, conforme a especificação daquele padrão. Porém, para a evolução deste trabalho no futuro deseja-se maior flexibilidade, de forma a permitir o emprego de outros protocolos de roteamento, além destes.

O modelo de propagação e os parâmetros a serem considerados refletem no desempenho dos protocolos de roteamento. É importante definir o modelo de propagação e a parametrização correta antes de serem efetuadas as simulações, para que o trabalho reflita de forma mais exata um cenário real (ANGELES et al., 2016).

Em (FERNÁNDEZ et al., 2014) foram realizadas campanhas de medição nas faixas de 700 e 5.900 MHz em rodovias, áreas rurais, suburbanas, urbanas com baixa densidade de veículos e urbanas com alta densidade de veículos. As medições foram realizadas nas imediações de Valencia, na Espanha, para as condições em linha de visada e sem linha de visada. Dos resultados é possível extrair os valores mais encontrados para o expoente e o desvio padrão do modelo log-normal.

No trabalho (LV et al., 2016) os autores concluíram que dispositivos VANET com padrão IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) 802.11p apresentam pelo menos 80 % de sucesso na troca de mensagens em ambiente urbano em distâncias de até 350 m. A esta faixa de desempenho os autores denominam de *perfect zone*. No trabalho (MARTINEZ et al., 2010) os autores apontam uma distância maior, de 400 m, para comunicação viável entre os nós em ambientes urbanos. Já no trabalho (WANG et al., 2011) os autores encontraram uma distância de até 500 m como viável em ambientes urbanos.

Os autores de (GALLAGHER et al., 2006) realizaram uma série de medições com 802.11p e verificaram que o desempenho em determinada distância depende do tipo de nós envolvidos na comunicação e da taxa de transmissão empregada. As medições realizadas com linha de visada desobstruída foram consolidadas na Tabela 1, resultando em uma relação entre a PER (*Packet Error Rate*) e a distância entre os nós.

Tabela 1: Throughput versus distância (PER).

		Distâncias R2V e V2V tabeladas							
Taxa (Mbps)		3	4,5	6	9	12	18	24	27
R2V	m	1.906	1.361	1.327	1.229	1.204	1.144	1.084	1.066
	PER %	1,39	1,51	1,21	1,06	2,94	4,15	4,23	5,74
V2V	m	1.109	1.288	880	807	603	579	360	333
	PER %	0,65	0,28	0,63	1,90	0,91	1,30	9,31	12,27

Fonte: (GALLAGHER et al., 2006)

Com base na Tabela 1 os autores concluíam que, com uma taxa de 6 Mbps, o alcance máximo do 802.11p com uma potência de transmissão de 20 dBm na comunicação entre veículo e infra-estrutura é de 1.327 m em uma rodovia com trânsito e sem obstrução, e de 880 m entre veículos nas mesmas condições. No caso de obstrução de visada com um veículo maior que os nós, e com uma potência de transmissão de 29 dBm, o alcance máximo encontrado foi de 230 m. Assim, com base no resultado obtido no trabalho (GALLAGHER et al., 2006) conclui-se que o canal sem fio apresenta diferenças nas comunicações V2V em relação as V2I, apresentando-se mais severo no primeiro caso.

Outro trabalho (EMMELMANN et al., 2010) propõe que a razão de entrega de pacotes (*Packet Delivery Ratio*) cai com a distância entre os nós e depende do ambiente. A estatística da razão de entrega de pacotes em função do ambiente e da distância está relacionada na Tabela 2.

Tabela 2: Razão de entrega de pacotes em função da distância e do ambiente: Campo Aberto, R = Rodovia.

Distância	100 m		200 m		300 m		400 m	
Ambiente	CA	R	CA	R	CA	R	CA	R
PDR	93 %	91 %	86 %	78 %	88 %	67 %	76 %	58 %

Fonte: (EMMELMANN et al., 2010)

Conforme a Tabela 2 mostra, o desempenho do canal é melhor para regiões em campo aberto e para distâncias menores. O trabalho demonstrou haver variabilidade no comportamento do canal sem fio, que depende do ambiente considerado no estudo.

Os autores em (EMMELMANN et al., 2010) citam o trabalho (MASUI et al., 2002) onde os autores sugerem que o critério da distância crítica para determinação do modelo de dois raios seja revista, de maneira a considerar os efeitos dos obstáculos à volta, pois como resultado de medições a distância crítica mostrou-se mais próxima da fonte que o modelo teórico, assim a determinação da distância crítica seria feita por meio da subtração das alturas do transmissor e do receptor de um parâmetro a qualquer, resultando que $d_c = 4 \frac{(h_t - a)(h_r - a)}{\lambda}$, sendo o valor típico

para a na ordem de 0,57 m.

A distância crítica é definida como sendo o ponto em que o elipsoide da primeira zona de Fresnell toca o solo é dada por $d_c = 4 \frac{h_r h_t}{\lambda}$, onde h_r é altura da antena do receptor, h_t é a altura da antena do transmissor e λ é o comprimento da onda eletromagnética (RAPPAPORT, 2001).

O trabalho (CHENG et al., 2007) consolida dois conjuntos de medições conduzidas em duas regiões urbanas da cidade de Pittsburgh, na Pensilvânia, Estados Unidos. As medições foram realizadas com dois veículos com antenas instaladas a 1,51 m (h_t) de altura em um veículo e 1,93 m (h_r) em outro, deslocando-se pelas ruas e variando suas distâncias entre 2 e 600 m. Como conclusão dos trabalhos, é apontado que o modelo de desvanecimento (pequena escala) apresenta-se aderente a uma distribuição Rice (com contribuições de visada direta mais significativa influenciada por múltiplos percursos) até próximo de 100 m. O ganho do canal passa a se comportar segundo uma distribuição Rayleigh próximo de 100 m da fonte e se torna mais severo para distâncias maiores que 100 m.

A Tabela 3 descreve os parâmetros encontrados para um modelo de múltiplos pontos de quebra, onde se pode verificar que os autores em (CHENG et al., 2007) consideraram o valor de 100 m como distância crítica.

Tabela 3: Valores obtidos para o modelo em média escala.

Distância entre os veículos [m]	γ	σ
0-100	2	5,6
100-588	4	8,4

Fonte: (CHENG et al., 2007)

A partir das amostras obtidas na medição, os autores elaboraram a Tabela 3, nela estão consolidados os valores do expoente de propagação e o desvio padrão das medições em dB para emprego em um modelo log-normal com múltiplos pontos de quebra, descrito pela equação 1.

$$P_r[\text{dBm}] = \begin{cases} P_r(d_0) - 10 \gamma_1 \log \left(\frac{d}{d_0} \right) + \chi_{\sigma_1}, & \text{para } d_0 \leq d \leq d_c \\ P_r(d_0) - 10 \gamma_1 \log \left(\frac{d_c}{d_0} \right) - 10 \gamma_2 \log \left(\frac{d}{d_1} \right) + \chi_{\sigma_2}, & \text{para } d > d_c \end{cases} \quad (1)$$

onde P_r é a potência de recepção em dBm, $P_r(d_0)$ é a potência do sinal recebido quando a distância dos veículos é igual à distância de referência d_0 em metros, γ_1 é o expoente de propagação verificado quando a distância entre os veículos encontra-se entre a distância de referência d_0 e a distância crítica d_c em metros, γ_2 é o expoente de propagação quando a

distância entre os veículos é maior que a distância crítica, χ_σ com índices 1 e 2 são os ganhos do canal que apresentam a distribuição gaussiana com média zero e desvio padrão σ_1 entre d_0 e d_c , e σ_2 após d_c .

A potência recebida à distância de referência, $P_r(d_0)$, pode ser calculada por meio da equação 2 (GOLDSMITH, 2005).

$$P_r(d_0) = P_t + 10\log(G_t) + 10\log(G_r) + 20\log\left(\frac{c_0}{f}\right) - 20\log(d_0) - 21,9842 \quad (2)$$

onde P_t é a potência de transmissão em dBm, G_t é o ganho da antena de transmissão em dB, G_r é o ganho da antena de recepção em dB, f , é a frequência do sinal em Hz, c_0 é a velocidade da luz no espaço livre (tomada como igual à do vácuo neste trabalho) em m/s e d_0 a distância de referência, igual a 1 metro neste trabalho.

Observando-se a equação 1, e os expoentes de propagação da tabela 3, observa-se que quando a distância entre os nós está entre distância de referência e a distância crítica o ganho médio do canal se comporta segundo o espaço livre. Quando a distância entre os nós é maior que a distância crítica, então o ganho médio do canal se comporta conforme o ganho médio do modelo de dois raios.

O trabalho propõe também uma distribuição Nakagami-m para capturar o desvanecimento em pequena escala. A Tabela 4 consolida os parâmetros para a distribuição Nakagami-m encontrados no trabalho (CHENG et al., 2007) para cada faixa de distâncias entre os veículos em metros.

Tabela 4: Valores obtidos para o modelo em pequena escala.

Distância entre os veículos [m]	Parâmetro m
0-4,7	3,01
4,7-11,7	1,18
11,7-28,9	1,94
28,9-41,6	1,86
71,6-177,3	0,45
177,3-439	0,32

Fonte: (CHENG et al., 2007)

Para a obtenção da Tabela 4 os autores do trabalho (CHENG et al., 2007) tomaram os valores obtidos da medição (em watts) e por meio de média móvel extraíram o componente de larga escala. A componente de larga escala assim obtida foi utilizada para normalizar os valores medidos (de forma que a média da raiz quadrada da amplitude tivesse valor unitário, independentemente da distância). Por fim, os valores de distância de separação foram agrupados em faixas formando uma distribuição empírica a ser comparada com a distribuição

Nakagami-m.

2.1.3 PADRÕES DAS REDES

Como o objetivo deste trabalho é avaliar o SRC para gerenciamento e informações de transporte público e para coletar informações de um PTS baseado em ônibus, que é uma aplicação típica em C-ITS, nesta seção pretende-se apresentar uma revisão dos principais padrões mundiais de SRC.

A nível de camada física, o DSRC/WAVE (*Dedicated Short-Range Communications/Wireless Access for Vehicular Environments*) e o C2C-CC/ITS-G5 (*CAR to CAR Communication Consortium/ETSI Intelligent Transportation System - G5*) empregam o padrão IEEE 802.11p para uso em canais de serviço. Por estes canais de serviço podem trafegar os pacotes de dados de aplicações gerais, que não necessariamente se relacionam com segurança de trânsito (LEONARD, 2016) (HARDING et al., 2014).

O DSRC/WAVE opera na faixa de frequências de 5.850 a 5.925 MHz, possui 7 canais com espaçamento de 10 MHz não sobrepostos e numerados de 172 a 184 (somente números pares). Destes sete canais, um é de alta potência para uso em segurança pública (184) com 40 dBm EIRP (*Effective Isotropic Radiated Power*), um de controle (178) com potências de 33 ou 44,8 dBm EIRP e um destinado a aplicações de segurança a vida (172) com potência de 33 dBm. Há quatro canais de serviço para uso geral dos quais dois (180 e 182) podem operar com 23 dBm EIRP e dois (174 e 176) com 33 dBm EIRP.

No DSRC/WAVE, o IEEE 802.11p (camada física) opera empilhado com o IEEE 1609.3 e o IEEE 1609.4 (camadas de acesso ao meio e enlace de dados), disponibilizando um sistema multi-canalizado em frequência e destinado à segurança de trânsito, acesso a informações e entretenimento, permitindo a alternância de uso do dispositivo de comunicação entre o canal de controle e os diversos canais de serviço (SONG, 2017).

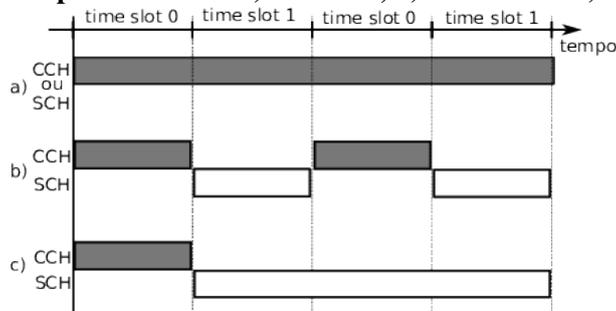
A especificação do IEEE 1609.4 cria uma rede síncrona com uma temporização de quadro de 100 ms e multi-canalizada com três modos de operação, dependendo da maneira como ocorre a alternância entre os canais (IEEE1609.4, 2016):

1. O primeiro modo é denominado contínuo e neste modo o nó opera em um SCH (*Service Channel*) ou no CCH (*Control Channel*), sem comutar para outro. Entretanto o DSRC/WAVE estabelece que o SCH é facultativo e o CCH obrigatório, portanto uma estação com apenas um rádio não pode permanecer continuamente no SCH.
2. O segundo modo é alternado e neste modo o nó alterna entre o CCH e um SCH a cada 50 ms e permanece disponível para troca de dados durante 46 ms em cada um deles,

mantendo uma banda de guarda de 4 ms durante as comutações.

3. O terceiro é o imediato, e neste modo o nó comuta imediatamente ao receber uma mensagem WSA (*Wave Service Advertisement*) para o SCH onde há um serviço de interesse anunciado e permanece neste canal até findar a atividade, então retorna ao CCH.

Figura 2: Tipos de acesso: a) contínuo, b) alternado e c) imediato.



Fonte: (IEEE1609.4, 2016)

Alguns autores apontam quatro modos de comutação de canal, sendo os dois primeiros idênticos ao exposto. No terceiro modo, o nó comuta imediatamente ao SCH de interesse e retorna ao CCH no próximo ciclo de sincronismo. No quarto modo, o nó comuta para o SCH de interesse ao término da temporização do canal inicial (normalmente o CCH) e retorna ao término da atividade (AHMED et al., 2013) (TORABI; GHAFAROKHI, 2017) (YOO; KIM, 2013).

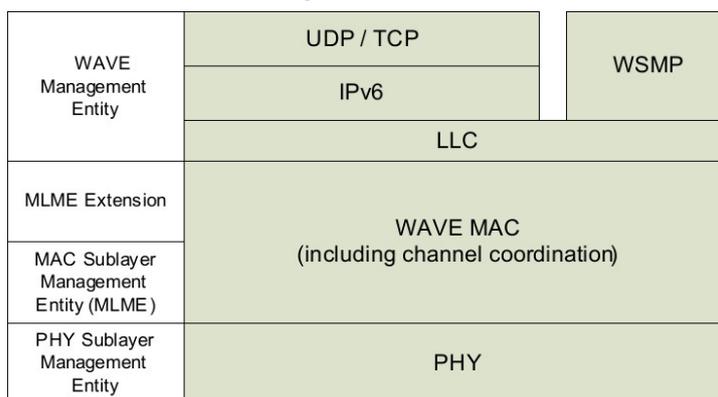
O WSMP (*Wave Short Message Protocol*) destina-se ao uso em mensagens de segurança do trânsito e outras aplicações. Consiste em protocolo assemelhado ao IP, porém com cabeçalho reduzido para melhor eficiência de uso da rede. Para as aplicações em geral pode ser utilizado o protocolo IP (*Internet Protocol*) (EMMELMANN et al., 2010).

Os interfaceamentos do padrão DSRC/WAVE estão descritos de forma simplificada na Figura 3(a), onde se verifica os planos de gerenciamento e de dados do DSRC/WAVE. No plano de dados se observa a existência de duas pilhas separadas, uma com pacotes IPv6 (IP versão 6) e outra com mensagens WSMP. Cada pilha tem seu próprio mecanismo de fluxo de dados. A Figura 3(b) mostra o fluxo IP.

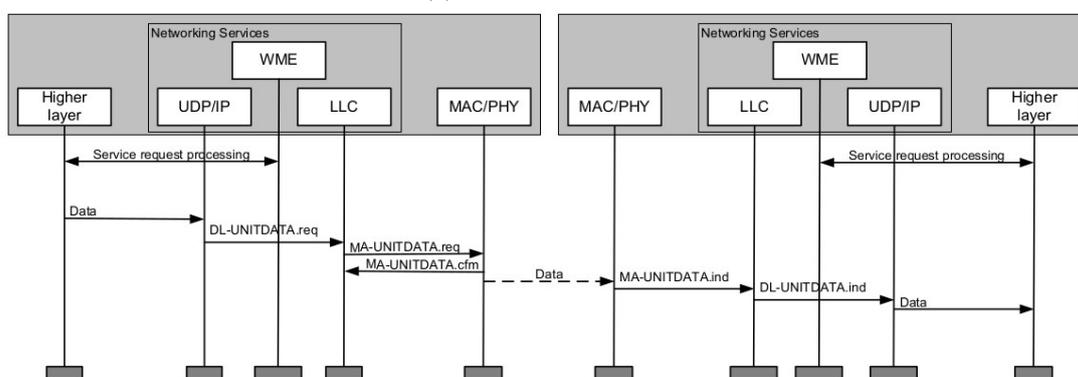
O padrão DSRC/WAVE permite o tráfego de aplicações IP baseados em IPv6 e incluem informação e entretenimento. Os dados destas aplicações trafegam nos SCH e mensagens destinadas à segurança de trânsito não podem utilizar a pilha IPv6 (EMMELMANN et al., 2010) (BOUK et al., 2015) (SONG, 2017).

Na Europa há atividades conjuntas visando especificações para o ITS por dois organismos diferentes, o ETSI e a ISO (*International Organization for Standardization*).

Figura 3: Planos de gerenciamento de dados IEEE1609.3/4 e fluxo dos pacotes IP.
 (a) Planos de gerenciamento e de dados.



(b) Fluxo dos dados IP.



Fonte: (IEEE1609.3, 2016)

Ambos possuem especificações guarda-chuva para os diversos subsistemas do SRC. O ETSI trabalha de forma harmônica com a ISO buscando criar especificações que viabilizem o C-ITS na Europa (KARAGIANNIS et al., 2011) (EZE et al., 2016) (ZEADALLY et al., 2012) (ETSI-EN-302-663, 2019) (ISO-21217-2014, 2014).

A ISO, por meio do comitê técnico TC-204 desenvolve diversas especificações para ITS sob o acrônimo CALM (*Communications Architecture for Land and Mobile*), incluindo sistemas de comunicação e redes (KARAGIANNIS et al., 2011) (EZE et al., 2016) (ZEADALLY et al., 2012) (ETSI-EN-302-663, 2019) (ISO-21217-2014, 2014).

A arquitetura de referência do CALM é especificada na norma ISO 21217 e para cada funcionalidade da estação e cada tecnologia de acesso, a ISO apresenta uma norma específica (ISO-21217-2014, 2014). A norma ISO 21215 especifica a camada física e de acesso ao meio para sistemas SRC, bem como a sua canalização. Descreve também a camada física, que é compatível com IEEE 802.11p, e o acesso ao meio, que é compatível com o IEEE 1609.4 (ISO-21215-2018, 2018).

O ETSI publicou o ITS-G5, um conjunto de padrões buscando viabilizar o SRC no âmbito do C-ITS europeu e a camada física especificada é compatível com o 802.11p (ETSI-EN-302-663, 2019). Um consórcio de fabricantes de veículos, equipamentos e instituições de pesquisa formou o C2C-CC, que entre outras especificações para as interfaces de comunicação, propuseram o conjunto ITS-G5 no âmbito do SRC (CAR2CAR, 2007).

O ITS europeu tem designada a canalização de operação conforme segue (BOSSOM et al., 2008) (STROM, 2011):

- O G5A é composto de três canais de 10 MHz para comunicação de segurança de trânsito, sendo um CCH de 33 dBm, e dois SCH um de 33 (SCH1) e outro de 23 dBm (SCH2), distribuídos na banda de 5.875 a 5.905 MHz (ETSI-TR-202-663, 2009).
- O G5B destina-se à eficiência de trânsito e mensagens de aplicações não relacionadas a segurança de trânsito, é composto de dois canais de 10 MHz cada, sendo um (SCH4) de 0 dBm, outro (SCH3) de 23 dBm, ocupando a faixa de 5.855 a 5,875 MHz (HORTON et al., 2016).
- O G5C é compartilhado com aplicações RLAN/BRAN (*Radio Local Area Networks/Broadband Radio Access Networks*) e ocupa a faixa de 5.470 a 5.725 MHz. Na Europa esta faixa é também regulada pela norma CEPT (*European Conference of Postal and Telecommunications Administrations*) ECC/DEC/(04)08 (ETSI-TR-102-492-2, 2006) (STROM, 2011).
- Há, ainda, o grupo G5D cuja implantação está prevista para o futuro, que ocupará a faixa de 5.905 a 5.915 MHz e é composto de dois canais de 10 MHz cada um (SCH5 e SCH6), com potência limitada a 0 dBm (HORTON et al., 2016) (ETSI-TR-102-492-2, 2006).

No Japão há padrões para SRC sob o escopo da ASV (*Advanced Safety Vehicles*). O sistema é implementado em duas faixas de frequência, uma faixa com um canal para aplicações de segurança centrado em 760 MHz, ocupando uma banda de 755,5 a 764,5 MHz, é operado com uma densidade de potência de 10 dBm/MHz. Este canal emprega o padrão IEEE 802.11p na camada PHY (*Physical Layer*), e é duplexado no domínio do tempo, e empregado para mensagens de emergência ou segurança e é regulamentado pela norma expedida pela ARIB (*Association of Radio Industries and Businesses*), a ARIB STD-T109 (HEINOVSKI et al., 2016).

A faixa em 5,8 GHz é normatizada pela ARIB STD-T75, que em conjunto com a ARIB STD-T55 tem aplicação em sistemas de pedágio. Ela destina dois canais (o 5º e o 7º) para cobrança eletrônica (ARIB-STD-T75, 2001).

Por meio da ARIB STD-T75 foi designada a faixa de 5.770 a 5,850 MHz para uso com duplexação no domínio da frequência, por meio de 7 canais não sobrepostos de uplink e 7 canais de downlink (passo de duplexação de 40 MHz) com separação de 5 MHz entre canais. Seu uso não é restrito a emergência ou a segurança, possui suporte a aplicações IP e não-IP e foi complementada por meio da ARIB STD-T88 para as camadas de controle enlace de dados e de protocolo de controle de rede (ARIB-STD-T88, 2004) (KARAGIANNIS et al., 2011).

Tabela 5: Comparação entre as configurações do SCH nos SRC.

Padrão C-ITS	Potência do SCH	Canais SCH	Padrão de Acesso ao meio
C2C	23 and 0 dBm	2	ETSI EN 302 663
ASV	14 dBm (mobile)	5	ARIB STD-T88 IEEE 1609.3
DSRC	33 and 23 dBm	4	and IEEE 1609.4

Fonte: A autoria própria.

A potência máxima de transmissão é de 10 ou 300 mW para estações fixas de classe 1 (cobertura de até 10 m) e classe 2 (cobertura entre 10 e 30 m), respectivamente. A potência do móvel deve estar entre 8 e 14 dBm EIRP (ARIB-STD-T75, 2001).

O 802.11p é definido na interface física dos SCH do C2C e do DSRC. O ASV utiliza um padrão de camada física próprio e diferente dos outros dois. Entre os sistemas que utilizam 802.11p na camada física, o DSRC apresenta disponibilidade de maior número de SCH disponível. Portanto, devido a disponibilidade de maior número de SCH, este trabalho será desenvolvido considerando as especificidades do DRSC, quando aplicável. A Tabela 5 resume as diferenças entre os SCH dos três padrões.

O 802.11p é baseado no 802.11a, portanto os quadros apresentam funcionalidades e estruturas semelhantes e possuem mesmos esquemas de modulação OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplamente*). Porém existem diferenças em alguns parâmetros. A Tabela 6 destaca as diferenças entre parâmetros dos dois padrões.

A taxa de dados depende do esquema de modulação empregado e podem ser BPSK (*Binary Phase Shift Keying*), QPSK (*Quadrature Phase Shift Keying*), 16 QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*) e 64 QAM. As subportadoras do sistema OFDM do padrão 802.11p podem ser moduladas conforme o esquema descrito na Tabela 7 (ABDELGADER; LENAN, 2014).

O IEEE802.11p possui uma versão de EDCA (*Enhanced Distributed Channel Access*)

Tabela 6: Diferenças entre 802.11a e 802.11p.

Parâmetro	802.11a	802.11p
Largura de banda OFDM (MHz)	20	10
Espaçamento entre subportadoras (MHz)	0,3125	0,15625
Período do IFFT (T_{IFFT})	3,2 μ s	6,4 μ s
Duração do CHIP	50 ns	100 ns
Tempo de guarda, igual ao do prefixo cíclico, $CP = 1/4T_{IFFT}$	0,8 μ s	1,6 μ s
Duração total do símbolo OFDM, $T_S = CP + T_{IFFT}$	4 μ s	8 μ s
Número de CHIPS por símbolo OFDM	80	80
Número de símbolos no prefixo cíclico	16	16
Duração de cada símbolo de treinamento curto	0,8 μ s	1,6 μ s
Duração total dos símbolos de treinamento curto	8 μ s	16 μ s
Duração do símbolo de treinamento longo	3,2 μ s	6,4 μ s
Duração total dos símbolos de treinamento longo	6,4 μ s	12,8 μ s
Duração total do preâmbulo	16 μ s	32 μ s

Fonte: (ABDELGADER; LENAN, 2014)

Tabela 7: Esquema de modulação e taxa de dados 802.11p.

Tipo de modulação	BPSK		QPSK		16-QAM		64-QAM	
Taxa de codificação	1/2	3/4	1/2	3/4	1/2	3/4	2/3	3/4
Taxa de bits codificada em Mbps	6		12		24		36	
Taxa de dados em Mbps	3	4,5	6	9	12	18	24	27
Bits de dados por símbolo OFDM	24	36	48	72	96	144	192	216

Fonte: (ABDELGADER; LENAN, 2014)

para conferir diferentes níveis de QoS (*Quality of Service*) com as devidas priorizações aos serviços rodando na rede (SONG, 2017) (SYED; ROH, 2016).

A cada categoria de acesso (AC - *Access Category*) há valores específicos de parâmetros associados ao uso do canal, como tamanho da janela de contenção (CW - *Contention Window*), o espaçamento inter-quadros arbitrário (AIFS[AC] - *Arbitrary Inter-Frame Space*) e o número de espaços inter-quadros arbitrários (AIFSN[AC] - *Arbitrary Inter-Frame Space Number*) (BARRADI et al., 2010).

O AIFSN corresponde ao DIFS (DCF *Inter-Frame Space*) empregado no DCF (*Distributed Coordination Function*) (SONG, 2017) (SYED; ROH, 2016) (BARRADI et al., 2010). Os valores dependem da prioridade da AC, assumindo valores menores para pacotes de maior prioridade, conforme listado na Tabela 8 (BARRADI et al., 2010).

Nas filas de prioridade, o EDCA do IEEE 802.11p usa CSMA-CA (*Carrier sense multiple access with collision avoidance*) para o encaminhamento das mensagens, onde os AIFSN são empregados para determinar o tempo de espera em escuta, antes de fazer uma

Tabela 8: EDCA: Parâmetros padrão para o IEEE 802.11p.

AC	CWmin	CWmax	AIFSN[AC]
3	15	1023	9
2	7	15	6
1	3	7	3
0	3	7	2

Fonte: (BARRADI et al., 2010)

tentativa de transmissão. A ocorrência de colisões podem se dar internamente no *scheduler*, onde ocorre a colisão virtual, ou no canal sem fio (SONG, 2017).

Cada pilha de prioridade atua como uma estação, encaminhado o pacote ao *scheduler* na temporização da AIFS. Podem ocorrer deferências (*backoff*) tanto no *scheduler* como no canal sem fio. O intervalo de *backoff* é calculado com base em um número aleatório entre 0 e CWmin(AC) (*Minimum contention window for Access Category AC*) na primeira tentativa, dado pela expressão $T_b = \text{rand}[0; 2^n(\text{CWmin})]s_t$, onde s_t é o “slot time”. O *backoff* dobra a cada tentativa n com colisão (*backoff* binário exponencial) até o limite de CWmax(AC) (*Maximum contention window for Access Category AC*). Atingido o número máximo de tentativas o quadro é descartado (SONG, 2017).

Além dos padrões SRC, há discussão quanto ao suporte a redes com características do ITS (baixa latência e alto *throughput*) na rede móvel de 5ª geração, seguindo a topologia V2X (*Vehicle-to-Everything*) (SLAWOMIR, 2017).

A 5GAA (*5G Automotive Association*) é uma associação formada por fabricantes de veículos e equipamentos de telecomunicações: Audi, BMW, Ericsson, Huawei, Intel, Nokia, Qualcomm e Daimler que destina-se a promover o desenvolvimento da telefonia móvel celular de 5ª geração, de forma a viabilizar o suporte a C-ITS, criando o conceito de C-V2X (*Cellular Vehicle-to-Everything*).

Para comunicação V2V os novos releases do LTE (*Long Term Evolution*) estão propondo o *Sidelink*, com uso da banda de frequências destinadas aos ITS para comunicação entre os veículos (MOLINA-MASEGOSA; GOZALVEZ, 2017) (5GAA, 2019).

Como resultado da avaliação dos padrões de rede, concluiu-se ser possível empregar os padrões SRC atuais para aplicações C-ITS dentro do escopo desta pesquisa. Os padrões permitem o emprego de aplicações baseadas em IP (IPv6, no caso do DSRC) não relacionadas a segurança de trânsito e, entre os sistemas, entre os sistemas que utilizam o padrão IEEE 802.11p na interface física, o DSRC apresenta maior número de SCH disponível.

2.1.4 PROTOCOLOS DE ROTEAMENTO

As redes ad hoc móveis (MANET - *Mobile Ad hoc NETwork*) são redes móveis que incluem as veiculares (VANET), sendo estas últimas caracterizadas pela maior mobilidade dos nós. Como trata-se de uma rede com nós de alta mobilidade, as rotas que se estabelecem têm pouca duração e necessitam de protocolos de roteamento adequado (KIHLE et al., 2008).

A classificação dos protocolos de roteamento pode ser baseada nos mecanismos de distribuição de mensagens, ou roteamento, e podem ser *Unicast*, *Multicast/Geocast* e *Broadcast* (SPAHO et al., 2011).

Distribuição de mensagens *unicast* se caracteriza-se por apresentar mensagens originadas de um nó e destinadas a outro na mesma rede, diretamente ou por saltos devido à repetição por outros nós. O protocolo de roteamento pode utilizar abordagem baseada em topologia ou posição. Encaminhamento *unicast* se aplica a transferências de dados de informação e entretenimento ou tarifação (SPAHO et al., 2011).

Os protocolos de roteamento para aplicações *unicast* são classificados em: (i) gulosos buscam rotas com número mínimo de saltos, por meio da conexão dos nós com seus vizinhos ao alcance e que estejam mais remotos, em direção ao nó de destino, (ii) oportunistas usam a técnica armazena-transporta-encaminha (SCAF - *Store, CArry and Forward*), aguardando outro nó que atenda ao critério para encaminhamento rumo ao nó de destino, ou entregando-o diretamente ao nó de destino, (iii) baseado em trajetória utilizam conhecimento sobre as rotas até o nó de destino e encaminham o pacote ao longo de uma, ou mais, dessas rotas (AGRAWAL et al., 2017) (EMMELMANN et al., 2010).

Os protocolos de roteamento podem ser baseados em topologia ou baseados em posição (ou geográficos). Os protocolos baseados em topologia roteiam com base na informação que os nós possuem sobre os enlaces ativos na rede, e podem ser (i) proativos se as tabelas de rotas que são atualizadas por meio de mensagens de controle aos nós vizinhos, e a consultam quando do envio de um pacote a determinado nó destino, sendo indicadas para redes de baixa mobilidade, ou (ii) reativos quando a descoberta de rota somente é feita ao enviar um pacote a determinado destino, para isso eles utilizam inundação para a descoberta da rota, a resposta da rede, que permite a descoberta da rota e o encaminhamento posterior das mensagens, se dá por meio de comunicação *unicast* (ZHANG, 2015) (ALI, 2013) (AGUIAR, 2016) (ALI, 2013).

Há um terceiro tipo, além do proativo e do reativo, denominado híbrido. Estes protocolos dividem a rede em zonas e quando o pacote for trocado entre os nós de uma mesma

zona, a descoberta da rota é proativa, e se o pacote for trocado entre nós de zonas diferentes, a descoberta da rota é reativa (MALAGAR; KUMAR, 2017).

Em redes com elevada mobilidade, executando uma aplicação onde as mensagens são trocadas entre dois nós, configurando encaminhamento *unicast*, é possível o emprego de um protocolo de roteamento baseado em topologia e reativo. Entre os protocolos reativos está o AODV (*Ad hoc On demand Distance Vector*) (PAUL et al., 2011).

2.2 ANÁLISE TEÓRICA

Neste trabalho será considerada a hipótese de que um nó fixo pode ser instalado em um elemento de sinalização de trânsito ou um equipamento público qualquer com fonte de energia e proteção contra acesso físico, como um semáforo por exemplo. No caso deste nó fixo repetir as mensagens ele será identificado como *relay fixo* (RF) e caso o nó fixo conectar a rede veicular híbrida a outra rede de telecomunicações disponível naquele local, ele será identificado como *gateway* (GW)

Os veículos constituirão a rede de nós móveis. Se um nó móvel atuar como repetidor, ou nó intermediário, o mesmo será identificado como *relay móvel* (RM) e se for o nó com o qual o *gateway* estiver trocando as mensagens o mesmo será identificado como *nó móvel* (NM).

A distribuição dos nós de infraestrutura não se dá de maneira uniforme em toda a área urbana, mas apresenta uma concentração maior na região central e mais disperso nas áreas mais suburbanas, conforme pode-se observar na aplicação “sinal verde” da CET (Companhia de Engenharia de Tráfego de São Paulo) (CET...), ou do mapa de distribuição de semáforos da cidade de Toronto, no Canadá (TORONTO, 2019).

Um nó poderá apresentar mais que uma função, assim sendo, determinado GW poderá ser RF para encaminhar mensagens de outro GW e um NM poderá ser destinatário de determinada mensagem em um instante e atuar como RM para o encaminhamento de outra, destinada a outro NM.

No trabalho (CHENG et al., 2007), que serviu de base para a determinação dos parâmetros do modelo de propagação a ser utilizado, os autores empregaram dois veículos (V2V) para execução das medições do canal. Em um deles a altura da antena foi 1,51 m, e no outro 1,93 m. Neste trabalho não será considerada a diferença no canal devido a comunicação se dar entre nós fixos, entre nós móveis e entre móveis e fixos, ou devido à diferença na altura das antenas por serem pensadas em ônibus e elementos de sinalização das vias. O impacto na propagação do sinal devido às diferenças entre cenário considerado em (CHENG et al., 2007) e

o cenário deste trabalho será objeto de trabalho futuro.

Neste trabalho, para a determinação da distância entre os nós fixos, será assumida uma multiplicidade decorrente da distância intermediária entre os elementos de sinalização viária de referência adotados neste trabalho, os semáforos. Conforme análise apresentada na seção 2.2.2, as distâncias entre os nós fixos a ser adotada serão 300, 450, 600 e 900 m para redes lineares e 300, 450 e 600 m para redes em grade (múltiplos de 150 m). Esta escolha se baseia no fato de que 150 m é um valor intermediário entre as distâncias mínima e máxima encontrada no cenário urbano de referência indicado naquela seção.

Não será abordado neste trabalho o mecanismo que a rede utilizará para que os nós móveis transitem pelas sub-redes dos diferentes *gateways* quando estiverem passando entre eles, permanecendo endereçáveis pela aplicação central. Como proposta de trabalho futuro está a avaliação de uma solução para as camadas de rede e superiores, quanto à aplicabilidade e desempenho do Mobile IP (IETF RFC6275, 2011) e de técnicas de autoconfiguração das redes móveis (VANET).

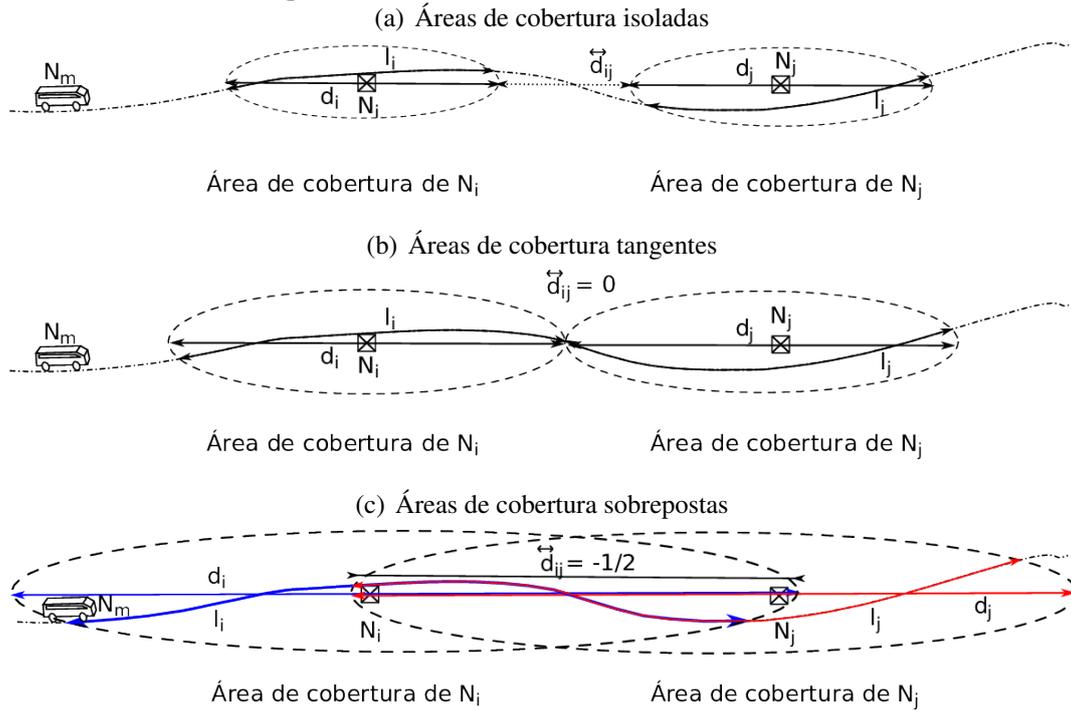
2.2.1 CONECTIVIDADE DA REDE

Define-se neste trabalho a *área de cobertura* como sendo a região espacial ao redor de determinado nó N_i onde, se colocado outro nó móvel, N_m , o mesmo não percebe variação significativa no throughput.

2.2.1.1 CLASSIFICAÇÃO DA CONECTIVIDADE

Os nós fixos podem formar redes com diferentes índices de conectividade, dependendo da configuração de cada um dos nós envolvidos, tais como potência de transmissão, sensibilidade, tipo de modulação, ganho de antena e perdas em conexões e filtros. A conectividade depende também das condições de propagação do canal e da distância entre os nós, conforme mostrado na Figura 4.

Conforme se extrai da Figura 4, l_i é o caminho sob cobertura do nó N_i , l_j é o caminho sob cobertura do nó N_j , N_m é um nó móvel, N_i e N_j são nós fixos, d_i é o comprimento do eixo da região de cobertura do nó N_i na direção do nó N_j , d_j é o comprimento do eixo da cobertura do nó N_j na direção do nó N_i , $\overleftrightarrow{d_{ij}}$ é a distância entre as bordas da área de cobertura dos nós N_i e N_j .

Figura 4: Áreas de cobertura de nós vizinhos.

Fonte: Autoria própria

Neste trabalho, define-se *índice de conectividade* da rede, D_c , como sendo

$$D_c = \frac{\overleftrightarrow{d_{ij}}}{\max[d_i, d_j]} \quad (3)$$

onde $\max[d_i, d_j]$, é o maior valor entre d_i e d_j .

Neste trabalho definem-se redes com conexão persistente, intermitente e desconectadas em função do índice de conectividade da rede.

Redes com conexão persistente: No caso de $D_c \leq -\frac{1}{2}$ os nós fixos estão ao alcance um do outro e existem trajetos l que asseguram diversidade de comunicação a N_m , isto é, trajetos que estão sob cobertura simultânea de N_i e N_j .

Redes com conexão intermitente: Quando $-\frac{1}{2} < D_c \leq 0$, existem trajetos l que passam pelas áreas de cobertura de N_i e N_j que permitem ao móvel estar coberto por pelo menos uma destas estações, mas os nós fixos não estão sob cobertura recíproca.

Redes parcialmente desconectadas: Quando uma rede for composta por k nós fixos atuando como RF e GW e houver um segmento da rede entre os nós i e j , tal que $[i, j] \in [1, k]$ e um nó móvel N_m que circular no intervalo $[i, j]$ estiver conectável a pelo menos um dos nós fixos $\in [i, j]$, e fora deste intervalo apresentar conectividade disruptiva com os demais nós ao longo

do caminho, diz-se que sua conectividade é parcial, ou que a rede é parcialmente desconectada (CRUZ-SANCHEZ et al., 2010).

Redes disruptivas: Se $D_c > 0$ não existe trajeto l por onde possa circular um nó móvel N_m solitário em qualquer trecho entre regiões de cobertura dos nós N_i e N_j que não encontre interrupção na comunicação.

Quando a rede apresenta conexão persistente, os nós fixos estão sob cobertura recíproca, então é possível sua cooperação para o reencaminhamento da mensagem entre o GW e o nó móvel. Assim sendo, se alguns nós fixos operam como GWs para a rede, outros podem operar como RFs, ampliando a cobertura do serviço dos GWs. Se a conexão for intermitente, então não é possível aos nós fixos atuarem cooperativamente por si mesmos, pode ocorrer cooperação se um nó móvel atuar como RM (*Relay* móvel) entre eles.

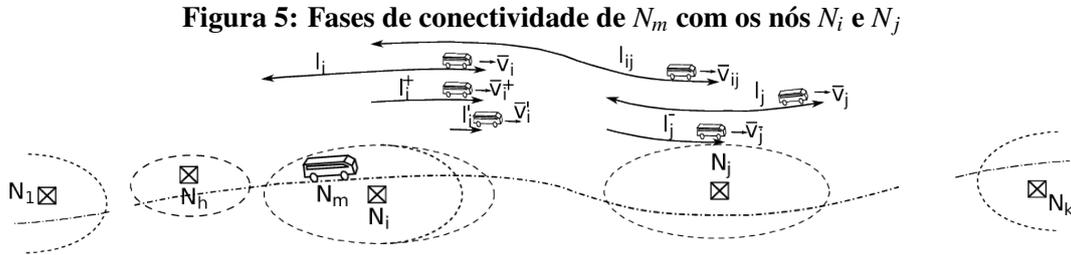
Uma rede de conectividade parcial apresenta alguns nós com conexão persistente, outros nós com conexão intermitente e ainda nós com conexão disruptiva. No trabalho (LAKKAKORPI et al., 2010) os autores trabalharam o roteamento adaptativo, onde os nós com conexão persistente empregam o protocolo AODV para descoberta de rotas e encaminhamento de pacotes e, caso o nó destino esteja desconectado, empregam um dos protocolos para redes tolerantes a atraso para encaminhamento de *bundles*. No caso de uma rede disruptiva, é necessário o emprego de protocolos específicos (IETF RFC4838, 2007) como forma de assegurar a comunicação entre os nós.

O protocolo bundle: Devido à conexão intermitente, as DTN (*Delay/Disruption Tolerant Networking*) operam com armazenamento, transporte e encaminhamento de mensagens (SCAF), usam protocolos de roteamento oportunistas e possuem uma camada denominada *bundle* na pilha de protocolos, ou protocolo *bundle* (IETF RFC4838, 2007). Este protocolo implementa os mecanismos para enviar os dados pela DTN de forma que as mensagens individuais são estruturadas em blocos, denominados *bundles*. Estes blocos, junto com as mensagens, trazem informações necessárias para permitirão à aplicação existente no nó de destino promover o processamento das mensagens contidas neles. Portanto, o *bundle* refere-se ao protocolo de pacotes das DTN e também ao conjunto, ou bloco, de mensagens organizadas e transferidas conjuntamente às informações necessárias para seu processamento no nó de destino.

Se não houver suporte nativo ao protocolo *bundle* nos nós da rede disruptiva, pode ser empregado *proxy* da camada de aplicação que permitirá o uso de aplicações DTN (IETF RFC4838, 2007).

Se uma rede disruptiva é provida de recursos para armazenar, transportar e transferir

dados nas condições de ausência de conectividade, a mesma é uma rede tolerante a interrupção, ou rede tolerante a atraso (DTN) (BENAMAR et al., 2014). Uma rede disruptiva depende de nós móveis para o transporte dos dados (*bundle*), que ao mesmo tempo são RM para os dados de outros nós e ao mesmo tempo são N_m , isto é, origem/destino de dados.



Fonte: Autoria própria.

Seja a rede da Figura 5, disruptiva e composta de k nós fixos, um nó móvel que percorre uma trajetória ao longo deles, e considere-se, ainda, que o tempo necessário para a troca de mensagens entre os nós seja t' . Da Figura 5, tem-se um nó móvel N_m que circula entre o nó N_h e o nó N_j passando por N_i com velocidade média \bar{v}_i sob a cobertura do nó N_i (que compreende todo o trajeto l_i), sendo \bar{v}'_i a velocidade média do nó N_m no trecho l'_i , o tempo médio de contato, \bar{t}_c , com N_i é dado por

$$\bar{t}_{c_i} = \frac{l_i}{\bar{v}_i} - t' \quad (4)$$

onde l_i é o comprimento do caminho sob a região de cobertura de N_i .

A expressão 4 mostra que, embora o trecho l'_i da Figura 5 pertença à área de cobertura do nó N_i , se o tempo necessário para transmitir a mensagem for superior a $t'_i = \frac{l'_i}{\bar{v}_i}$, ela não poderá ser transmitida inteiramente neste trecho, uma vez que o N_m sairá da cobertura de N_i antes da mensagem ser totalmente transferida. Isto ocorrerá quando o nó N_m estiver saindo da área de cobertura do nó N_i .

A equação 4 reveste-se de particular importância, uma vez que o tempo de contato é proporcional à distância que um nó oferece de cobertura a outro, inversamente proporcional à velocidade média entre os nós e depende do tempo necessário para a transmissão da mensagem. Em DTNs o tempo médio de contato entre os nós, \bar{t}_c , é relevante, pois dada a natureza do *bundle*, o volume dos dados a serem transferidos pode tomar um tempo significativo, principalmente em redes com alta mobilidade.

Em uma rede disruptiva, o documento (IETF RFC4838, 2007) estabelece o conceito de volume de contato, \mathcal{V}_i , dado pelo produto entre o tempo médio de contato e a capacidade

média de transmissão entre os nós naquele contato, e pode ser escrita conforme a equação 5.

$$\bar{\mathcal{V}}_i = \bar{C}_i \bar{t}_{c_i} \quad (5)$$

onde \bar{C}_i é a capacidade média de comunicação oferecida durante o contato entre os nós.

O atraso (*delay*) é uma métrica de rede que envolve o tempo de retardo sofrido por uma mensagem ao ser transferida entre os nós ao longo da rede desde a origem até o destino (JAIN et al., 2004).

O *delay* é composto dos tempos consumidos (i) pelo protocolo de roteamento, (ii) pelos protocolos de camada de enlace inclusive acesso ao meio, (iii) pela demora na transmissão na camada física, (iv) pelo processamento e manipulação das pilhas e (v) pela e execução dos códigos corretores de erros. Está também associado ao (vi) tempo de interrupção entre os nós e ao (vii) tempo consumido pela propagação do sinal entre os nós. No caso de redes terrestres, as componentes de *delay* associadas à transferência de mensagens durante o contato entre os nós, são fatores comuns a redes conectadas e disruptivas.

Define-se as DTN como “*não previsíveis*” ou “*previsíveis*”, conforme a previsibilidade do movimento descrito pelos nós que atuam como RM. Em (IETF RFC4838, 2007) encontra-se a classificação da conectividade em “*contatos persistentes*”, “*contatos sob-demanda*”, “*contatos intermitentes agendados*”, “*contatos intermitentes oportunistas*” e “*contatos intermitentes previsíveis (predicted)*”.

DTNs não previsíveis: A variabilidade da duração das sucessivas interrupções percebidas pelo nós móveis irá determinar a distribuição estatística que define a probabilidade de contato entre os nós móveis, e essa distribuição apresenta uma média igual ao do tempo médio de interrupção da rede. O *delay* da mensagem dependerá, além do tempo médio de interrupção, do próprio protocolo de rede utilizado (ER et al., 2017).

DTNs previsíveis: Caso a trajetória de todos os nós móveis seja conhecida ao longo do tempo, então toda a temporização entre contatos dos nós pode ser descrita de forma determinística. Com relação à periodicidade, elas podem ser periódicas ou não. Este trabalho será focado em DTNs previsíveis e periódicas. Neste tipo de rede os contatos seguem padrões de temporização e sequenciamento, como a do PTS.

Pode existir assimetria no *delay* sofrido pelas mensagens. Ao longo de um mesmo trajeto, um *bundle* pode apresentar determinado *delay* entre o nó “*a*” e nó “*b*”, e outro *delay* entre o nó “*b*” e o nó “*a*”.

O encaminhamento de mensagens por uma DTN previsível, assim como pela DTN não previsível, pode ser feita com qualquer dos protocolos clássicos para redes disruptivas, ou tolerantes a *delay*, tais como *Rapid*, *Prophet*, *Spray and Wait*, *Epidemic*, *Direct Contact*, *First Contact*, entre outros. Porém, diferente das DTNs não previsíveis, as previsíveis permitem considerar o *grau de conhecimento* da rede (JAIN et al., 2004).

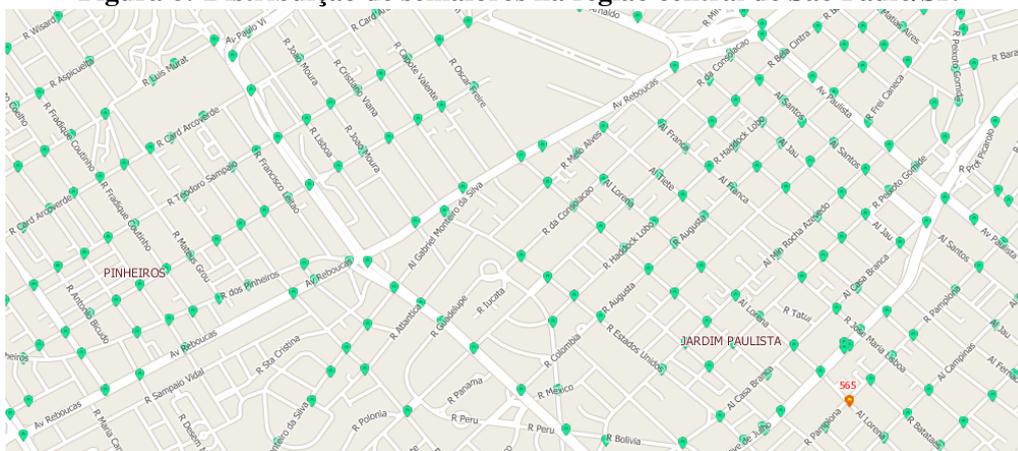
No trabalho (JAIN et al., 2004) os autores classificam os algoritmos dos protocolos de roteamento de DTNs em três categorias: (i) “*zero conhecimento*” se o algoritmo não fizer uso de qualquer oráculo (oráculos são fontes de informações sobre a dinâmica da topologia e do tráfego da rede), (ii) “*conhecimento completo*” se o algoritmo utiliza todos os oráculos (contatos, *queuing* e demanda de tráfego) e (iii) “*conhecimento parcial*” se os algoritmos não contam com o oráculo de demanda de tráfego, mas utilizam um ou mais dos demais oráculos.

2.2.2 CENÁRIOS DO ESTUDO

Dentre os elementos de sinalização de trânsito e equipamentos públicos que compõem o PTS, destaca-se a rede de semáforos no sistema de controle de trânsito urbano, que possui estrutura de suporte para estações operando no padrão IEEE 802.11p como nós fixos e se traduz em uma infra-estrutura pronta de energia e telecomunicações, de acesso difícil a vândalos, e já integrada à rede de controle de trânsito da cidade, onde as RSUs podem ser instaladas.

A distribuição geográfica de elementos empregados no controle de trânsito, como o semáforo, difere entre regiões centrais dos centros urbanos e as periféricas. As Figuras 6 e 7 foram obtidas de (CET...,).

Figura 6: Distribuição de semáforos na região central de São Paulo/SP.

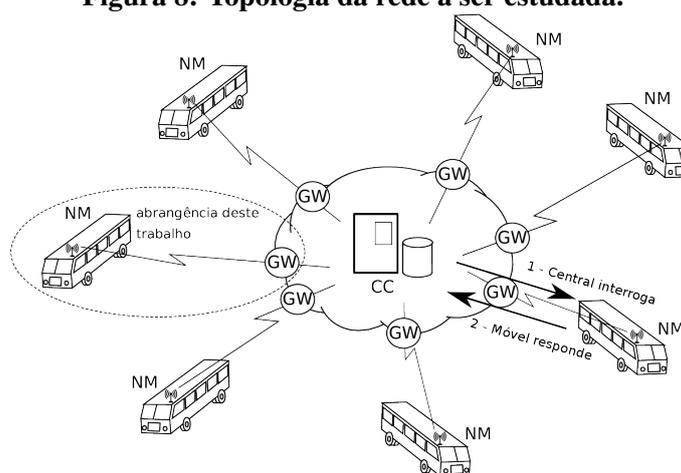


Fonte: (CET...,)

A região selecionada pela Figura 6 apresenta a distribuição dos semáforos em quase

2. Os componentes C-ITS são distribuídos em veículos, que são os nós móveis (N_m) e nos nós fixos (RFs e GWs);
3. As mensagens do aplicativo são enviadas/recebidas de/para o CC;
4. Nós móveis se conectam ao CC através de Gateways (GW) colocados nos elementos da infra-estrutura;
5. A rede suporta serviço baseado em IP de baixa prioridade para uso de recursos de comunicação. A Figura 8 ilustra os componentes da arquitetura cliente-servidor;

Figura 8: Topologia da rede a ser estudada.



Fonte: Autoria própria.

A Figura 8 ilustra a topologia de referência. O padrão da camada física a ser considerado para a rede em estudo é o IEEE 802.11p na faixa de 5,9 GHz. Neste trabalho, será considerado que a aplicação executa sobre a pilha IP em uma rede DSRC/WAVE com dispositivos multi-canalizados.

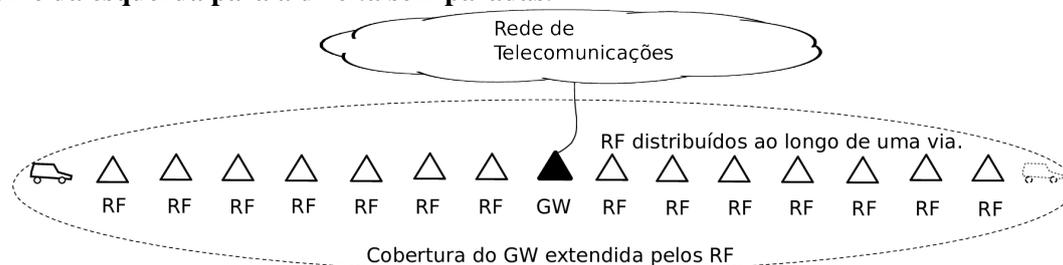
Serão premissas adicionais deste trabalho:

1. O uso do padrão DSRC/WAVE (IEEE802.11p/IEEE1609.4/.3) com um equipamento dedicado ao canal de serviço e outro ao canal de controle (dispositivo com múltiplos canais).
2. Não há interferência significativa entre canais adjacentes e nem com o canal de controle.
3. Os elementos fixos e móveis ao longo de uma mesma via apresentam canal com componentes de visada maiores que as de múltiplos percursos.
4. O comportamento do canal se apresenta uniforme ao longo do trecho de uma mesma via.

Com base na distribuição dos semáforos ilustrada na Figura 7 concebe-se uma rede com nós fixos distribuídos em linha, representada pela Figura 9. Esta rede será percorrida por um nó móvel da esquerda para a direita, trocando mensagens com o GW (RSU mais central). Os demais nós fixos atuam como *relays*.

A configuração em linha tem como finalidade a avaliação da extensão de conectividade (de maneira cooperativa) que os nós operando como RF oferecem ao GW.

Figura 9: Modelo de simulação para a distribuição de sinalização da Figura 7. O nó móvel a percorre da esquerda para a direita sem paradas.



Fonte: Autoria própria.

A distribuição de semáforos ilustrada na Figura 6 é base para o modelo de nós fixos distribuídos em grade. Esta rede em grade é representada pela Figura 10 e os nós móveis (um para cada GW) a percorrem em movimento alternado, conforme a Figura 11. A meta desta configuração é determinar o impacto do protocolo de roteamento no desempenho na rede em grade.

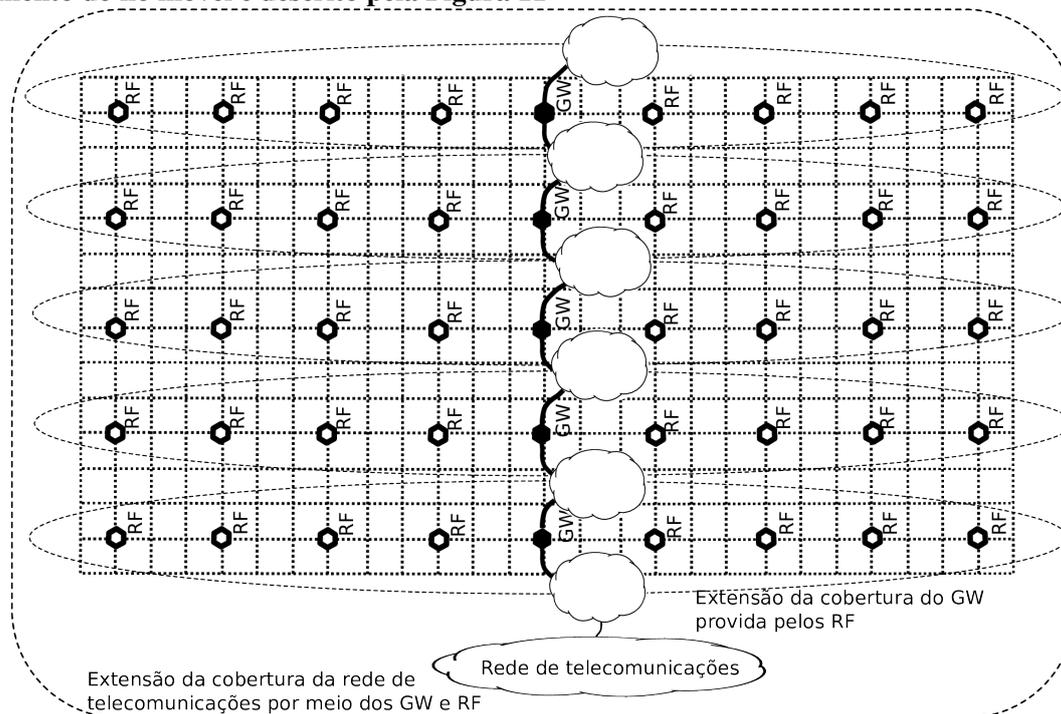
Na rede em grade, os nós fixos ao longo de uma via atuam como GWs e os nós fixos das vias transversais operam como RFs (expandindo a cobertura dos GW de forma colaborativa), de forma que a cada GW há um nó móvel com o qual troca mensagens. Há também um conjunto correspondente de RF distribuídos em linha.

2.2.2.1 PROBABILIDADE DE *OUTAGE* DO CANAL DE COMUNICAÇÃO E SER EMPREGADO

O comportamento estatístico do canal sem fio entre dois nós quaisquer pode implicar em interrupções (*outage*) (GOLDSMITH, 2005) (STÜBER, 2002). A probabilidade de *outage*, \mathcal{O} , é definida como a probabilidade de que o sinal alcance a porta do receptor abaixo de uma dada potência marginal na qual a capacidade do canal fica abaixo da necessária para a taxa considerada, tornando inviável a comunicação, $\mathcal{O} = p(P_r \leq P_{mar})$.

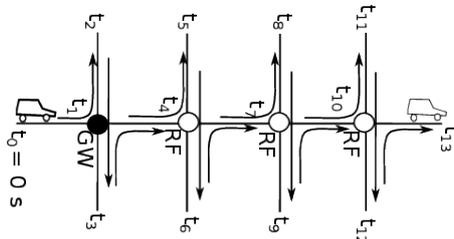
A potência marginal é aquela necessária para que o receptor possa decodificar o sinal considerando a modulação e taxa de transmissão empregados, assegurada uma SINR (*Signal-to-Noise-plus-Interference Ratio*) mínima. No caso particular de apenas duas estações se comunicando com duplexação no tempo, sem outras fontes de sinal (sem fontes externas de interferências), a SINR é a própria SNR (*Signal to Noise Ratio*) (GOLDSMITH, 2005) (RAPPAPORT, 2001) (FEUERSTEIN et al., 1994).

Figura 10: Modelo de simulação para a distribuição de sinalização da Figura 6. O modelo de movimento do nó móvel é descrito pela Figura 11



Fonte: Autoria Própria.

Figura 11: Movimento do nó móvel na rede em grade.



Fonte: Autoria Própria.

Se for considerado um canal com ganho dado pela equação 1, então a potência na entrada do receptor seguirá uma distribuição gaussiana devido à natureza da variável aleatória empregada no modelo (GOLDSMITH, 2005). Neste caso, a probabilidade de *outage* é a probabilidade da variável x extrapolar ou ser igual a determinado valor z pode ser escrita como $p(x \geq z) = Q(z)$ e, de forma análoga, a estimativa de x ser inferior ou igual a determinado valor z pode ser escrita como $p(x \leq z) = 1 - Q(z)$.

Deseja-se determinar qual a \mathcal{O} do canal nas distâncias de 300 m, 450 m, 600 m, 900 m e 1800 m de separação entre os nós (a estimativa em 900 e 1800 m serão feitas sob a premissa de que o modelo de propagação mantém suas características até estas distâncias), a serem avaliadas neste trabalho. O primeiro ponto de análise da \mathcal{O} será após a mudança do

expoente de propagação que ocorre a 100 m, portanto para os cálculos serão empregados os seguintes parâmetros:

- $P_t = 20 \text{ dBm}$ e 30 dBm
- $P_{rmin} = -94 \text{ dBm}$
- $G_{at} = G_{ar} = 3 \text{ dBi}$
- $P_{el0} = 47,86 \text{ dB}$
- $d_0 = 1 \text{ m}$
- $\gamma_1 = 2$
- $d_1 = 100 \text{ m}$
- $\gamma_2 = 4$
- $\sigma_2 = 8,4 \text{ dB}$

$$p(P_r \leq -94) = 1 - Q \left(\frac{-94 - \left(P_t + G_{at} + G_{ar} - \left[P_{el0} + 10 \gamma_1 \log \left(\frac{d_1}{d_0} \right) + 10 \gamma_2 \log \left(\frac{d}{d_1} \right) \right] \right)}{\sigma_2} \right)$$

$$\mathcal{O} = p(P_r \leq -94) = \begin{cases} 1 - Q \left(\frac{-32,14 + 40 \cdot \log \left(\frac{d}{100} \right)}{8,4} \right), & \text{para potência de 20 dBm} \\ 1 - Q \left(\frac{-42,14 + 40 \cdot \log \left(\frac{d}{100} \right)}{8,4} \right), & \text{para potência de 30 dBm} \end{cases}$$

Efetuada-se os cálculos, é possível extrair a tabela 9 para potências de transmissão de 20 dBm e 30 dBm.

Tabela 9: Probabilidade de *outage* versus distância.

d (m)	\mathcal{O} (20 dBm)	\mathcal{O} (30 dBm)
300	4,8804 %	0,22064 %
450	20,667 %	2,2294 %
600	41,173 %	7,8745 %
900	73,087 %	28,263 %
1800	97,976 %	80,468 %

Fonte: Autoria própria.

2.2.2.2 ANÁLISE DAS REDES:

São necessárias algumas considerações acerca das redes sob estudo decorrentes do modelo de propagação adotado, da topologia da rede e do esquema para a transmissão dos

dados. Além da ocupação do meio devido à transmissão do pacote ao longo dos nós entre a origem e o destino, haverá também retransmissões devido às perdas de pacotes devidos a *outages* e por causa de eventuais colisões.

As colisões podem ocorrer de forma absolutamente disruptiva, quando o nível do sinal indesejado é tal que bloqueia o sinal desejado (eventualmente superior a este), ou de maneira mais discreta, reduzindo a SINR. Neste caso, não há rigorosamente colisão, mas interferência sobre a comunicação do sinal desejado, uma vez que dependendo da relação entre os níveis do sinal desejado e interferente ainda é possível a troca de mensagens entre o transmissor e o receptor com sucesso.

Portanto, a transmissão por nós mais distantes, ainda que resulte na recepção do sinal interferente abaixo do nível de potência marginal e não implique na perda do pacote desejado, agrava as *outages* devido à redução da SINR. Entre outros motivos, esta transmissão simultânea poderá ocorrer devido ao comportamento do canal, que pode impedir o transmissor distante de detectar o início do uso do canal pelos nós interferidos, o que evitaria a interferência.

No trabalho (CHENG et al., 2008) os autores realizaram algumas medições e concluíram que a banda de coerência em uma região suburbana é de 750 kHz, maior que o espaçamento de 156 kHz entre portadoras OFDM do padrão 802.11p, portanto apresenta desvanecimento plano. O máximo excesso de atraso limita o intervalo entre símbolos (ou a banda de guarda temporal). Neste mesmo trabalho os autores encontraram 0,6 μ s para o excesso de atraso máximo, portanto menor que 1,6 μ s que é o tempo de duração do prefixo cíclico do OFDM, e isto assegura a inexistência de interferência inter-simbólica.

Por sua vez, o tempo de coerência para o modelo empregado neste trabalho pode ser calculado conforme segue:

$$\begin{aligned}\lambda &= \frac{v}{f} = \frac{300 \cdot 10^6}{5,9 \cdot 10^9} = 0,050847 \text{ m} \\ f_D &= \frac{v}{\lambda} = \frac{14}{0,050847} = 236 \text{ Hz} \\ T_C &= \frac{0,423}{f_D} = \frac{0,423}{236} = 1,536 \text{ ms}\end{aligned}$$

Portanto, se o nó móvel se desloca em relação ao nó fixo a 14 m/s, com uma frequência de operação a 5,9 GHz, o canal se apresentará com desvanecimento lento para símbolos com duração inferior a 1,53 ms.

O tempo necessário para a transmissão um pacote por meio de uma rede CSMA-CA com EDCA (IEEE 802.11p e 1609.4) segue a seguinte relação (WANG et al., 2013)

(VANDENBERGHE et al., 2011) (ABDELGADER; LENAN, 2014) (SONG; CHOI, 2017).

$$T_{tx} = \left(T_{SIFS} + AIFS_N[3] s_t + T_p + T_s + T_{SOFDM} \frac{bits_{sv} + bits_{tl} + 8L_{MAC_H} + 8L_{Dados}}{N_{bits_{symbol}}} \right) + \left(T_{SIFS} + T_p + T_s + T_{SOFDM} \frac{bits_{sv} + bits_{tl} + 8L_{ACK}}{N_{bits_{symbol}}} \right) \quad (6)$$

onde T_{tx} é o tempo total para transferência de um pacote para outro nó sem uso do controle RTS/CTS, T_{SIFS} é o tempo de SIFS (*Short Inter Frame Space*), $AIFS_N[3]$ é o tamanho da CW em número de *slot times* para um pacote de nível de prioridade 3 do EDCA, T_p é o tempo de duração do preâmbulo, T_s é o tempo de duração do campo de sinal, T_{SOFDM} é o tempo de duração de cada símbolo OFDM, $bits_{sv}$ é o número de bits do campo de serviço, $bits_{tl}$ é o número de bits do campo “tail”, L_{MAC_H} é o tamanho do campo de cabeçalho da camada MAC (*Medium Access Control*) em octetos (ou bytes), L_{Dados} é número de octetos do *payload*, $N_{bits_{symbol}}$ é o número de bits por símbolo OFDM na modulação escolhida, L_{ACK} é o número de octetos para o campo ACK (*Acknowledge*), T_{SIFS} é o tempo de duração do SIFS e s_t é a duração do *slot time*.

Estes campos possuem valores determinados para o padrão 802.11p, conforme descreve a Tabela 10.

Tabela 10: Tabela de temporizações típicas do padrão 802.11p.

Parâmetro	valor	Observação
T_p	32 μs	Tempo de duração do campo de preâmbulo
T_s	8 μs	Tempo de duração do quadro de sinal
T_{SOFDM}	8 μs	Tempo de duração do símbolo OFDM, inclusive o CP (<i>OFDM Cyclic prefix</i>)
$bits_{sv}$	16	Número de bits de serviço
$bits_{tl}$	6	Número de bits de tail
L_{ACK}	14	Número de octetos de ACK
L_{MAC_H}	30	Número de octetos do cabeçalho MAC
L_{Dados}	512	Número de octetos do campo de dados (<i>payload</i>)
$N_{bits_{symbol}}$	24	Número de bits por símbolo OFDM na modulação BPSK (3 Mbps)
$AIFS_N[3]$	9	Número de s_t na pilha EDCA para AC = 3
$CW_{min_{AIFS_N[3]}}$	15	Limite da CW no primeiro ciclo de <i>backoff</i> , em s_t , para AC 3
$CW_{mx_{AIFS_N[3]}}$	1023	Limite máximo da CW, em s_t , para AC 3
T_{SIFS}	32 μs	Tempo de duração do SIFS
s_t	13 μs	Tempo de duração do <i>slot time</i>

Fonte: (WANG et al., 2013)

Por meio dos parâmetros da Tabela 10, a expressão 6 pode ser calculada com os valores

típicos para o padrão 802.11p. Considerando pacotes de 512 octetos, o tempo para transmissão é dado por:

$$T_{tx} = \left[\overbrace{(32 + 8 + 8 \times (182))}^{\text{dados}} + \overbrace{(32 + 8 + 8 \times (2))}^{\text{ACK}} + \overbrace{(2 \times 32 + 9 \times 13)}^{\text{Acesso ao meio}} \right] = \overbrace{1.693}^{\text{tempo por pacote}} \mu s$$

Como o fluxo de dados é CBR (*Constant Bit Rate*) e a cada 10 ms é transmitido um novo pacote, o número máximo de nós sob cobertura recíproca que podem estar transmitindo pacotes com 512 octetos sem que haja acúmulo na pilha é $n = 10/1,693 \approx 5$, admitindo o menor valor possível para a janela de contenção para ACK. Convém salientar que o tráfego gerado pelo protocolo de roteamento não foi considerado aqui, o que na realidade contribui para limitação do número de transmissões e determinada janela de tempo e, por consequência, para aumentar a taxa de descarte de pacotes.

O tempo necessário para transmitir um quadro de dados é dado por $T_D = 32 + 8 + 8 \times 182 = 1.496 \mu s$ e para a transmissão do ACK é dado por $T_{ACK} = 32 + 8 + 8 \times 2 = 56 \mu s$.

Observando os valores da Tabela 10 e a expressão 6, percebe-se que é possível melhorar o desempenho da rede devido ao exposto por meio da redução da taxa de transmissão, concomitantemente ou não com o tamanho dos pacotes, ou o número de nós na rede.

No caso de retransmissão em uma rede DCF saturada, conforme 802.11, em que o número de s_t durante o *backoff* da i -ésima tentativa é dado por $N = 2^i - 1$, extrai-se que o tempo médio de *backoff* é dado por

$$\bar{T}_b = \frac{s_t}{N+1} \sum_{i=0}^n i = \frac{s_t}{N+1} \frac{N(N+1)}{2} = s_t \frac{N}{2} = s_t \frac{2^i - 1}{2} \quad (7)$$

e para 7 retransmissões temos que o tempo médio de *backoff* é igual a

$$\bar{T}_b = \frac{2^7 - 1}{2} 13 \mu = 825,5 \mu s$$

Outra consideração relevante, decorrente da análise feita na sessão 2.2.2.1, é o fato de que a probabilidade de *outage* irá impactar na ocorrência de retransmissões na rede.

A rede está sujeita a eventos que causam as perdas:

- Colisões causadas por nós não ocultos que podem ocorrer devido a transmissão no mesmo *slot time*;

- Perdas de pacotes devido a *outage* do canal entre o transmissor e o receptor;
- Perdas devido à saturação da rede;
- Perdas decorrentes de transmissão por nós para os quais a realização do canal eleva o nível do sinal interferente recebido, fazendo cair a SINR;

A colisão pode ser causada por nós não ocultos e podem ocorrer devido a transmissão no mesmo *slot time*. Neste caso a probabilidade de ocorrer é dada por $P_{col} = 1 - \prod_{i=1}^b (1 - P_{\tau_w}(1 - \mathcal{O}_i))$, onde b são os nós ao alcance do transmissor com uma estatística de *outage* \mathcal{O}_i e P_{τ_w} é a probabilidade de outro nó que não esteja oculto faça transmissão simultânea no mesmo *slot time*.

A ocupação simultânea do canal pelo nó transmissor e outro nó que lhe é oculto, mas ao alcance do receptor no mesmo intervalo de tempo de transmissão do quadro de dados ou de ACK reduz a SINR. A colisão deve-se ao nó interferente não detectar a transmissão em andamento e utilizar o canal simultaneamente.

Seja uma rede operando no modo básico composta por n nós, onde um deles possui um pacote no último *slot time* da janela de contenção para transmitir a outro. Há $n - 2$ nós com a mesma probabilidade P_{τ_D} de transmitir durante o quadro de dados e com a mesma probabilidade P_{τ_A} de transmitir durante o quadro de ACK.

Seja considerado que o canal entre o nó interferente e o receptor interferido apresenta uma probabilidade de *outage* que leve o sinal desejado a alcançá-lo com nível cuja SINR esteja abaixo do necessário para o nível de modulação empregada, dada por \mathcal{O}_{th_i} , e que as transmissões ocorram sem fragmentação no campo de dados. A probabilidade de perda da transmissão de um quadro de dados, P_{e_D} , é dada por 8.

$$P_{e_D} = 1 - (1 - P_{col})(1 - \mathcal{O}) \prod_{i=2}^n [1 - P_{\tau_{D_i}}(1 - \mathcal{O}_{th_i})] \quad (8)$$

onde P_{col} é a probabilidade de que a perda do quadro seja devido a colisão por nó não oculto, \mathcal{O} é a probabilidade de que a perda seja por *outage* do canal e $P_{\tau_{D_i}}(1 - \mathcal{O}_{th_i})$ é a probabilidade de que ocorra transmissão simultânea por um outro nó, n_i . P_{e_A} é a probabilidade de erro de um quadro ACK em uma tentativa qualquer, neste caso dado por 9.

$$P_{e_A} = 1 - (1 - \mathcal{O}) \prod_{i=2}^n [1 - P_{\tau_{A_i}}(1 - \mathcal{O}_{th_i})] \quad (9)$$

onde $P_{\tau_A}(1 - \mathcal{O}_{th})$ é a probabilidade de que ocorra transmissão simultânea por outro nó durante a ciclo de ACK.

A probabilidade de sucesso na transmissão do pacote de um nó a outro em uma tentativa é dada pela expressão 10.

$$P_s = (1 - P_{eD})(1 - P_{eA}) \quad (10)$$

Na expressão 8 o termo P_{col} deve-se a nós, que embora não estejam ocultos, incorrem na coincidência do mesmo *slot time* do *backoff* para transmissão, cuja probabilidade de ocorrência depende do tamanho da janela de contenção. A existência da probabilidade P_{eA} é condicionada ao sucesso do quadro de dados $(1 - P_{eD})$, de outra forma não haverá transmissão de ACK.

Dada a tentativa i de transferência de um pacote e seja P_{eDi} a probabilidade de erro de transmissão do quadro de dados, P_{eAi} a probabilidade de transmissão de um quadro ACK e que o máximo de tentativas para o descarte do pacote seja k (*short retry limit*), então a probabilidade de sucesso da passagem do pacote é dada pela expressão 11.

$$P_s = 1 - \prod_{i=0}^k [1 - (1 - P_{eDi})(1 - P_{eAi})] \quad (11)$$

Dado o mecanismo empregado pelo padrão 802.11 para recuperação de erro de quadro com retransmissão no caso de falha, observa-se a existência de diversidade temporal no canal com técnica ARQ (*Automatic Repeat reQuest*). A técnica consiste em enviar um quadro ACK sempre que a mensagem for recebida sem erro e para que a mensagem seja perdida devem resultar infrutíferas todas as tentativas de retransmissão.

Considerando um canal com perdas e sem saturação, a realização completa da comunicação, quando o controle RTS/CTS (*Request To Send/Clear To Send*) está habilitado nas estações, depende do sucesso na transmissão do quadro com RTS pelo transmissor, da recepção do quadro CTS vindo do receptor, do sucesso na transmissão dos dados para o receptor e da recepção do ACK pelo transmissor.

Seja P_{eRTS} e P_{eCTS} a probabilidade de erro de um quadro RTS e de um quadro CTS, respectivamente, então a probabilidade de uma mensagem ser trocada com sucesso entre duas estações é dada pela equação 12.

$$P_s = \left[1 - \prod_{i=0}^k [1 - (1 - P_{eRTSi})(1 - P_{eCTS_i})] \right] \left[1 - \prod_{j=0}^n [1 - (1 - P_{eAj})(1 - P_{eDj})] \right] \quad (12)$$

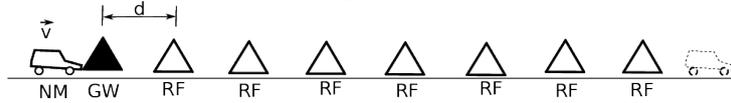
onde k é o valor para o limite de retransmissão curta (*short retry limit*) e n é o valor para o limite de retransmissão longa (*long retry limit*).

Portanto, considerando uma rede com perdas em que não haja nós ocultos, comparando 12 com 11 pode-se concluir que a rede apresentará desempenho menor quando empregado controle de fluxo RTS/CTS.

A probabilidade de retransmissão entre dois nós é dada por $P_r = 1 - P_s$ a cada ciclo de backoff, onde $P_s = (1 - P_{eD})(1 - P_{eA})$. Por sua vez as probabilidades de erro P_{eD} e P_{eA} estão diretamente ligadas à probabilidade de *outage*, e esta depende das características do canal, da potência de transmissão, da sensibilidade do receptor, da SINR e dos esquemas de modulação.

O número de retransmissões está diretamente associado às perdas de pacotes devido às *outages* do canal. O *lower bound* delimita o sucesso na transferência do pacote após uma tentativa, o *upper bound* delimita o sucesso na transmissão do pacote após “ k ” tentativas, sendo k o limite de *backoff*, após o qual o pacote é descartado, neste trabalho $k = 7$.

Figura 12: Rede referência para análise das retransmissões.



Fonte: Autoria própria.

Seja considerada a rede 12, onde o nó NM troca mensagens com o nó GW enquanto se desloca da esquerda para a direita com velocidade constante $\vec{v} = 14$ m/s, passando pelos nós repetidores RF, espaçados regularmente entre si por uma distância d .

Sobre a rede considerada, seja N_{ret} a taxa de retransmissão em pac/s e N_{tx} a taxa de transmissão de pacotes em pac/s, então a equação 13 delimita a taxa de retransmissão devido a *outages* para serviços de mesma prioridade.

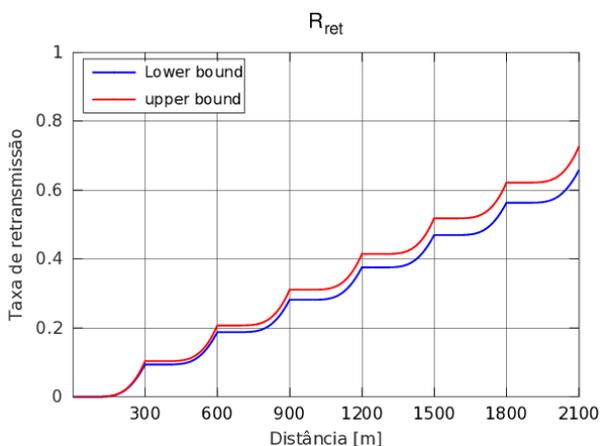
$$N_{ret}[\text{pac/s}] = \begin{cases} N_{tx} \left[\sum_{j=2}^{n-1} P_{r_{(j-1)(j)}} + P_r \right], & \text{lower bound} \\ N_{tx} \left[\sum_{j=2}^{n-1} \sum_{i=1}^k \left(P_{r_{(j-1)(j)}} \right)^i + \sum_{i=1}^k (P_r)^i \right], & \text{upper bound} \end{cases} \quad (13)$$

onde n é o número de nós, $P_{r_{(j-1)(j)}}$ é a probabilidade de retransmissão entre os nós fixos $j - 1$ e j e P_r é a probabilidade de retransmissão entre o nó móvel e o último nó fixo com o qual ele troca mensagens.

Da equação 13 extrai-se R_{ret} , que é a *taxa de retransmissão acumulada normalizada*, dada por $R_{ret} = N_{ret}/N_{tx}$. Os gráficos das Figuras 13, 14 15 mostram o comportamento do

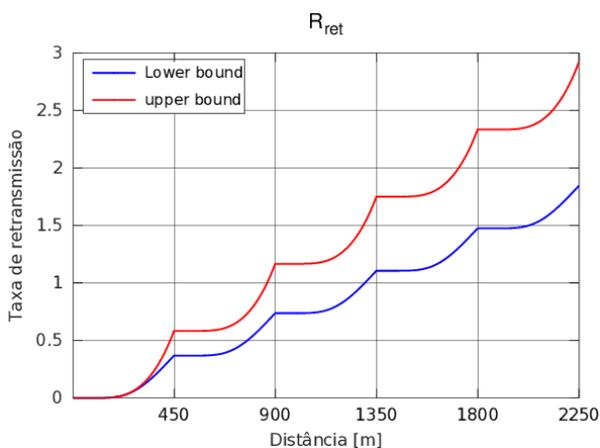
“upper bound” e do “lower bound” para rede com nós fixos em linha com distância de separação uniforme a 300, 450 e 600 m, respectivamente, e potência de transmissão a 20 dBm. A taxa de retransmissão acumulada é a soma das retransmissões em todos os nós da rede, até a distância considerada.

Figura 13: Taxa de retransmissão acumulada normalizada - d = 300 m.



Fonte: Autoria própria.

Figura 14: Taxa de retransmissão acumulada normalizada - d = 450 m.

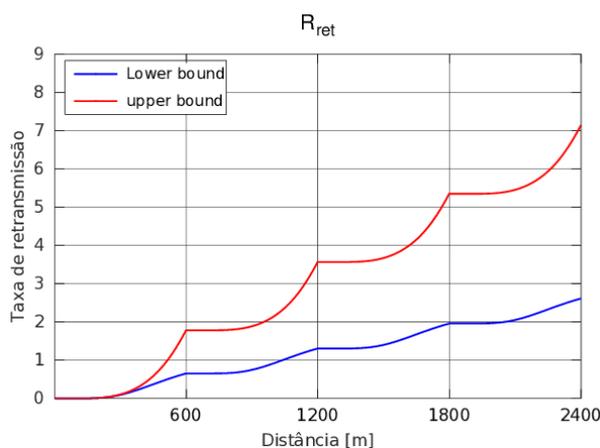


Fonte: Autoria própria.

Os gráficos das Figuras 13, 14 e 15 foram obtidos considerando apenas a contribuição do canal na *outage*, sem levar em consideração a redução da SINR decorrente de transmissões simultâneas.

Conclui-se, portanto, que se empregada mesma configuração na modulação, tamanho dos pacotes, potência, canal e número de repetições (saltos do pacote) a mudança na taxa de pacotes por segundo não afetará a probabilidade de retransmissão quando as perdas estiverem ocorrendo exclusivamente por *outage* natural (ou seja, SINR igual à SNR). Então a taxa de

Figura 15: Taxa de retransmissão acumulada normalizada - $d = 600$ m.



Fonte: Autoria própria.

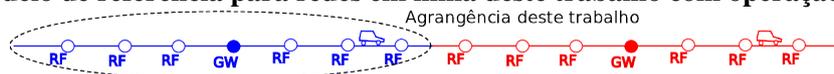
retransmissão N_{ret} será proporcional à taxa de transmissão de pacotes N_{tx} ($N_{ret} \propto N_{tx}$) para a mesma probabilidade de *outage*.

Define-se neste trabalho “*outage* natural do canal” como sendo aquela que ocorre devido somente ao comportamento do canal, sem contribuição devido à interferências decorrentes das transmissões de outros nós ao longo da rede.

2.2.3 CONSIDERAÇÕES SOBRE O TRABALHO

Como base para o desenvolvimento deste trabalho serão usados os modelos de referência ilustrados pelas figuras 9 e 10, os quais poderiam ser implementados para operar em dois canais distintos de mesma potência (AHMED et al., 2013), não obstante a possibilidade de emprego de canais de pequena cobertura concomitantemente com canais de média cobertura. Embora esteja ilustrado nas figuras 16 e 17 pelas cores diferentes, o reuso de frequências não faz parte da abrangência deste trabalho.

Figura 16: Modelo de referência para redes em linha deste trabalho com operação em dois canais.

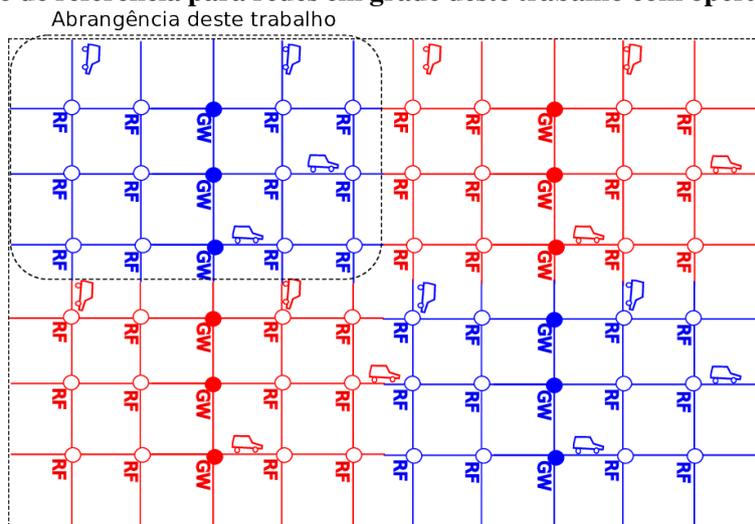


Fonte: Autoria própria.

Para que fossem feitas as parametrizações do simulador, foram realizadas pesquisas envolvendo os fornecedores de dispositivos existentes no mercado.

O ganho de antena de 4 dBi foi determinado com base no ganho médio de dois modelos comerciais, o ICEFIN49DMN da Pulse-Larsen (ganho máximo de 6 dBi) e o modelo SMW-314

Figura 17: Modelo de referência para redes em grade deste trabalho com operação em dois canais.



Fonte: Autoria própria.

da MobileMark (ganho máximo de 7 dBi).

A sensibilidade dos transceptores foi ajustada para -94 dBm, com base nas informações de fornecedores como a Visteon (VISTEON...), cujo dispositivo tem sensibilidade melhor que -96 dBm, Cohda (COHDA...), que assegura uma sensibilidade de -99 dBm, e a Kapsch (KAPSCH...), que assegura uma sensibilidade mínima de -95 dBm a 6 Mbps.

A escolha de uma sensibilidade de -94 dBm deve-se ao fato de que à sensibilidade da porta do receptor, deve-se adicionar as perdas de conexões e guias de onda, assumidos como sendo na ordem de 3 dB (metade em cada lado do enlace: 1,5 dB no transmissor e 1,5 dB no receptor).

A definição da ferramenta computacional a ser utilizada no desenvolvimento deste trabalho foi feita levando em consideração que o resultado do desempenho da conectividade depende não somente do comportamento do canal e demais elementos da camada física, mas também das camadas de enlace, ou acesso ao meio, e de rede. Com base nisso, foi escolhida uma ferramenta de simulação de redes bastante divulgado no meio acadêmico, o NS-2 (ALTMAN; JIMENEZ, 2012).

O simulador foi parametrizado de forma a simular uma rede constituída por elementos fixos (infraestrutura) e móveis (veículos), conectados por transceptores com o padrão 802.11p. O script do NS-2 apresentou o mesmo cabeçalho base em todas as simulações, a camada física foi simulada com o pacote WirelessPhyExt, nativo da versão 2.35.

A parametrização foi empregada em três etapas de simulação distintas, em todas elas foi escolhido o AODV, protocolo de roteamento reativo padrão para redes Ad-Hoc. A escolha deste protocolo de roteamento deve-se ao fato de ser apropriado para redes móveis como uma VANET (PAUL et al., 2011) e ser também um protocolo de referência em alguns trabalhos acadêmicos analisados (FERREIRO-LAGE et al., 2009) (FONSECA et al., 2016) (DINESH, 2014) (NAGARAJ et al., 2011).

Nas redes em linha e em grade foi considerada a transferência de uma sequência de blocos de dados com 512 kB cada, tomando 10 s para a transmissão. A modulação escolhida foi BPSK (taxa de dados de 3 Mbps), com uma taxa de transmissão de pacotes de 415 kbps, em duas potências de transmissão do DSRC (20 e 30 dBm).

Os blocos de dados foram transmitidos em número suficiente para cobrir o tempo de viagem do NM pela rede. Entre outros objetivos, pretende simular o envio de arquivos de comando e configuração e encontrar regiões com pouca cobertura à medida que o NM se desloca.

O perfil de tráfego escolhido foi o CBR para evitar que contribuições devido ao janelamento TCP (*Transport Control Protocol*) pudessem influenciar no desempenho da rede, bem como permitiu avaliar a rede sob uma demanda mais severa (SHARMA et al., 2017). Para fins de avaliação do desempenho da rede, foi assumido o tráfego gerado como o pior que o normal, considerando as seguintes premissas:

1. FR e GW também podem ser compartilhados com outros aplicativos de cidades inteligentes, limitando os recursos computacionais e de comunicação disponíveis;
2. O PTS deve ser eficiente e resiliente em situações de superlotação, como horários de pico, eventos superlotados (jogos de futebol etc.) e aplicativos de recuperação de desastres;
3. Haverá mais de um nó móvel em trânsito simultaneamente na região sob cobertura do GW;

Este perfil de tráfego teve também o objetivo de capturar um cenário de C-ITS em que os aplicativos estão em execução em outros nós móveis que circulam simultaneamente pela rede e também nos RF, o que poderia gerar tráfego de perfil semelhante ao considerado neste trabalho, com vários blocos de dados periódicos de algumas centenas de kilobytes destinados a diferentes nós na rede sendo transmitidos em sequência.

Na primeira etapa foram considerados dois nós, um deles fixo e o outro se afastando muito lentamente (0,5 m/s), com transmissão de pacotes a uma taxa de 415 kbps. O objetivo é avaliar o comportamento do modelo de canal utilizado. A análise foi feita considerando os dois perfis de potência do DSRC (20 e 30 dBm) e de quadro dos níveis de modulação das portadoras

OFDM permitidos para o padrão 802.11p: BPSK (máximo de 3 Mbps), QPSK (máximo de 6 Mbps), 16-QAM (máximo de 12 Mbps) e 64-QAM (máximo de 24 Mbps). Desta simulação também foram extraídas as perdas de propagação, de forma a permitir a comparação com os valores medidos em (CHENG et al., 2007).

Na segunda etapa foi efetuada análise das redes em linha. Nelas os veículos circulam a uma velocidade média de 36 km/h, foi desconsiderado o tempo de espera nos pontos de ônibus. Na rede em linha, o objetivo é avaliar o impacto da propagação do sinal e o número de repetições (perda de mensagens) por relés fixos no desempenho da rede. A velocidade média foi assumida como 36 km/h, considerando a existência de um controle integrado entre a frota e os semáforos (prioridade do sinal de trânsito) para faixas exclusivas do BRT e que não há paradas no intervalo da rede sob estudo, o que aumentaria a velocidade média do veículo (YANG et al., 2013).

A rede é composta por nós fixos uniformemente espaçados, e o nó móvel se desloca trocando dados com o nó fixo mais central da rede. Foram consideradas as distâncias entre os nós fixos de 300 m, 450 m, 600 m, 900 m e 1800 m. O objetivo foi determinar a conectividade e o comportamento da rede quanto à capacidade de retransmissão dos nós, e determinar o impacto devido ao modelo de propagação escolhido.

Na terceira etapa foi avaliado o cenário em grade. Foi gerado um modelo de movimento com velocidade média de 36 km/h (máxima de 50 km/h), aceleração de 2 m/s^2 e desaceleração de 4 m/s^2 .

Depois, foi acrescentado um código que permite a seletividade de ganho em função da direção em relação ao nó. Para este segundo caso, foram feitas simulações em redes compostas de 16 e 9 nós fixos, com separação de de 300, 450 e 600 m, dos quais 4 e 3 são GW, respectivamente. Por essas redes foram acrescentados nós móveis no mesmo número de GW, e observado o comportamento da rede com relação à conectividade e *throughput* oferecidos entre os GW e NM.

Como saída, o NS-2 fornece arquivos trace. Os eventos que o NS-2 registra nestes traces são COL (colisão), DUP (pacote duplicado), ERR (erro de pacote), RET (contagem de tentativa MAC excedida), STA (estado MAC inválido), BSY (MAC ocupado), NRTE (router sem rota disponível), LOOP (loop de rota), TTL (TTL chegou a zero), TOUT (timeout do router), CBK (retorno da camada MAC ao roteamento a situação de ocupada, isto é, não é possível encaminhar o pacote), IFQ (não há espaço no buffer da pilha da camada de enlace de dados, ou na camada de rede), ARP (falta de espaço no buffer da pilha do ARP) e OUT (pacotes de rotas oriundos de nós fora do domínio da rede).

Uma vez parametrizado o NS-2, procedeu-se às simulações. As simulações foram

feitas executando-se quatro rodadas e assumindo a média dos valores obtidos em cada uma delas, à exceção do número de saltos, que foi escolhida uma amostra representativa das demais.

Este trabalho se limitou a avaliar a conectividade oferecida pela rede dentro no âmbito de um dos canais. O impacto causado pela agregação de outros, formando arranjos de células, bem como os mecanismos para a seleção do canal de serviço distintos pelo nó móvel à medida que trafega entre as sub-redes serão objetos de estudo em trabalhos futuros.

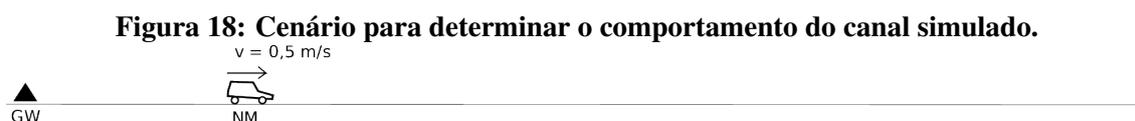
Na quarta etapa foi considerado o cenário de rede disruptiva por meio de uma topologia de rede composta por nós móveis se deslocando por trajetos determinados com periodicidade definida, de forma a simular um PST. A configuração do NS-2 foi alterada visando considerar dois níveis fixos de cobertura: 100 e 450 m.

O objetivo da última etapa é avaliar o ganho de desempenho devido a melhorias de oportunidade e tempo de contato e o impacto destas melhorias no desempenho da rede. Um destes métodos consiste em acrescentar nós fixos aos cruzamentos entre os trajetos, o segundo consiste em adicionar pontos de parada nestes mesmos cruzamentos.

2.3 SIMULAÇÃO DOS CENÁRIOS

2.3.1 PRIMEIRA ETAPA - PERDAS DEVIDO À PROPAGAÇÃO

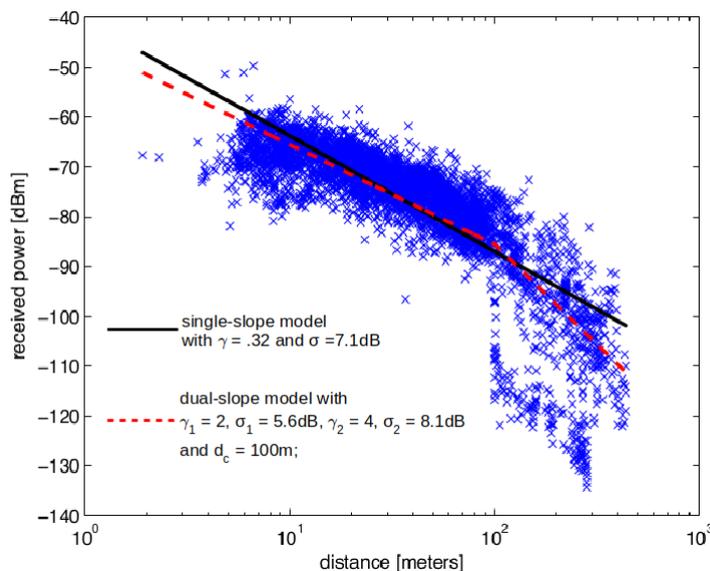
Nesta etapa, dois nós trocam informações entre si à medida que um deles se afasta lentamente, ilustrado na figura 18. O movimento foi gerado internamente ao NS-2 com velocidade constante.



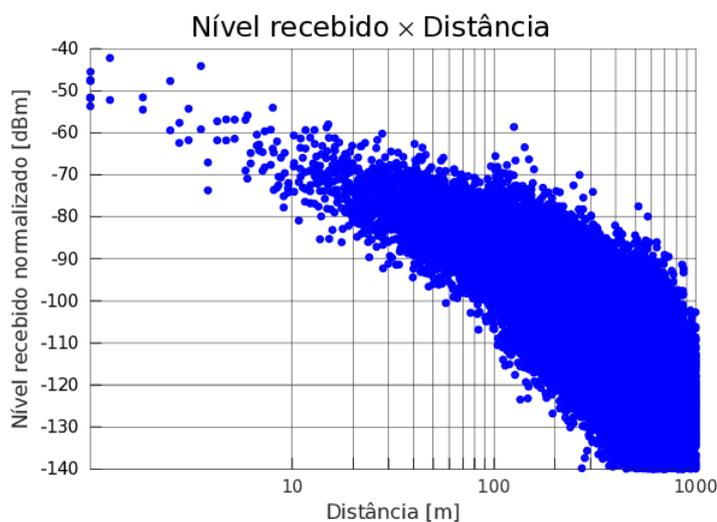
Fonte: Autoria própria.

Perda de propagação: A partir dos dados obtidos na primeira etapa extraiu-se do NS-2 os níveis recebidos pelo nó configurado como destinatário dos pacotes (Agent/Null), de onde foram subtraídos os ganhos das antenas e a potência de transmissão, resultando nos valores plotados no gráfico 20, que ilustra o comportamento do canal simulado ao longo da distância entre os dois nós.

A inspeção do gráfico 19 permite verificar a existência de dois agrupamentos de valores medidos. Um agrupamento segue de forma contínua a linha tracejada em vermelho, um segundo agrupamento de medições decresce com a mesma taxa que o primeiro porém atenuados de

Figura 19: Nível de sinal medido.

Fonte: (CHENG et al., 2007)

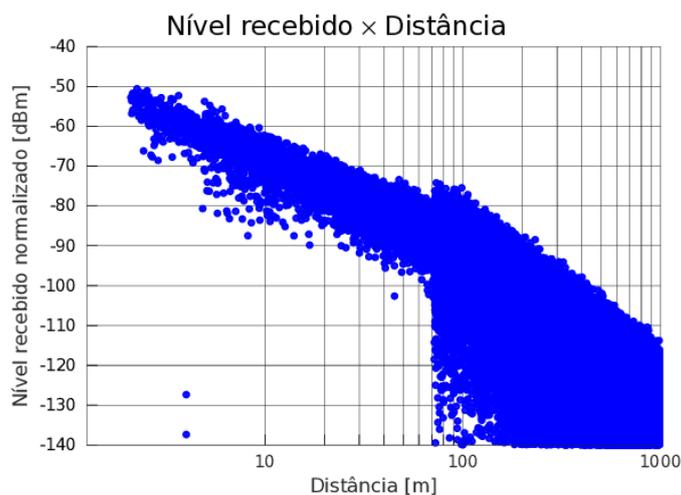
Figura 20: Nível de sinal simulado com o NS-2.

Fonte: Autoria própria.

aproximadamente 30 dB perto de 100 m . Conforme os autores do trabalho, trata-se de medições realizadas em situações de obstrução, quando os veículos contornavam as esquinas (CHENG et al., 2007).

É possível comparar visualmente as medições realizadas em campo em (CHENG et al., 2007) com o modelo de média escala empregado nas simulações deste trabalho nos gráficos das Figuras 19 e 20, enquanto que a comparação dos gráficos das Figuras 19 e 21 permitem avaliar visualmente a simulação realizada pelo NS-2 quando empregado o modelo de Nakagami-m com

Figura 21: Desvanecimento devido à distribuição de Nakagami-m, simulação no NS2.



Fonte: Autoria própria.

os parâmetros fornecidos naquele trabalho.

Comparando-se o gráfico da Figura 19 retirado das medições, com os gráficos das simulações utilizando o modelo com múltiplos pontos de quebra da Figura 20 com os parâmetros fornecidos pelos autores do trabalho, observa-se que os valores coletados a partir da simulação para múltiplos pontos de quebra guardam correspondência aos obtidos a partir das medições.

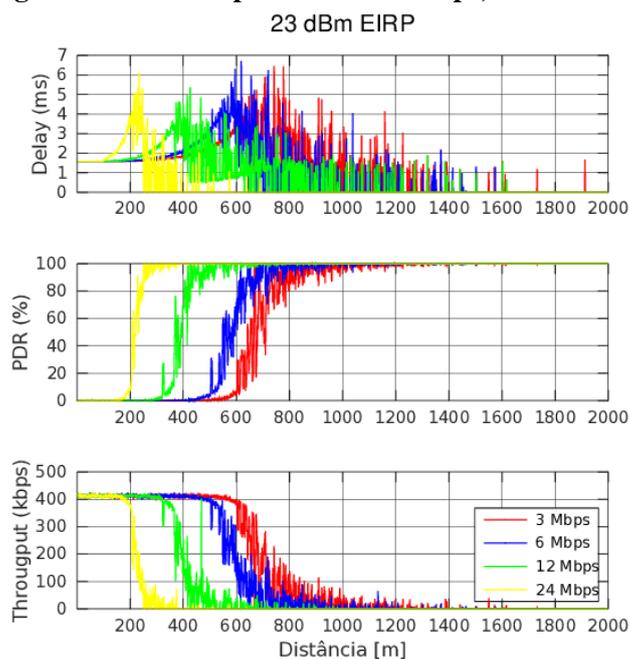
Considerando as premissas de que os nós fixos serão instalados em elementos de sinalização de tráfego, como semáforos, e que a comunicação entre eles e com os nós móveis se dará em visada, ou com obstrução parcial, entendeu-se que o modelo de múltiplos pontos de quebra com os parâmetros encontrados atende satisfatoriamente ao objetivo deste trabalho.

Capacidade versus distância: Conhecido o comportamento do canal, passou-se à análise do desempenho do sistema em termos de capacidade de transmissão pela distância.

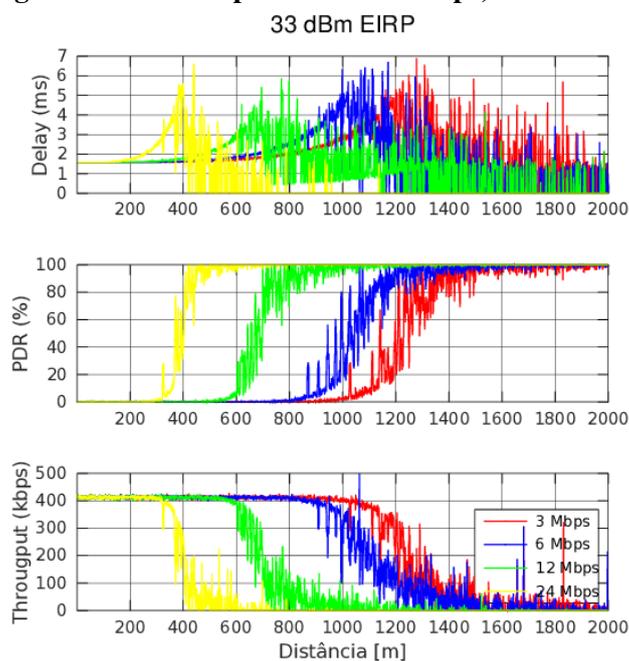
Foi reconfigurada a mesma simulação da seção anterior, onde variou-se o esquema de modulação e a potência de transmissão entre os dois valores previstos para aplicações sobre o WAVE/DSRC, 23 e 33 dBm EIRP, ou 20 dBm e 30 dBm.

Os gráficos das Figuras 22 e 23 ilustram o comportamento do *throughput*, PDR e *delay* para os esquemas de modulação BPSK (3 Mbps), QPSK (6 Mbps), 16-QAM (12 Mbps) e 64-QAM (24 Mbps), à medida que os nós se distanciam a uma velocidade de 0,5 m/s.

Observa-se que, mesmo utilizando uma taxa de transmissão CBR/UDP (*Constant Bit Rate/User Datagram Protocol*) relativamente baixa de 415 kbps, hierarquias de modulação de

Figura 22: Taxa de pacotes de 415 kbps, 23 dBm EIRP.

Fonte: Autoria própria

Figura 23: Taxa de pacotes de 415 kbps, 33 dBm EIRP.

Fonte: Autoria própria

ordem mais elevada são associadas a taxas de dados da camada física maiores, que apresentarão uma redução substancial na cobertura. Isto se deve pela exigência de uma maior relação E_s/N_0 por elas (GOLDSMITH, 2005). O NS-2 possui nativamente uma tabela que relaciona as

diversas SINR necessárias a cada hierarquia de modulação, que é utilizada na recepção dos dados.

2.3.2 SEGUNDA ETAPA - REDE EM LINHA

A simulação de rede em linha foi feita considerando cenários com distribuição uniforme e separação entre os nós de 300 m, 450 m, 600 m, 900 m e 1800 m, e potência de transmissão de 20 e 30 dBm. O GW foi posicionado como o nó mais central da rede e as trocas de mensagens foram efetuadas entre ele e o nó móvel.

Um modelo de movimento para estas simulações foi desenvolvido no SUMO e por meio da ferramenta traceExporter foi gerado um arquivo de movimento formato “tcl” para o NS2. A identificação dos nós foi alterada no arquivo “tcl” resultante para refletir as configurações apresentadas nos gráficos.

O nó móvel inicia o movimento no lado esquerdo das redes com velocidade constante de aproximadamente 10 m/s (36 km/h) e atravessa nós fixos uniformemente distribuídos, parando no lado direito da rede. Um segundo após o nó móvel iniciar seu movimento, tem início a transferência de pacote CBR/UDP a 415 kbps com nó móvel usando modulação BPSK (taxa de dados de 3 Mbps). Com base no modelo de referência para redes lineares foi feita análise de conectividade de canais de baixa e média cobertura (23 e 33 dBm EIRP, respectivamente).

Distribuição dos nós fixos em intervalos de 300 m: A simulação com espaçamento uniforme de 300 m foi elaborada considerando uma rede de 15 nós fixos dispostos em linha. A situação encontra-se ilustrada pela Figura 24(a). O resultado do *throughput* obtido ao longo do trajeto para as potências de 23 e de 33 dBm pode ser analisado no gráfico da Figura 24(b).

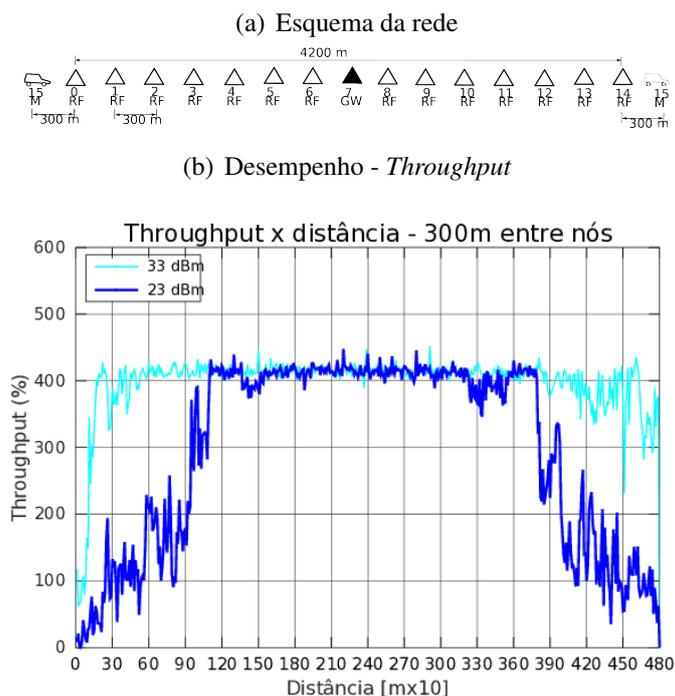
O comportamento do *throughput* da Figura 24(b) esta estratificado na Tabela 11. O arquivo de trace foi estratificado e observou-se uma grande instabilidade nas rotas, tanto na transferência de pacotes envolvendo os nós iniciais, como os nós finais.

Isto está ilustrado no gráfico da figura 25(a), onde é possível observar a correlação inversa entre o *throughput* e a PDR. Neste gráfico, foram plotados o *throughput* normalizado e a PDR^{-1} , dado por $PDR^{-1} = 100 - PDR$.

Portanto, a queda de *throughput* está inversamente associada à elevação da taxa de descarte dos pacotes. Para identificar os eventos que guardam correlação com a PDR, foram extraídos e quantificados os eventos associados aos descartes.

A análise do trace permitiu comparar os eventos com o comportamento da PDR ao longo da rota, e verificou-se que a estratificação dos causas do descarte, apontaram para os

Figura 24: Cobertura com nós fixos distribuídos uniformemente a 300m, Pt a 23 e 33 dBm EIRP.



Fonte: Autoria própria

Tabela 11: Variação do *throughput*, nós a 300 m.

Distância	<i>Throughput</i> médio aproximado
0 - 300 m	50 kpbs
300 - 600 m	100 kpbs
600 - 900 m	150 kpbs
900 - 950 m	300 kpbs
3650 - 3900 m	250 kpbs
3900 - 4200 m	150 kpbs
4200 - 4500 m	100 kpbs
4500 - 4800 m	100 kpbs

Fonte: Autoria própria

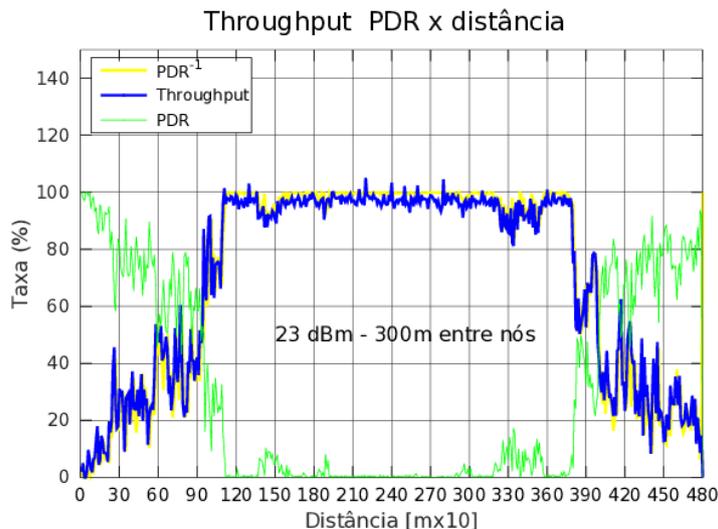
eventos IFQ e CBK como aqueles com maior correlação, conforme ilustrado no gráfico da figura 25(b), onde pode-se comparar a PDR com as ocorrências IFQ e CBK normalizadas ao longo do deslocamento. Observa-se, ainda, uma grande atividade de requisições de rota pelo protocolo AODV nestas regiões de queda do *throughput*.

Todos os traces foram analisados e o número de saltos para cada pacote entregue foi extraído da rodada de simulação mais representativa da média, conforme ilustrado no gráfico da figura 25(b).

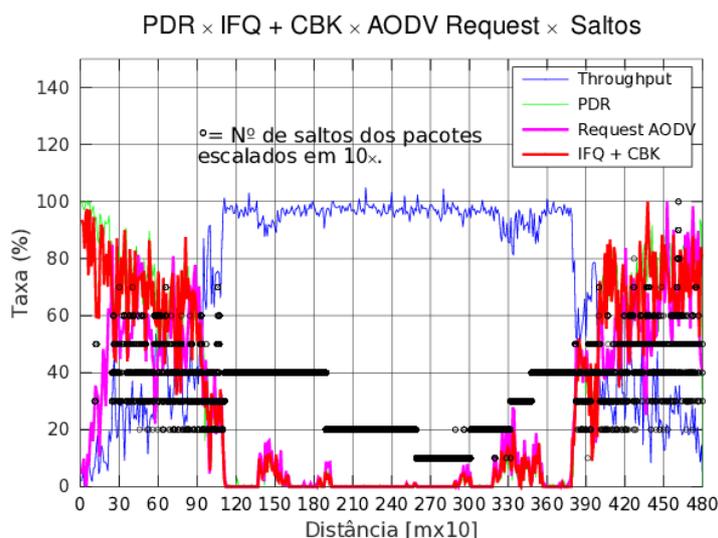
Com o objetivo de reduzir a ocupação do canal, a taxa de pacotes CBR/UDP foi

Figura 25: Estratificação normalizada dos eventos associados ao desempenho da rede 24(a).

(a) PDR^{-1} e PDR versus *throughput* normalizado, taxa de 415 kbps.



(b) PDR versus Requisições AODV normalizadas versus saltos $\times 10$ a 415 kbps.



Fonte: Autoria própria

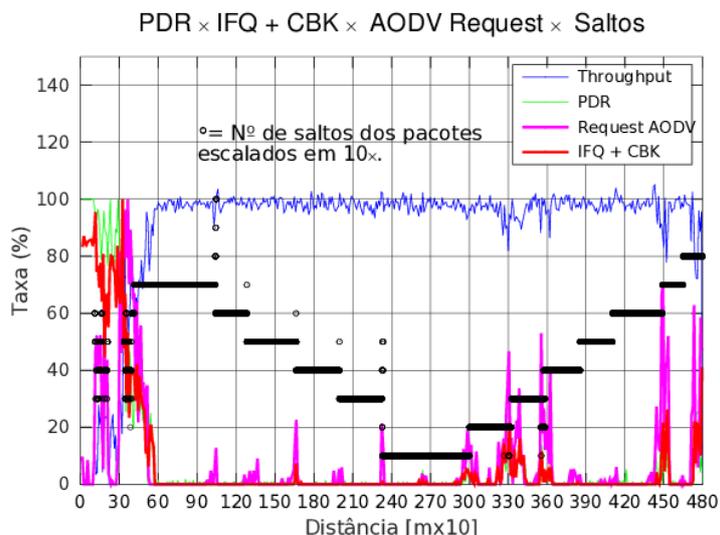
reduzida de 415 para 250 kbps, o que limitou a região em que se observa a perturbação no *throughput* do início até aproximadamente 400 m depois.

Adicionalmente, foi realizada também uma simulação com taxa de pacotes reduzida de 250 para 125 kbps, porém não houve ganho de estabilidade no *throughput*, conforme ilustra o gráfico da Figura 26, permanecendo a instabilidade da rede até aproximadamente 500 m do início do movimento do nó móvel.

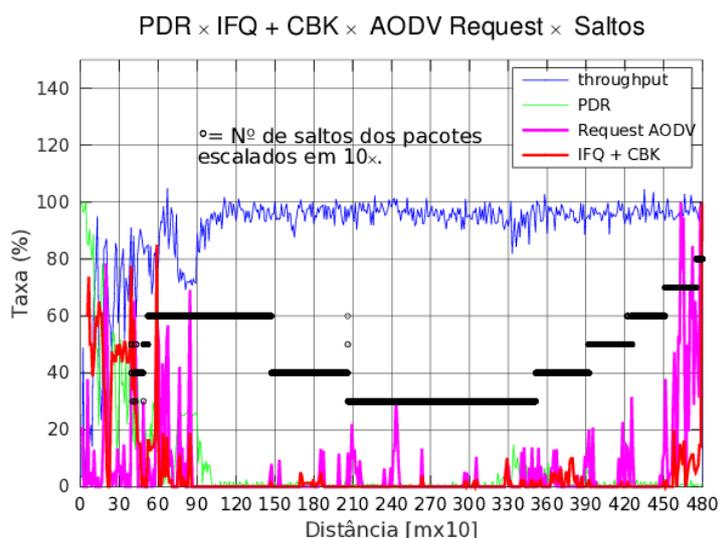
A análise do trace mostrou que trata-se de uma região de instabilidade causada pelas requisições do protocolo de roteamento para ambas as taxas de pacotes.

Figura 26: Estratificação normalizada dos eventos com redução da taxa CBR/UDP.

(a) PDR versus Requisições AODV normalizadas versus saltos $\times 10$ a 250 kbps



(b) PDR versus Requisições AODV normalizadas versus saltos $\times 10$ a 125 kbps

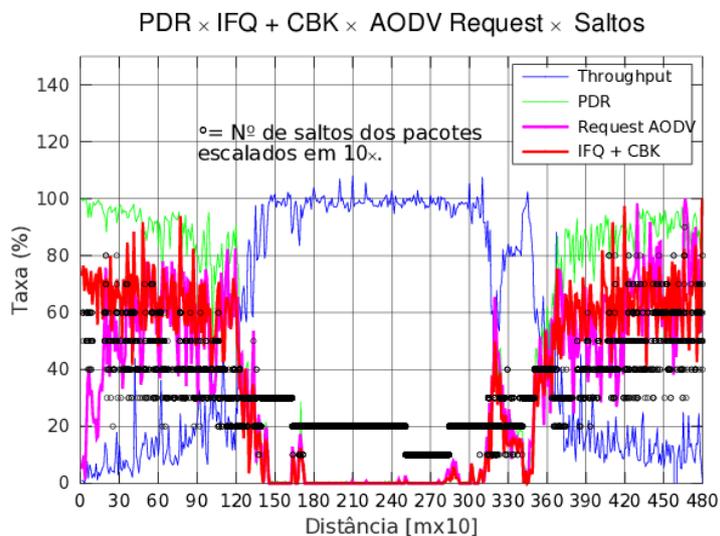


Fonte: Autoria própria

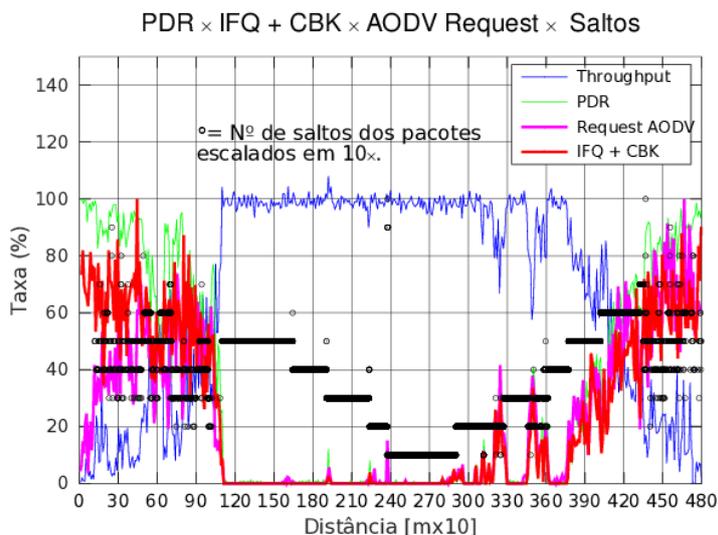
A parametrização inicial do simulador não contemplou o controle RTS/CTS, devido ao tamanho do quadro. Porém, com a finalidade de avaliar a contribuição devido a terminais ocultos, foi ativado o controle, modificando o parâmetro `RTSThreshold_` para 100 e conduzidas novas simulações para a taxa a 415 kbps e para 250 kbps. A análise dos traces traduz-se nos gráficos 27(a) e 27(b), e comparando-se com os resultados obtidos anteriormente, conforme ilustrado nos gráficos 25(b) e 25(a), observou-se que não houve ganho de cobertura da rede com controle RTS/CTS em relação ao modo básico (sem controle RTS/CTS), em qualquer das duas taxas, porém houve redução.

Figura 27: Desempenho com RTS/CTS habilitado, Pt a 23 dBm EIRP, nós fixos espaçados a 300 m.

(a) PDR versus Requisições AODV normalizadas versus saltos $\times 10$ a 415 kbps, modulação 3Mbps(BPSK), com RTS/CTS habilitado, nós separados a 300 m.



(b) PDR versus Requisições AODV normalizadas versus saltos $\times 10$ a 250 kbps, modulação 3Mbps(BPSK), com RTS/CTS habilitado, nós separados a 300 m.



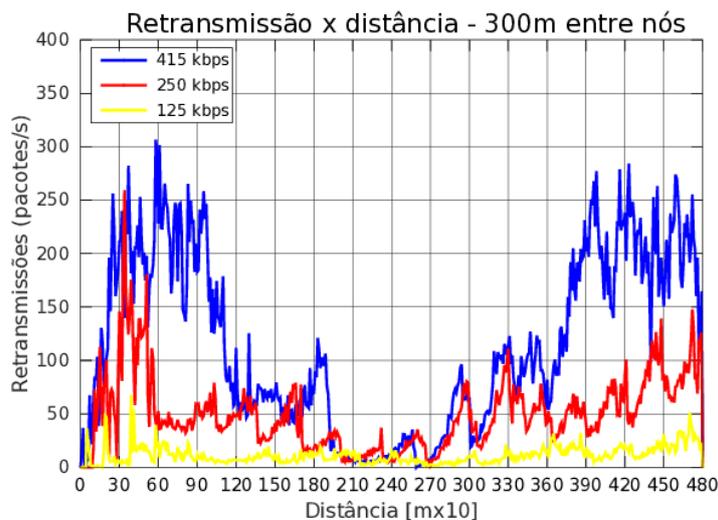
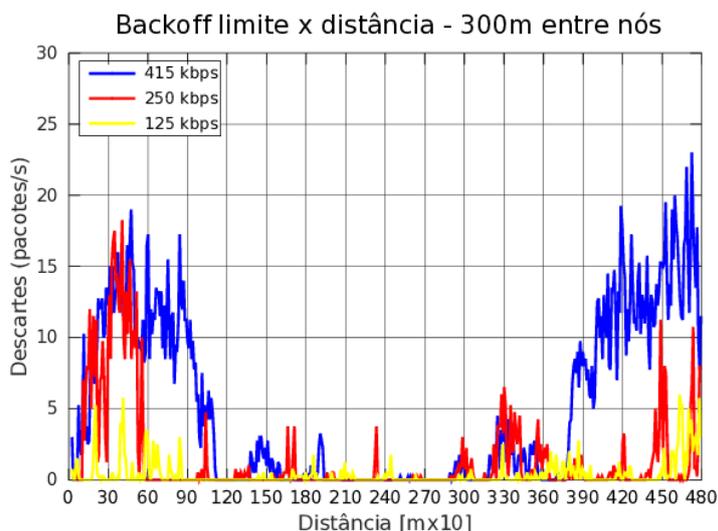
Fonte: Autoria própria

A análise dos traces das simulações permite extrair as informações sobre as retransmissões a que os pacotes transferidos entre o GW e o NM estão sujeitos ao longo do trajeto, conforme ilustra o gráfico da figura 28(a). O comportamento das retransmissões mostra que elas não guardam proporcionalidade com a taxa de descarte de pacotes quando o *throughput* da rede se degrada, isto pode ser observado nos gráficos das figuras 28(a) e 25(b).

Leva, ainda, à conclusão de que o comportamento observado no gráfico da figura 24(b)

Figura 28: Ocorrências de retransmissão e de descarte por limite de backoff, nós a 300 m.

(a) Taxa de retransmissão ao longo do trajeto - nós a 300 m.

(b) Descarte de pacotes por limite de *backoff* - 300 m**Fonte: Autoria própria**

deve-se à combinação do modelo de propagação adotado, da taxa de transmissão adotada, do perfil de tráfego (CBR) e do número de saltos. A degradação do desempenho se identifica com o aumento da PDR e esta mostrou-se correlacionada com a elevação no número de retransmissões somada com o número de repetições (reencaminhamentos) dos pacotes.

O comportamento do canal é um dos motivos para as retransmissões decorrentes da perda dos pacotes de dados transmitidos e dos pacotes ACK, que por sua vez leva à saturação do canal.

O número retransmissões reduz à medida que o NM se aproxima do GW e volta a subir após passar por ele, independentemente da taxa de transmissão dos pacotes, porém no

caso da taxa CBR/UDP em 415 kbps percebe-se o aumento desproporcional nas retransmissões dos pacotes, quando comparada com as taxas menores, nos trechos entre 600 até 1200 m e 3600 até 3900 m.

Isto ocorre porque além do comportamento do canal estar causando retransmissões, o número de nós transmitindo aumenta a ocupação do canal e à redução da SINR. A redução da SINR eleva as *outages* (redução da SINR leva ao aumento das *outages*), piorando o canal e a piora do canal eleva as retransmissões.

Quando a ocupação adicional do canal for decorrente das retransmissões causadas por *outages* naturais do canal (isto é, a SINR é igual à SNR), a razão entre o número de retransmissões e a taxa de transmissão de pacotes é constante para diferentes taxas em dada modulação e mesmo número de saltos dos pacotes, ou seja, há proporcionalidade.

No caso desta rede, observa-se que a razão entre o número de retransmissões e taxa de transmissão de pacotes não é uma constante (considerando o mesmo número de saltos dos pacotes), e no caso desta rede isto ocorre nos trechos entre 600 até 1200 m e 3600 até 3900 m.

A ocupação do canal pelas retransmissões soma-se ao volume de reencaminhamentos dos pacotes, que torna-se maior à medida que a rede fica mais extensa, envolvendo mais nós, e apresenta maior tráfego no mesmo canal levando à saturação da rede e piora da SINR. Esta ocupação adicional contribui para aumentar as retransmissões, que por sua vez aumenta a ocupação do canal e eleva a taxa de descarte de pacotes, gerando um ciclo vicioso de degradação e saturação do canal.

A região em que se verifica a saturação com o correspondente número elevado de retransmissões, pode ser identificada pela existência de descartes de pacotes por limite de *backoff* (evento RET no NS-2). Isto ocorre devido ao nó ter atingido o número de máximo de retransmissões (*Short Retry Limit*), após o qual o pacote é descartado.

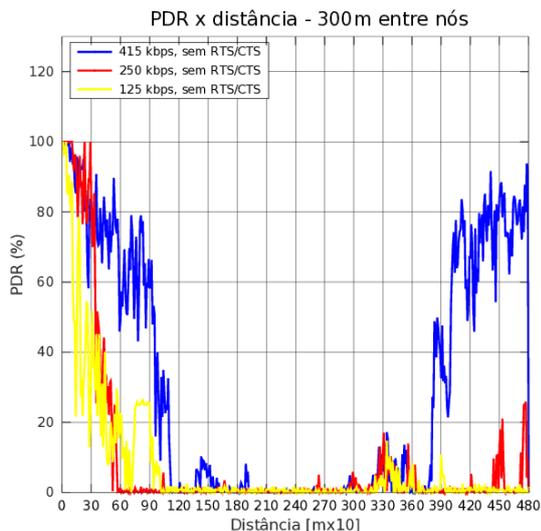
Nas regiões do deslocamento do NM em que os pacotes são descartados por atingirem o limite de *backoff*, observa-se que o número de retransmissões deixa de aumentar, este fenômeno é ilustrado nos gráficos 28(a) e 28(b).

Além dos fatores mencionados, verifica-se que o protocolo de roteamento contribui para a degradação do desempenho devido à instabilidade gerada nas rotas e o volume de requisições gerado na rede.

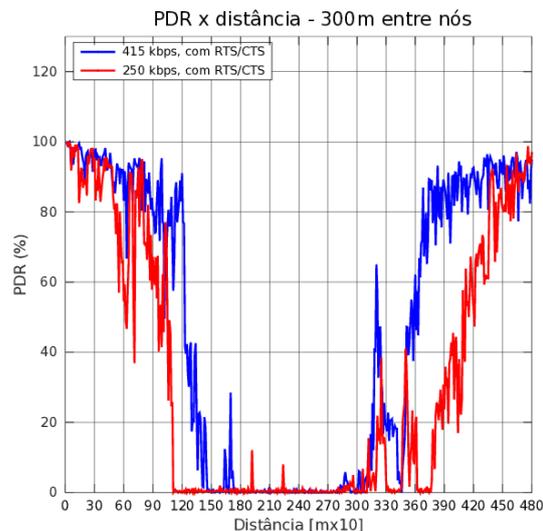
Para as taxas de transmissão de pacotes CBR/UDP menores, após a instabilidade inicial devido ao protocolo de roteamento, as retransmissões crescem proporcionalmente à medida que aumenta a distância entre o NM e o GW, exceto pela região de instabilidade de rotas.

Figura 29: Consolidação dos resultados para potência de 23 dBm EIRP, nós a 300 m.

(a) PDR consolidado sem RTS/CTS.



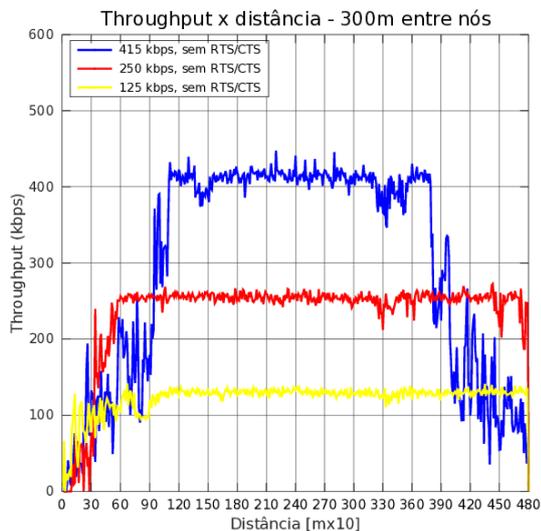
(b) PDR consolidado com RTS/CTS.



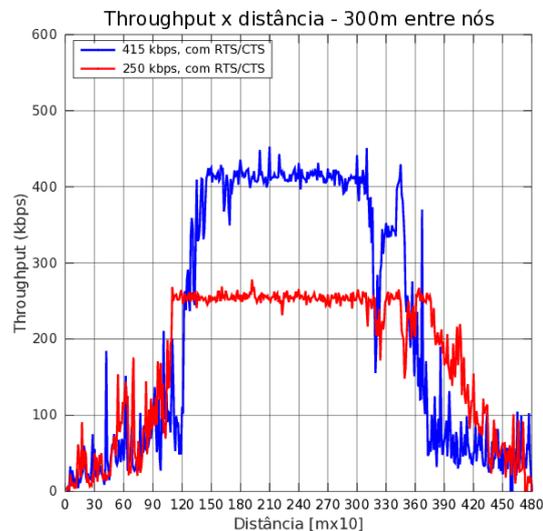
Fonte: Autoria própria.

Figura 30: Consolidação dos resultados para potência de 23 dBm EIRP, nós a 300 m.

(a) *Throughput* consolidado sem RTS/CTS.



(b) *Throughput* consolidado com RTS/CTS.

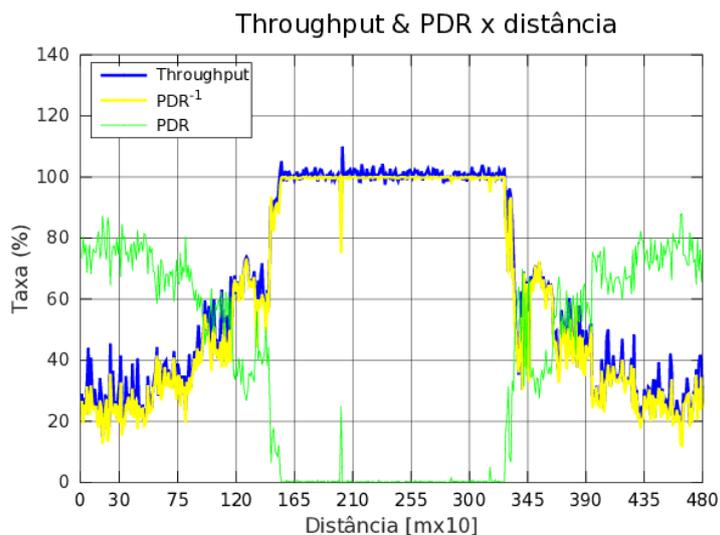


Fonte: Autoria própria.

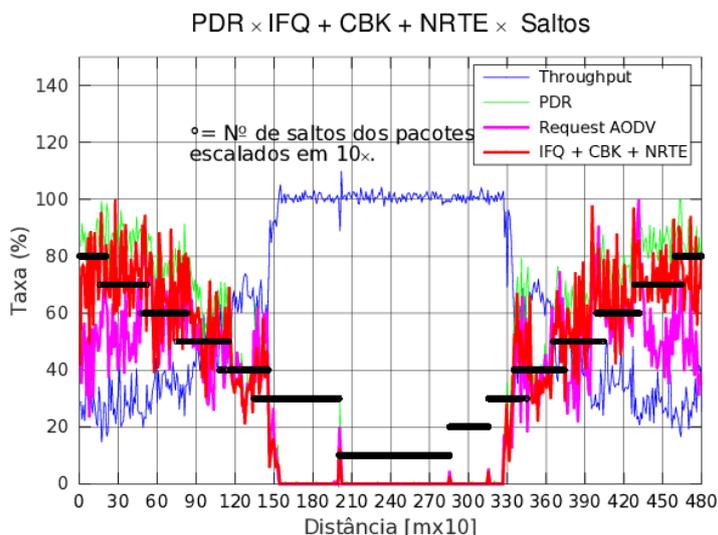
Os gráficos das Figuras 29 e 30 ilustram os dados obtidos da consolidação da PDR e o *throughput*, respectivamente, para os parâmetros da rede em linha a 300 m com potência de transmissão de baixo alcance (23 dBm EIRP), variando a taxa CBR/UDP entre 415, 250 e 125 kbps e habilitando/desabilitando o RTS/CTS para pacotes com 512 bytes para as duas primeiras taxas. Observa-se um ganho significativo de cobertura ao ajustar a taxa CBR de 415 para 250, ou para 125 kbps.

Figura 31: Comportamento da rede, nós separados a 300 m, propagação “dois raios”.

(a) Desempenho - 300 m, propagação “dois raios”.



(b) Eventos - 300 m, propagação “dois raios”.



Fonte: Autoria própria.

Porém observa-se perda significativa de cobertura quando do emprego de controle RTS/CTS. A redução da cobertura devido ao emprego do controle RTS/CTS está ligada à maior ocupação do meio devido aos quadros de controle, com a correspondente redução da capacidade de transmissão líquida da rede.

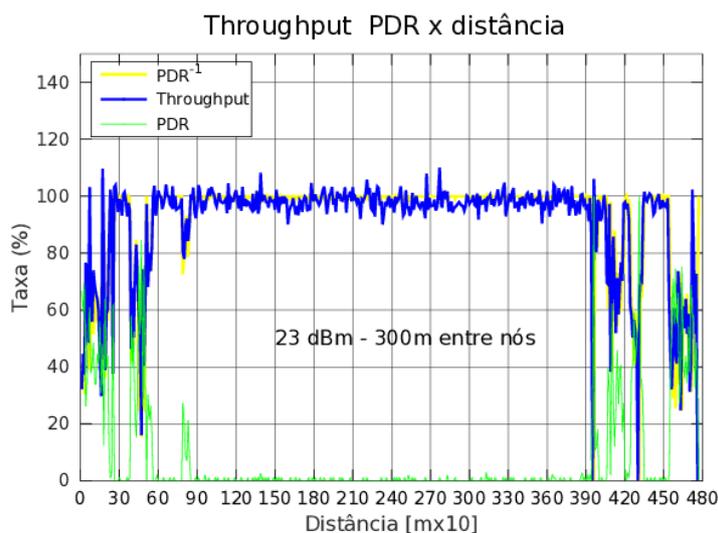
Portanto, o ganho oferecido pela redução das eventuais colisões é menor que o preço pago pela ocupação do canal decorrente do controle de acesso, cujos quadros também estão sujeitos à perdas.

Objetivando avaliar somente o impacto do comportamento do canal no mecanismo de

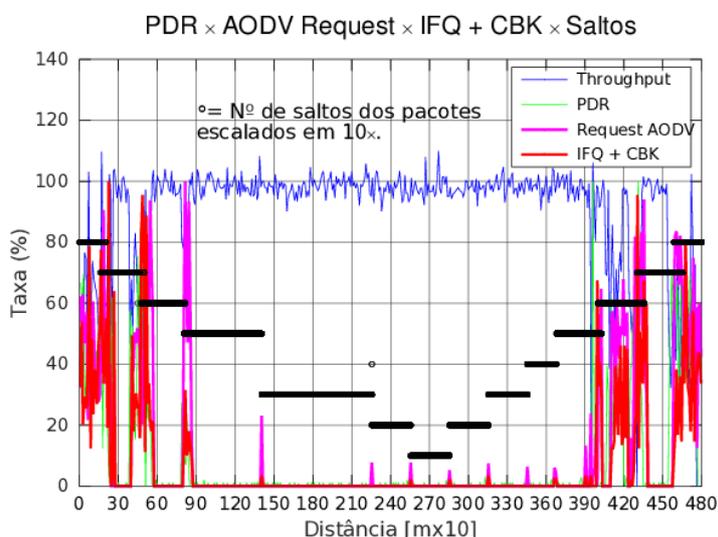
controle RTS/CTS, foi alterado o canal para dois raios e ajustada a potência de transmissão de forma a limitar a viabilidade da comunicação em 450 m, mantendo desabilitado o controle RTS/CTS. A redução do desempenho pela ocupação do canal foi mais severa conforme ilustra o gráfico da Figura 31.

Figura 32: Comportamento da rede, nós separados a 300 m, propagação “dois raios”, controle RTS/CTS e taxa de pacotes a 415 kbps.

(a) Desempenho - 300 m, propagação “dois raios”, controle RTS/CTS.



(b) Eventos - 300 m, propagação “dois raios”, controle RTS/CTS.



Fonte: Autoria própria.

Observa-se que mesmo considerando “modelo de dois raios”, um modelo de propagação mais “estável” que o utilizado nas simulações anteriores, o desempenho é prejudicado pela alta ocupação do canal e pela interferência. Para permitir uma avaliação da contribuição deste mecanismo no desempenho da rede, foi habilitado o controle RTS/CTS e

realizada nova simulação.

Os gráficos das Figuras 31 e 32 ilustram o resultado da análise do trace considerando o uso do “canal de dois raios” e a efetividade do controle RTS/CTS para este modelo de canal. Uma comparação entre estes tráfegos permite avaliar o resultado da análise dos traces. Observa-se que neste caso o emprego do controle RTS/CTS levou a rede a apresentar melhor desempenho.

No caso do “modelo de dois raios” com uso do controle RTS/CTS, o vetor de alocação de rede (NAV - *Network Allocation Vector*) é ativado quando os nós percebem a transmissão de um quadro de controle e passam a reservar o canal para a comunicação percebida. Neste modelo, o canal é invariante no tempo. Portanto, quando dado nó transmite, o nível do sinal apresenta-se estável em todos os nós que detectam o sinal.

Como resultado, o controle RTS/CTS apresenta-se efetivo na melhoria do desempenho da rede, uma vez que a invariância do canal contribui para a efetividade do NAV, pois uma vez que dado nó seja capaz de detectar a transmissão de outro, ele sempre o detectará, levando a uma menor interferência recíproca entre os nós e, conseqüentemente, menor perda de pacotes.

Distribuição dos nós fixos em intervalos de 450 m: Foi analisada a rede com nós fixos em linha, espaçados uniformemente a 450 metros, onde o nó central é o GW e um nó móvel percorre um trajeto ao longo da rede da esquerda para a direita. A topologia física da rede é ilustrada na Figura 33(a),

Foi realizada a simulação, de onde se obteve o resultado do *throughput* para 23 e 33 dBm EIRP na taxa CBR/UDP a 415 kbps. O resultado foi registrado no gráfico da Figura 33(b), onde observa-se um comportamento anômalo no *throughput*, consolidado na Tabela 12.

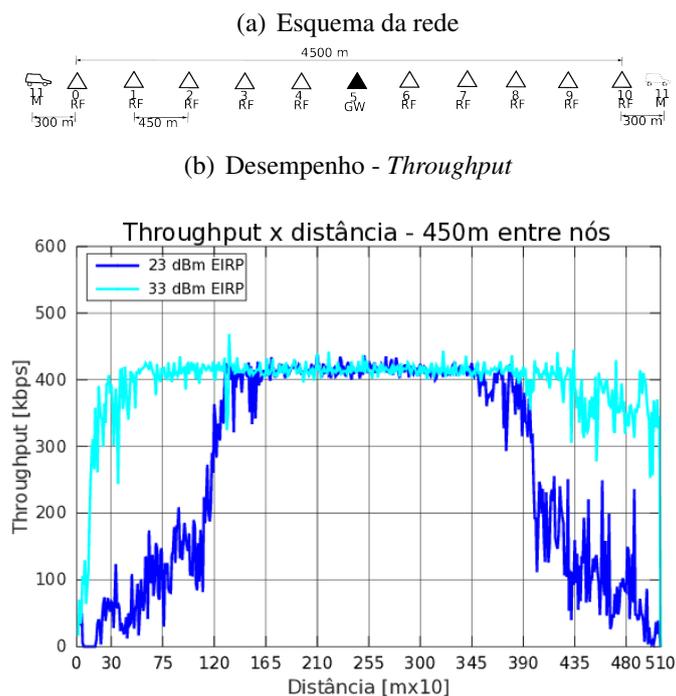
Tabela 12: Variabilidade inicial do *throughput*, nós a 450 m.

Distância	<i>Throughput</i> médio aproximado
0 - 300 m	50 kbps
300 - 750 m	75 kbps
750 - 1200 m	150 kbps
1200 - 1300 m	300 kbps
3900 - 4350 m	200 kpbs
4350 - 4800 m	100 kbps
4800 - 5100 m	50 kbps

Fonte: Autoria própria.

A análise do comportamento da PDR comparada ao do *throughput* mostra que há correlação inversa entre ambas, ilustrada no gráfico da Figura 34(a) por meio da PDR^{-1} .

Figura 33: Cobertura, nós fixos distribuídos uniformemente a 450m, Pt a 23 e 33 dBm EIRP.



Fonte: Autoria própria.

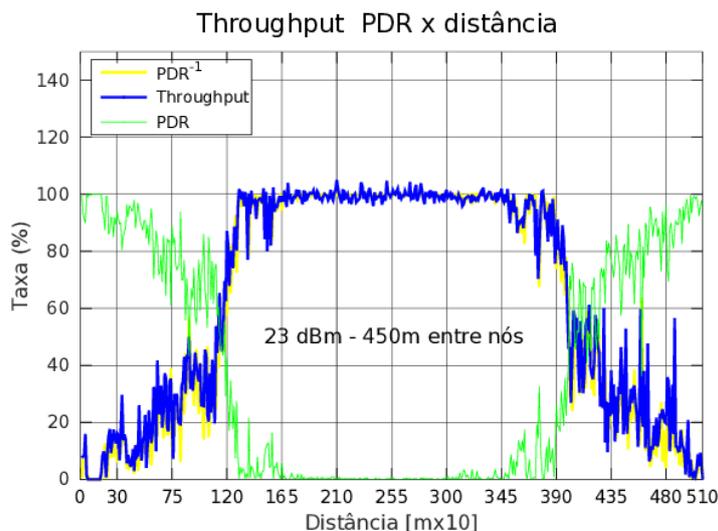
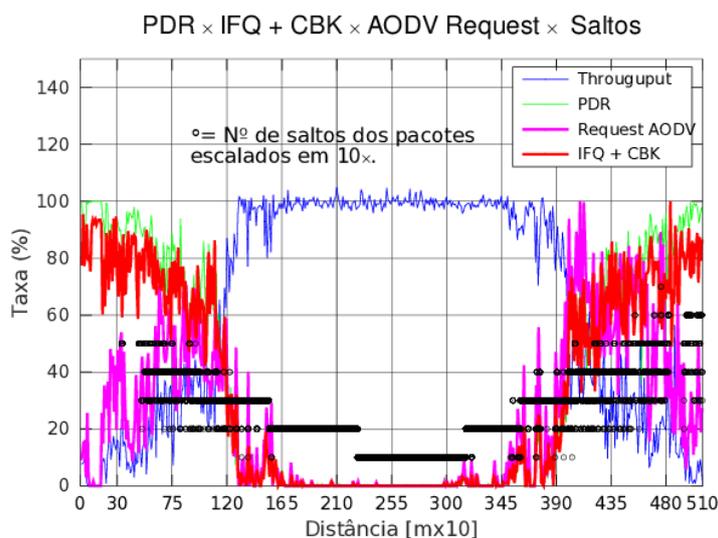
Do arquivo de trace foram extraídos os eventos associados aos descartes de pacotes, representados no gráfico da Figura 34(b), que ilustra os principais eventos que contribuem para a PDR, que são o IFQ e o CBK, da mesma forma que o observado na configuração de rede anterior.

Procedendo a análise dos traces, observa-se que os trechos de deslocamento do nó móvel compreendido da origem a aproximadamente 1500 m e de aproximadamente 3900 a 4800 m apresentam instabilidade na rede, ilustrada no gráfico da Figura 34(b).

A redução da taxa de transmissão de pacotes de 415 para 250 kbps reduziu a instabilidade da origem até aproximadamente 1000 m do início do movimento e de aproximadamente 4000 até 5100 m conforme ilustra o gráfico da Figura 35(a).

Ao reduzir a taxa de transmissão de pacotes para 125 kbps, percebe-se redução na região de instabilidade da rede para o intervalo da origem até aproximadamente 1000 m do início do movimento e de aproximadamente 4300 até 5100 m, conforme ilustrada nos gráficos da Figura 35(b).

O comportamento das retransmissões, ilustrado no gráfico da Figura 36(a), mostra haver proporcionalidade entre as ocorrências das retransmissões com as taxas de transmissão de pacotes empregadas. Portanto, o aumento das retransmissões estão ligadas principalmente à

Figura 34: Estratificação normalizada dos eventos associados ao desempenho da Figura 33(b).(a) PDR^{-1} e PDR versus *throughput* normalizado a 415 kbps.(b) PDR versus Requisições AODV normalizadas versus saltos $\times 10$.**Fonte: Autoria própria.**

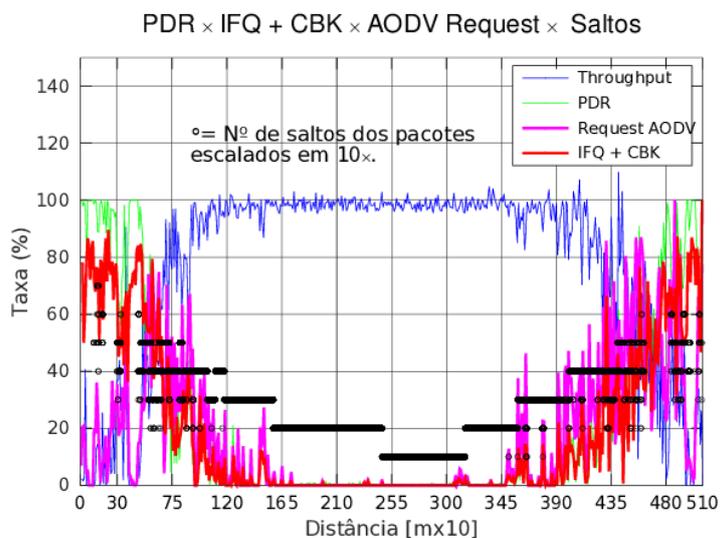
outage natural do canal, com pouca contribuição significativa das interferências entre os nós.

A proporcionalidade apenas não se verifica em uma estreita região onde há aumento abrupto no número das retransmissões, que ocorre a partir de aproximadamente 3870 m até 3970 m. A análise do trace mostrou que a instabilidade da rede neste trecho levou à ocorrência de quatro saltos dos pacotes, elevando o número de retransmissões acumuladas e, a partir de aproximadamente 3920 m, um crescimento abrupto na taxa de descartes devido ao limite de *backoff* por causa da instabilidade na rede.

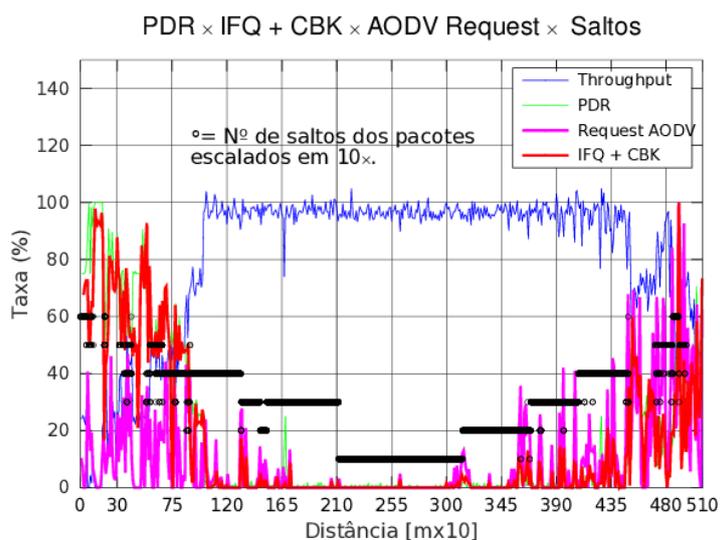
Nesta rede, a probabilidade de *outage* entre os nós fixos é significativamente maior que na anterior, motivo de mais insucessos na transmissão dos pacotes e consequentemente

Figura 35: Comportamento para taxas de CBR/UDP de 250 e 125 kbps, nós fixos a 450 m.

(a) PDR versus Requisições AODV normalizadas versus saltos $\times 10$ a 250 kbps



(b) PDR versus Requisições AODV normalizadas versus saltos $\times 10$ a 125 kbps



Fonte: Autoria própria.

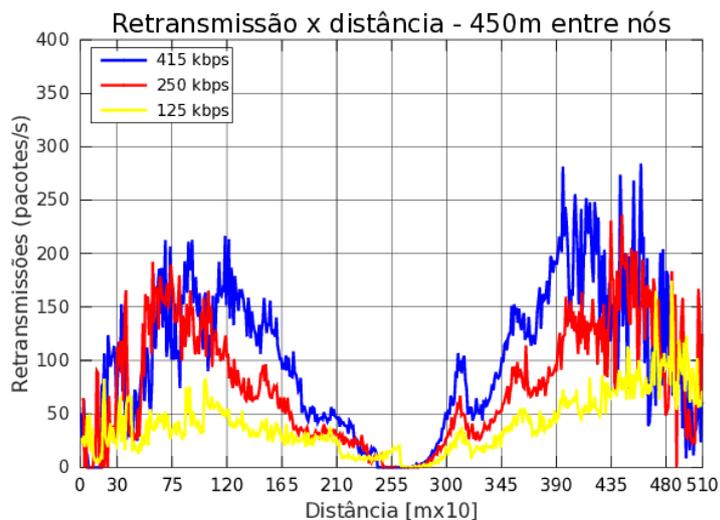
mais retransmissões entre os nós transmissores e receptores, a cada salto, que aquelas que se verificariam em redes espaçadas com distâncias menores.

A avaliação dos traces da simulação mostra que não há correlação direta entre o número de retransmissões e a taxa de descarte de pacotes, ilustrado nos gráficos das Figuras 36(a) e 34, mas observa-se que quando a PDR apresenta elevação, as retransmissões cessam de aumentar, se estabilizam e decrescem.

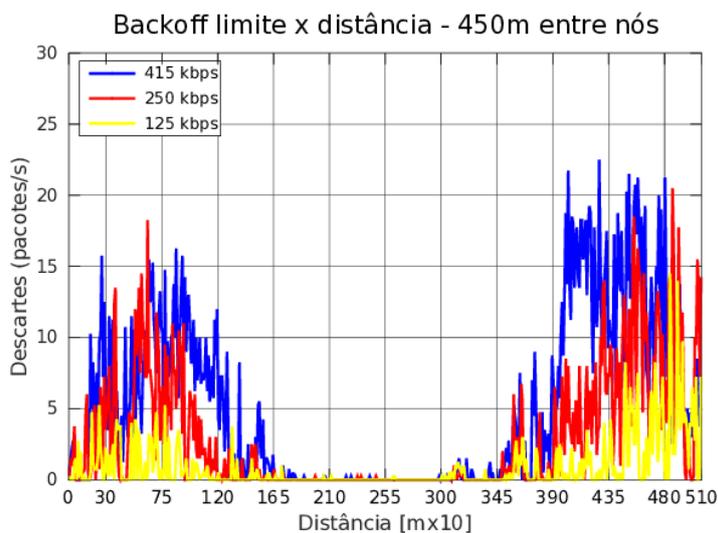
A avaliação das ocorrências de descarte por limite de *backoff* mostra que a estabilização

Figura 36: Ocorrências de retransmissão e de descarte por limite de *backoff*, nós a 450 m.

(a) Taxa de retransmissão ao longo do trajeto - nós a 450 m.



(b) Descarte de pacotes por limite de *backoff* - 450 m



Fonte: Autoria própria.

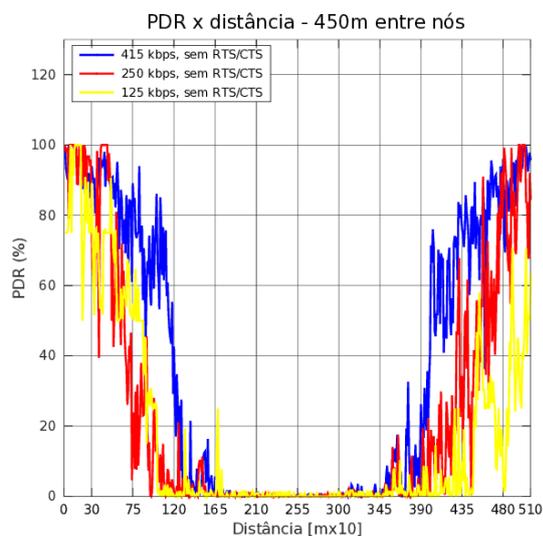
do número de retransmissões está ligada à saturação do canal por elas, causada pela ocupação conjunta do canal pelas retransmissões e repetições.

Comparando-se os gráficos da Figura 37, percebe-se que a redução das taxas de transmissão promovem uma ampliação na cobertura da rede. As taxas menores implicam em menos quadros, cada um com *payload* de 512 bytes, sendo transmitidos com dado período de tempo, que por sua vez corresponde a mais disponibilidade de canal para transmissão e menor tempo necessário para as janelas de contenção, que leva à menor saturação da rede pelas retransmissões e a um menor número de descartes por limite de *backoff*.

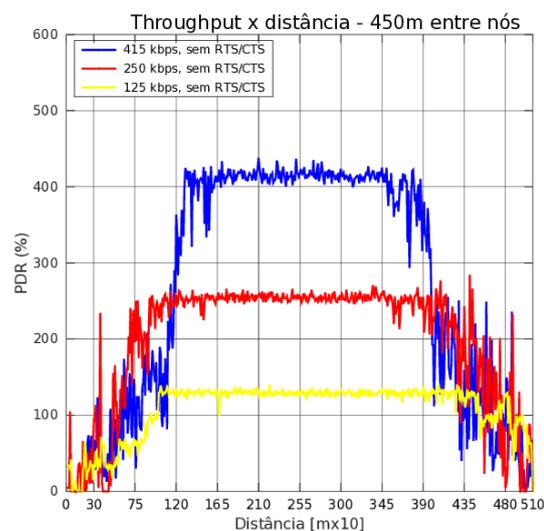
Como as redes com dado número de nós fixos operando com taxas de transmissão

Figura 37: Consolidação dos resultados para potência de 23 dBm EIRP, nós a 450 m.

(a) PDR consolidado para as configurações analisadas.



(b) *Throughput* consolidado para as configurações analisadas.



Fonte: Autoria própria.

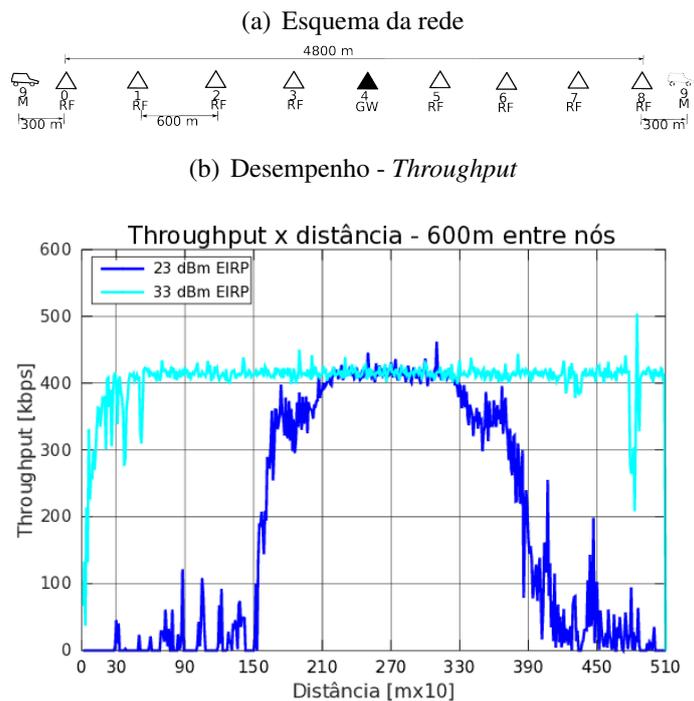
menor ocupam menos o canal, há maior disponibilidade para as retransmissões e consequentemente menores taxas de descarte de pacotes comparadas ao *throughput*, resultando na possibilidade de operação com maior cobertura em relação à taxa transmissão de pacotes CBR/UDP a 415 kbps.

Se por um lado o número elevado de nós ocupando o canal é fator limitante para a cobertura, por outro a distância entre os nós também é. A *outage* é maior quando a comunicação se dá entre dois nós mais distantes, o que resulta no aumento do número de retransmissões e maior ocupação do canal.

Portanto, para uma rede com nós mais próximos destaca-se como um fator de compromisso o número de nós utilizados na repetição da mensagem, e para nós mais distantes, o número de retransmissões causados pelas *outages*.

Distribuição dos nós fixos em intervalos de 600 m: A rede linear com nós fixos separados a 600 m entre si representada na Figura 38(a) foi analisada. O desempenho do *throughput* para as potências de 23 e 33 dBm está ilustrado no gráfico da Figura 38(b).

A análise do trace desta simulação demonstrou existir regiões de instabilidade no *throughput* em dois intervalos, o primeiro aproximadamente de 1500 até 2100 m do início do movimento, e o segundo aproximadamente de 3300 até 4100 m. Do início do movimento até cerca de 1500 m, e a partir de 4100 m até o final não houve transferência de pacotes com fluxo contínuo.

Figura 38: Cobertura da rede com nós fixos distribuídos uniformemente, 600m, 23 e 33 dBm EIRP.

Fonte: Autoria própria.

A estratificação do trace nas regiões de instabilidade permite ligar a PDR ao IFQ e ao CBK, como ilustram os gráficos da Figura 39 .

Quando o nó de destino é encontrado (o nó móvel, no caso) a cerca de 1500 m do início há uma grande atividade do protocolo do roteamento, que se estabiliza a cerca de 2100 m. As requisições de rotas voltam a acontecer após 3300 m do início do deslocamento e coincidem com o aumento da taxa de descarte de pacotes, quando observa-se mudança acentuada na atividade do protocolo de roteamento.

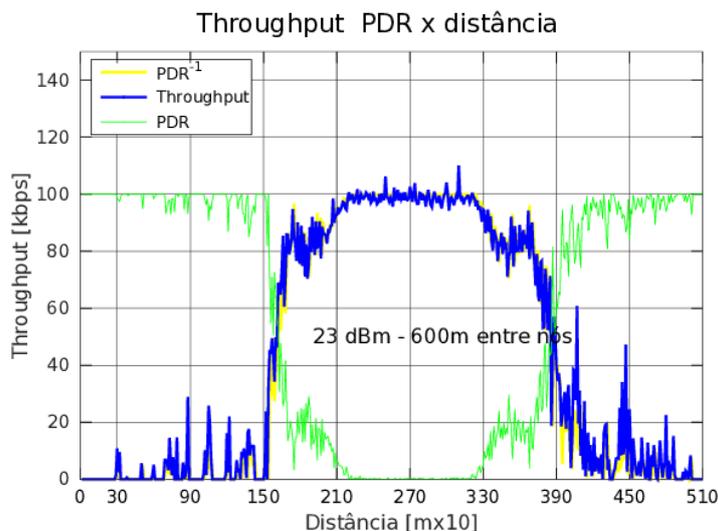
Tanto na região em que o nó móvel e o GW começam a estabelecer como na fase em que começam a perder contato, observa-se a ocorrência da instabilidade nas rotas, com quantidade de saltos entre a origem e o destino mudando rapidamente e de forma desordenada.

Neste cenário, a troca de mensagens somente se mantém estável no primeiro salto que liga GW diretamente ao NM se os nós estiverem operando com potência de 23 dBm EIRP.

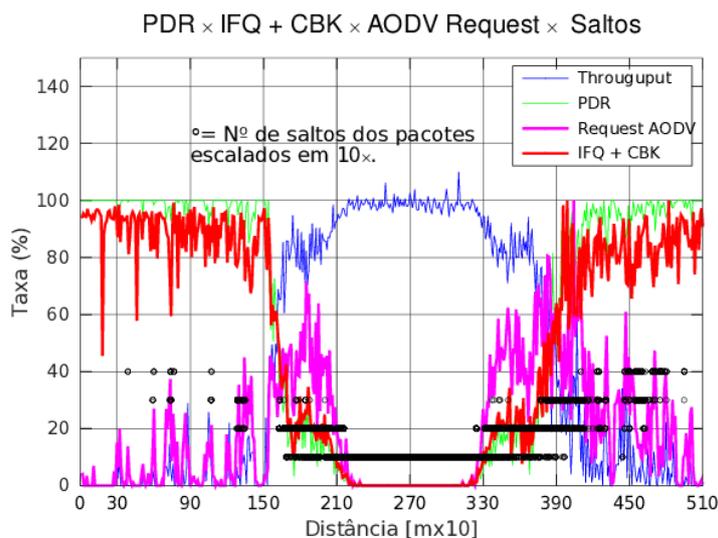
A rede apresenta queda no *throughput* e aumento na taxa de descarte de pacotes de aproximadamente 20% à medida que os nós se afastam a 600 m, o que sugere ser este o limiar para a viabilidade para a troca de mensagens entre dois nós com baixo alcance. A redução da taxa de pacotes para 250 e 125 kbps não aumentou significativamente a cobertura, situação ilustrada nos gráficos da Figura 40.

Figura 39: Estratificação dos eventos associados à instabilidade do throughput, nós a 600 m.

(a) PDR^{-1} e PDR versus *throughput* normalizado para a taxa de 415 kbps.



(b) PDR versus Requisições AODV normalizadas versus saltos $\times 10$ a 415 kbps.

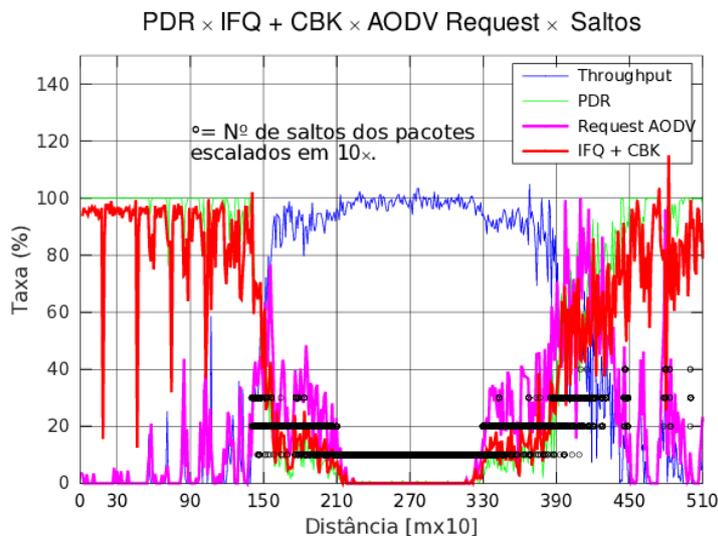


Fonte: Autoria própria.

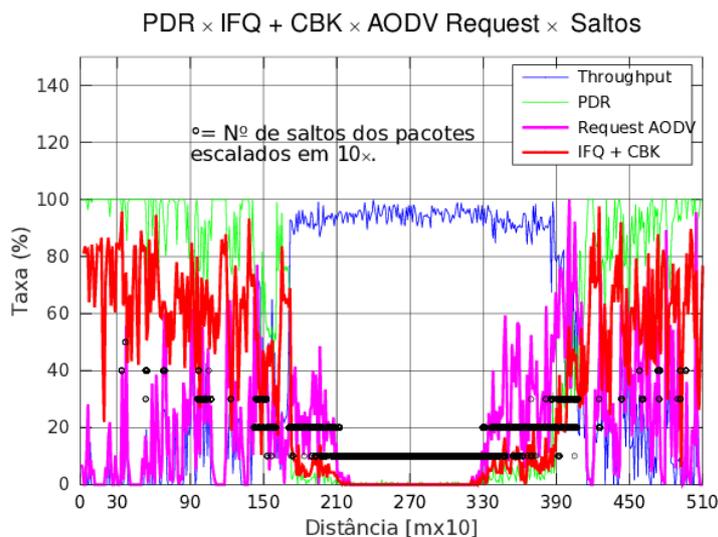
Logo, com base nas informações do arquivo trace, apresentadas no gráfico da Figura 39(b), conclui-se que a instabilidade nos trechos de 1500 a 2100 m e de 3300 a 3900 m é causada por uma combinação da estatística do canal que causa a instabilidade do protocolo de roteamento e provoca a elevada alternância no número de saltos entre o GW e o nó móvel.

O número de retransmissões guarda proporcionalidade com a taxa de transmissão de pacotes (considerando o mesmo número de saltos dos pacotes), ilustrado no gráfico da Figura 41(a), portanto a causa das perdas de pacotes são as *outages* devido ao comportamento natural do canal, sem contribuição significativa devido à interferência entre os nós.

Figura 40: Comportamento para taxas CBR/UDP de 250 e 125 kbps, nós fixos a 600 m.
 (a) PDR versus Requisições AODV normalizadas versus saltos $\times 10$ a 250 kbps



(b) PDR versus Requisições AODV normalizadas versus saltos $\times 10$ a 125 kbps



Fonte: Autoria própria.

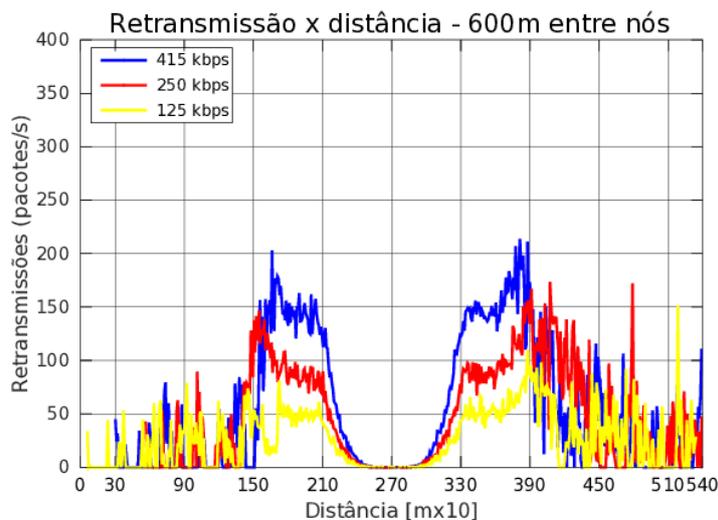
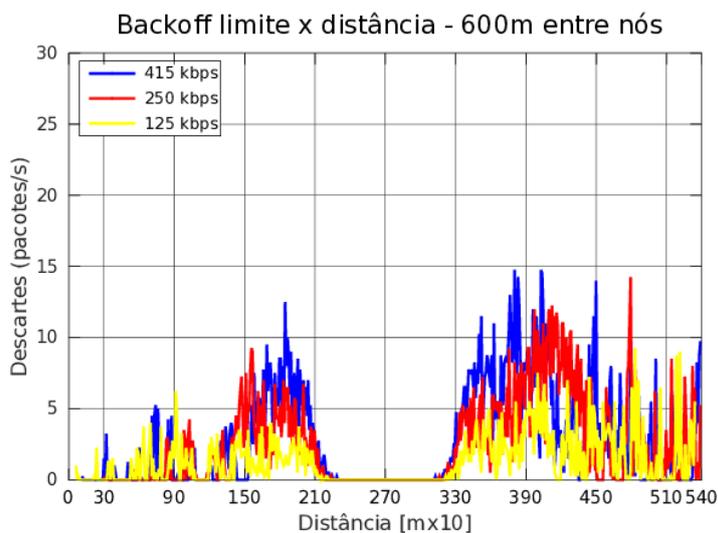
Nos trechos entre 1500 até 2100 m e 3300 até 3900 m ocorrem descartes de pacotes por causa do limite de *backoff*, conforme ilustrado no gráfico da Figura 41(b). Este limite é atingido devido à saturação (ou congestionamento) da rede por causa do número de retransmissões.

O resultado da análise do trace, ilustrado nos gráficos da Figura 42, permite concluir que a PDR sofre elevação nos mesmos trechos que para taxas maiores, ao passo que o *throughput* sofre redução.

Independentemente da taxa, quando a rede estiver operando com potência de

Figura 41: Ocorrências de retransmissão e de descarte por limite de backoff, nós a 600 m.

(a) Taxa de retransmissão ao longo do trajeto - nós a 600 m.

(b) Descarte de pacotes por limite de *backoff* - 600 m**Fonte: Autoria própria.**

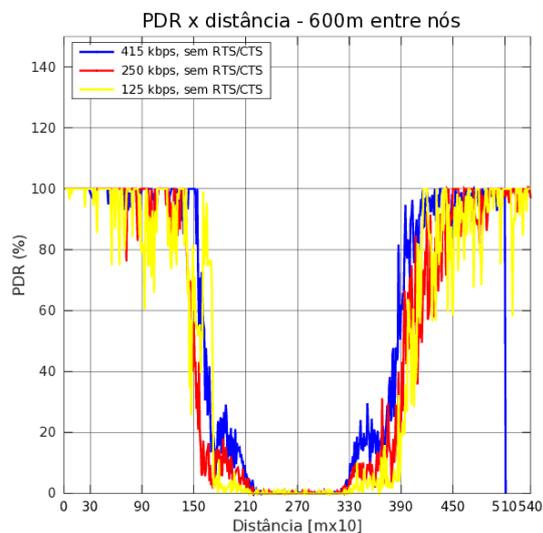
23 dBm EIRP, a cobertura se limita ao trecho compreendido entre 600 m antes até 600 m após o GW, onde a rede se apresenta estável.

Ao longo do deslocamento, o comportamento da rede apresenta simetria em relação ao GW, durante as fases de início e término do deslocamento. A instabilidade da rede durante a fase de resolução de endereçamento nesta configuração comprometeu uma fração menor do deslocamento que nas configurações anteriores, por conta do menor número de nós envolvidos.

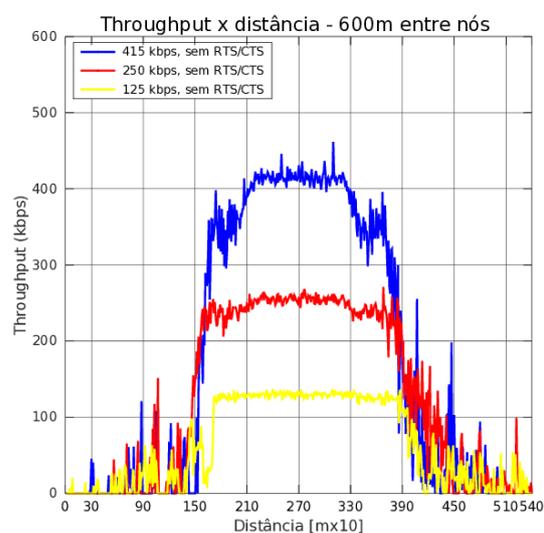
Distribuição dos nós fixos em intervalos de 900 m: Lançou-se mão de uma configuração linear composta de 7 nós fixos separados uniformemente de 900 metros e percorrida por um nó móvel e está ilustrada pela Figura 43(a) para avaliação. Para isto, está

Figura 42: Consolidação dos resultados para potência de 23 dBm EIRP, nós a 600 m.

(a) PDR consolidado para as configurações analisadas.



(b) Throughput consolidado para as configurações analisadas.

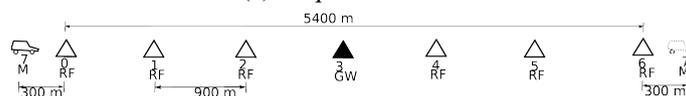


Fonte: Autoria própria.

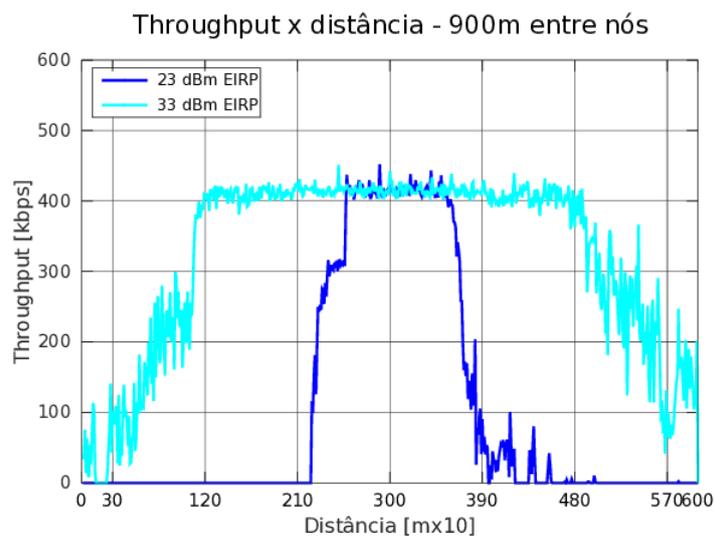
sendo considerada a premissa de que o canal de propagação não se altera significativamente entre 100 e 1800 m. par

Figura 43: Cobertura da rede com nós fixos distribuídos uniformemente a 900m, Pt a 33 dBm EIRP.

(a) Esquema da rede



(b) Desempenho - *Throughput*



Fonte: Autoria própria.

A simulação da rede com potências de 23 e 33 dBm EIRP permitiu avaliar a cobertura para as duas configurações, conforme ilustrado no gráfico da Figura 43(b).

A análise do trace mostra que a rede com nós separados a 900 m apresenta-se com conexão intermitente ao ser percorrida por um nó móvel se estiver operando a com potência de 23 dBm EIRP. Portanto, não será objeto de atenção neste trabalho.

Por outro lado, a rede operando com potência de 33 dBm EIRP e taxa de 415 kbps apresenta-se estável para dois saltos conforme pode-se observar no gráfico da Figura 44. Isto permite uma cobertura de 1800 m antes até 1800 m após o GW. Nesta taxa há instabilidade da rede nos intervalos de deslocamento do nó móvel compreendidos aproximadamente do início até 1200 m e de 4800 até 6000 m.

Novamente, a análise do trace permite verificar que há correlação entre a queda de *throughput* e a elevação da taxa de eventos que levaram ao descarte de pacotes, ilustrado no gráfico da Figura 44(a). A estratificação das causas mostraram haver associação entre eventos IFQ e CBK e os descartes de pacotes conforme ilustrado no gráfico da Figura 44(b).

A redução da taxa de transmissão para 250 kbps e para 125 kbps propicia um aumento discreto na cobertura da rede, conforme pode-se verificar nos gráficos das Figuras 45(a) e 45(b).

A partir da análise do trace verifica-se que as retransmissões ocorrem de forma proporcional às taxa de transmissão de pacotes, considerando o mesmo número de saltos, conforme ilustrado nos gráficos na Figura 46, portanto elas ocorrem devido as perdas de canal decorrentes da *outage* natural do canal, com contribuição desprezível devido às interferências entre os nós.

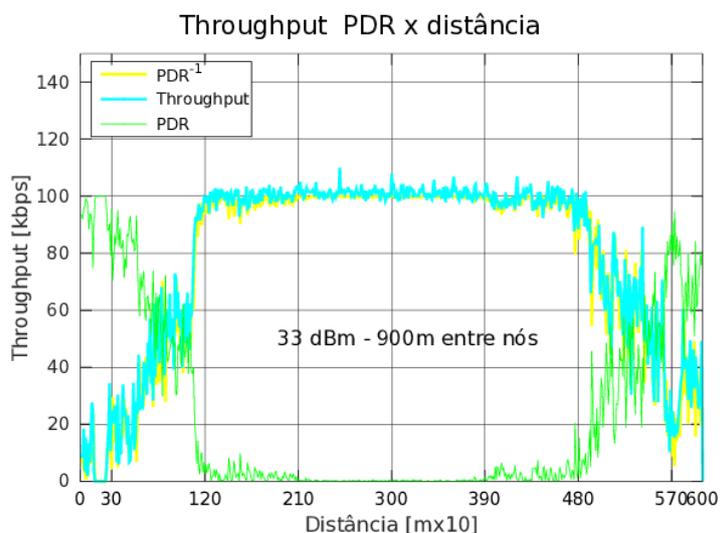
Com relação ao descarte por limite de *backoff*, indicativo de saturação da rede, verifica-se a ocorrência nos intervalos entre 300 até 1200 m e 4800 até 5700 m no caso da taxa de transmissão de pacotes CBR/UDP de 415 kbps e em região discretamente menor para as taxas de 250 e 125 kbps. O limite de *backoff* ocorre nesta região devido ao número de retransmissões, que leva à saturação do canal.

A realização do canal entre o GW e o nó móvel, quando ocorrer mais de um salto, é prejudicada pela estatística de *outage* do canal, principal motivo da degradação do *throughput* nos intervalos entre 0 e 1200 m e entre 4800 e 6000 m. A degradação do canal leva à instabilidade do protocolo de roteamento, conforme ilustrado no gráfico da Figura 44(b).

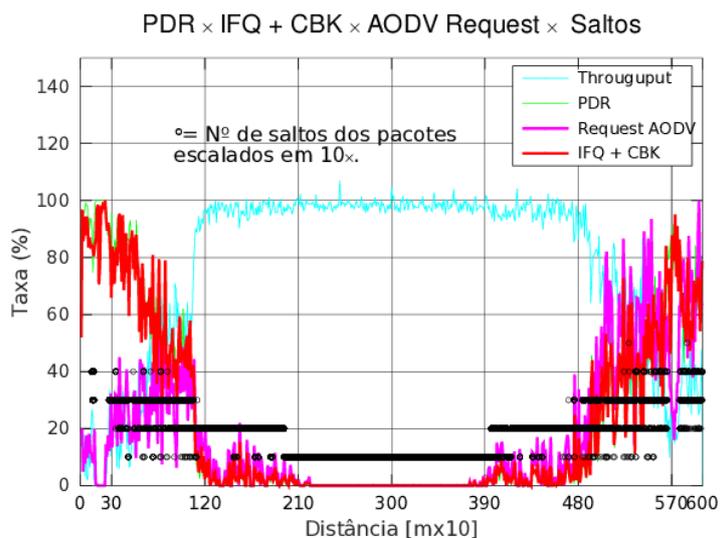
A redução na taxa de pacotes de 415 para 250 e 125 kbps contribui para aumento discreto na cobertura da rede, conforme ilustram os gráficos da Figura 47. Isto ocorre devido à menor saturação do canal causada pelas retransmissões, o que é possível observar no gráfico da

Figura 44: Estratificação dos eventos associados ao desempenho, nós a 900 m.

(a) PDR^{-1} e PDR versus *throughput* normalizado para a taxa de 415 kbps.



(b) PDR versus Requisições AODV normalizadas versus saltos $\times 10$ a 415 kbps.



Fonte: Autoria própria.

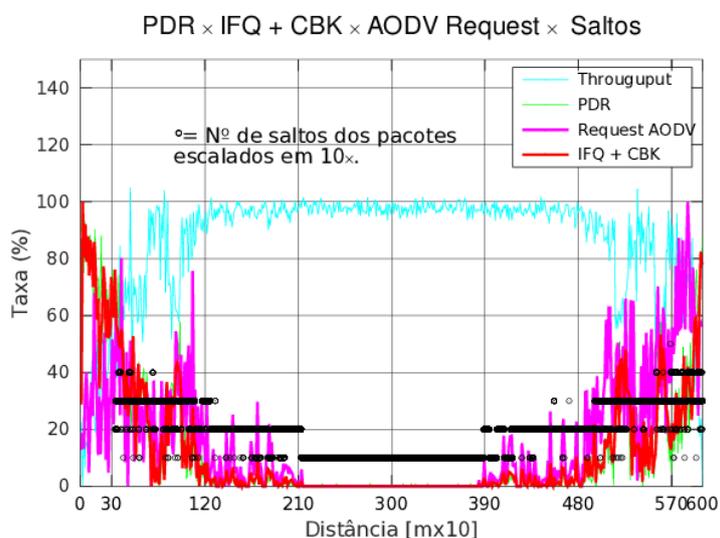
Figura 46(b).

Distribuição dos nós fixos em intervalos de 1800 m: Por fim, considerou-se a última configuração com separação uniforme entre os nós fixos de 1.800 metros. A Figura 48(a) ilustra a configuração da rede e o resultado do *throughput* obtido para as simulações em 23 e 33 dBm encontra-se ilustrado no gráfico da Figura 48(b).

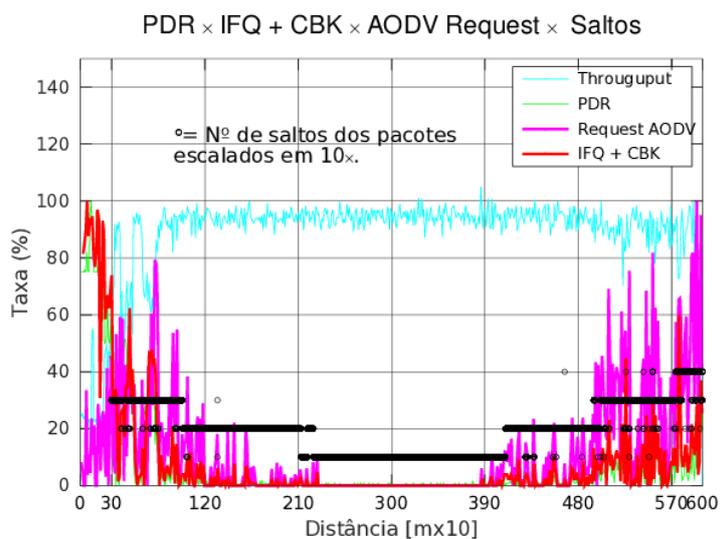
Observa-se que, independentemente da potência de operação, somente é possível a comunicação do nó móvel com o GW.

Figura 45: Comportamento da rede para taxas de CBR/UDP de 250 e 125 kbps, nós fixos espaçados a 900 m.

(a) PDR^{-1} e PDR versus *throughput* normalizado para a taxa de 250 kbps.



(b) PDR versus Requisições AODV normalizadas versus saltos × 10 a 125 kbps.



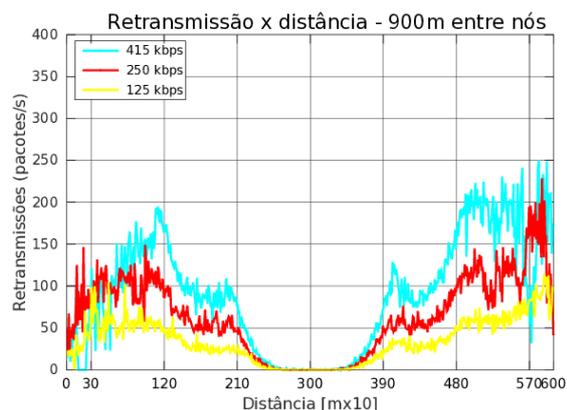
Fonte: Autoria própria.

2.3.2.1 CONCLUSÃO SOBRE A TOPOLOGIA DE REDE LINEAR

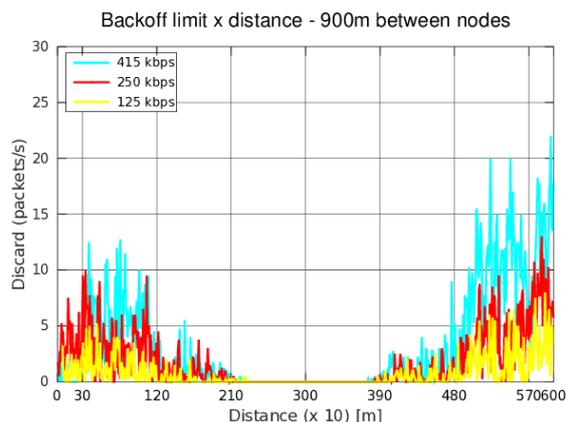
Observou-se nestas simulações, com o modelo de propagação adotado e mesmo tipo de equipamentos, que a cobertura da rede depende da taxa de transmissão, do número de saltos e da distância entre os nós, conforme pode-se extrair desta etapa de simulação. Outra observação relevante é o tráfego considerável gerado pelo AODV no momento da descoberta inicial da rede e nos momentos em que o desempenho é reduzido devido a outros fatores, como erros devido

Figura 46: Ocorrências de retransmissão e de descarte por limite de *backoff*, nós a 900 m.

(a) Taxa de retransmissão ao longo do trajeto - nós a 900 m.



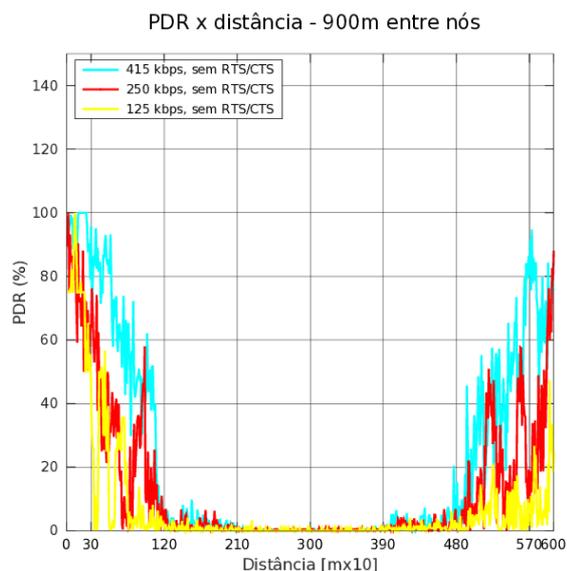
(b) Descarte de pacotes por limite de *backoff* - 900 m



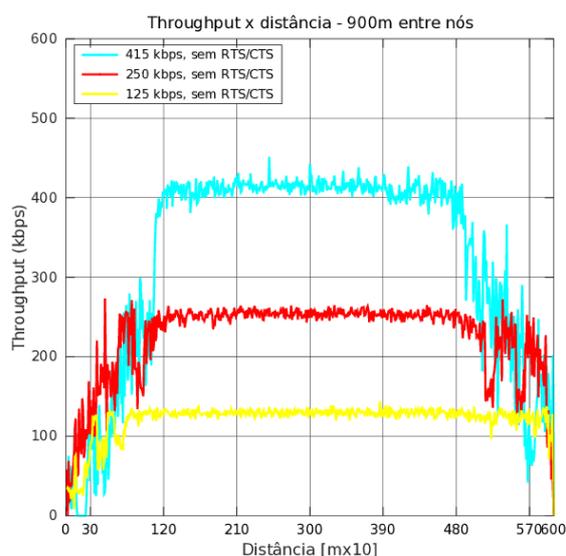
Fonte: Autoria própria.

Figura 47: Consolidação dos resultados para potência de 33 dBm EIRP, nós a 900 m.

(a) PDR consolidada para as configurações analisadas.



(b) Throughput consolidado para as configurações analisadas.



Fonte: Autoria própria.

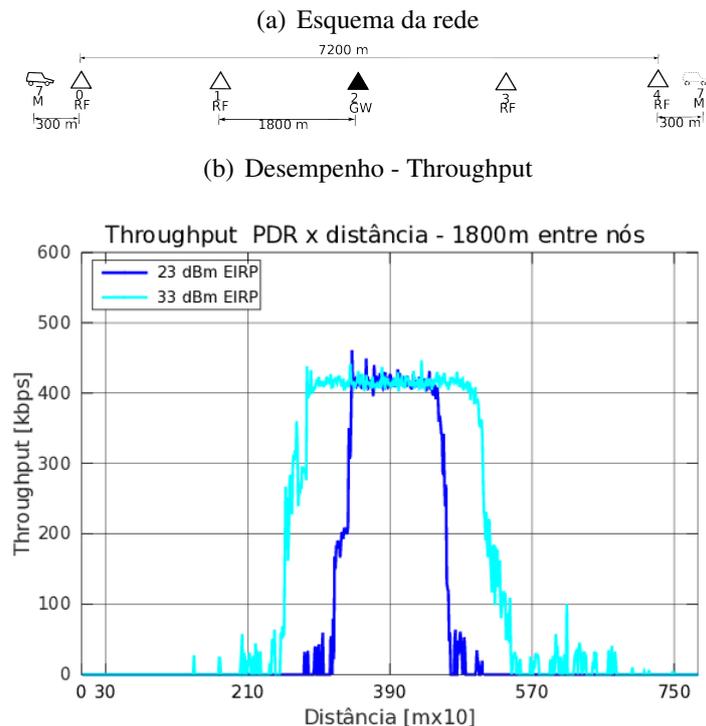
ao canal, que contribui em avalanche para degradação mais acentuada no desempenho da rede.

As observações a seguir se aplicam para uma rede operando com o padrão IEEE 802.11p, protocolo de roteamento AODV e modelo de canal utilizado neste trabalho.

Potência de transmissão de 23 dBm EIRP:

- Para redes de 300 m e 450 m com taxa CBR/UDP 415 kbps observa-se que há regiões de instabilidade no início e no final do deslocamento do nó móvel, causado:

Figura 48: Cobertura da rede com nós fixos distribuídos uniformemente a 1800m, Pt a 23 e 33 dBm EIRP.



Fonte: Autoria própria.

◦ Pelo número de retransmissões, que causa ocupação do canal e descarte de pacotes da pilha de dados da camada de enlace devido ao seu enchimento, sem que fosse possível a retransmissão;

◦ Pelo tráfego expressivo de requisições do protocolo de roteamento, que gera instabilidade nas rotas durante aqueles trechos.

◦ Pela taxa de erros decorrentes da estatística de *outage* do canal, que gera PDR maiores em redes mais espaçadas para dado número de saltos, que para redes menos espaçadas;

◦ A redução da taxa de transmissão de pacotes CBR/UDP mostrou contribuir para a redução da região de instabilidade de forma mais eficiente para redes menos espaçadas que para redes mais espaçadas;

- Diante do exposto, verifica-se que a rede possui uma limitação de cobertura, função da taxa de transmissão de pacotes empregada e da distância entre os nós, cuja principal origem está no modelo de propagação utilizado. Como consequência disso, destaca-se no comportamento das redes estudadas:

◦ Quando a rede opera espaçada a 300 m, com taxa de 415 kbps, o *throughput* e

o protocolo de roteamento permanecem estáveis até quatro saltos, sendo o último de um nó fixo para o nó móvel. Esta cobertura pode ser ampliada, reduzindo-se a taxa de transmissão de pacotes CBR/UDP para 250 kbps, que permite até sete saltos e treze nós fixos;

° Para a rede espaçada em 450 m, com taxa de 415 kbps, o *throughput* e o protocolo de roteamento permanecem estáveis até três saltos, e cinco nós fixos. Com a redução da taxa de transmissão de pacotes CBR/UDP para 250 kbps, a rede pode operar com até quatro saltos e sete nós fixos;

° Nas configurações adotadas para a simulação, a potência não se mostrou apropriada para emprego em uma rede com a topologia analisada com nós separados a 600 m;

- Quando a rede está espaçada a 900 ou 1800 m, não há comunicação diretamente entre os nós fixos, portanto nestas condições não é possível uma conexão persistente;

Potência de transmissão de 33 dBm EIRP:

- No caso de espaçamento entre nós fixos de 300 m, há alguma perturbação causada pelo protocolo de roteamento no final do deslocamento. Devido à potência mais elevada, os pacotes realizam poucos saltos ao longo de trajeto do nó móvel e a medida que o nó móvel se aproxima do final do trajeto a taxa de descarte de pacotes, bem como o número de retransmissões aumentam, o que provoca a busca de rotas pelo protocolo de roteamento, motivo da instabilidade.
- Quando operando espaçada a 450 m, ocorre o fenômeno idêntico ao observado no item anterior, devido aos nós estarem a uma distância que permite a cobertura do trajeto com de 33 dBm EIRP com poucos saltos.
- Na rede com espaçamento a 600 m, toda a rede analisada apresenta cobertura, sendo esta configuração nas condições da simulação a que apresentou melhor desempenho;
- Na rede operando com espaçamento entre os nós fixos em 900 m mostrou-se possível o emprego de um RF entre o GW e o nó móvel (dois saltos). A redução da taxa de transmissão de pacotes CBR/UDP promoveu aumento da cobertura.
- No caso de redes com espaçamentos a 1800 m, não há comunicação entre os nós fixos e, da mesma forma que na situação anterior, não é possível uma conexão persistente nestas condições;

2.3.3 TERCEIRA ETAPA - REDE EM GRADE UNIFORME

Além do modelo de rede em linha visto na seção anterior, há dentro do escopo deste trabalho, para redes conectadas, há a topologia em grade. Nesta etapa a simulação serão

adotadas as premissas de que os nós móveis circulação pelas vias que cruzam no ponto de implantação dos RF e GW com os quais serão trocadas as mensagens e de que o canal ao longo de toda a topologia apresenta comportamento semelhante, quer entre elementos da infraestrutura, quer entre estes e os nós móveis.

Na seção anterior, verificou-se que a associação do protocolo de roteamento com o modelo de canal e o método de acesso levam à degradação do desempenho, todavia a rede estudada apresentava distribuição de nós unidimensional. Nesta seção, é avaliada a configuração da rede com distribuição espacial bidimensional. Esta nova topologia contribui para a criação de maior número de rotas. Em ambas as topologias, linear e grade, há melhores e piores rotas.

Os fenômenos associados à operação da rede naquela configuração serão avaliados nesta seção, principalmente devido à topologia e o canal de comunicação escolhido. Foi empregada taxa de transmissão de pacotes a 415 kbps em uma modulação BPSK (taxa de transmissão de dados a 3 Mbps) em todas as simulações.

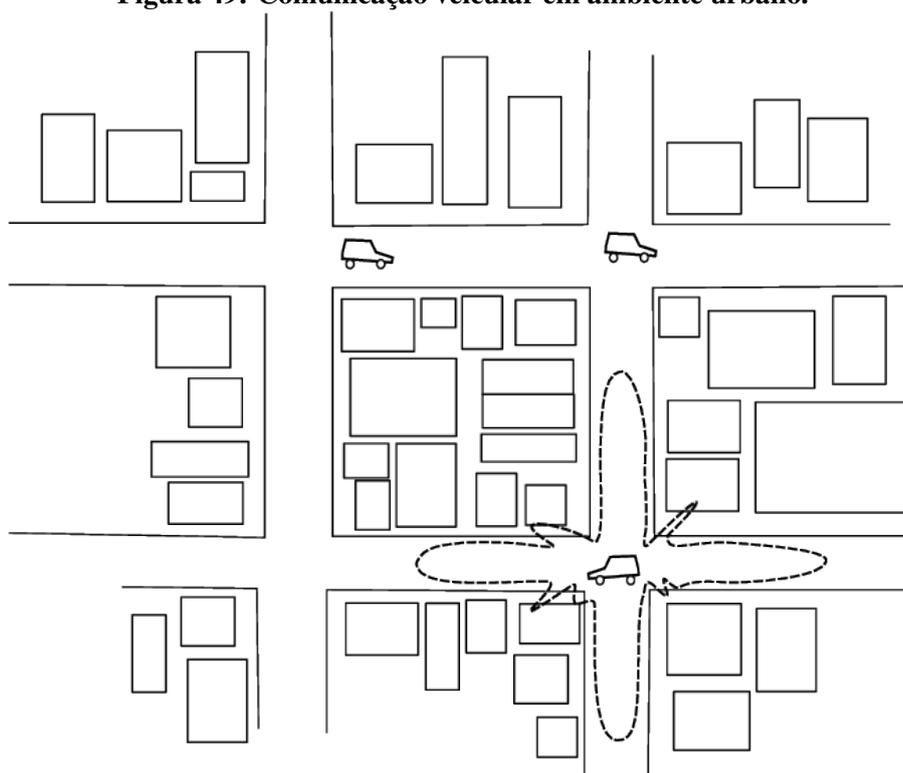
Considerando que a propagação ao longo das vias não apresenta o mesmo comportamento que aquela através das edificações em sua margem. O canal se comporta conforme ilustrado na Figura 49, pois em ambientes urbanos onde as redes em grade seriam implementadas, há grande ocupação por imóveis dos mais diversos tipos e com altura consideravelmente superior àquela onde este trabalho propõe que estejam as antenas, o que reduz significativamente a propagação nas direções adjacentes às bissetrizes dos ângulos formados entre as vias, devido à obstrução total da visada entre os nós (WANG et al., 2011).

A Figura 49 ilustra o comportamento do sinal irradiado por uma antena omnidirecional em um centro urbano, mostrando que o nível de sinal que chega a um receptor atrás de blocos de edifícios apresenta intensidade menor que aquele que chega a um receptor à mesma distância, porém longo das mesmas vias.

Nesta etapa foi empregada antena omnidirecional e uma solução no mecanismo de propagação do NS2 que permite reduzir o sinal propagado em direções determinadas. A solução foi desenvolvida por (INSTITUTO...). O método consiste em empregar um “*proxy*” sobre o modelo de propagação em uso na simulação. O *proxy* é na verdade uma classe que estende o modelo de propagação do NS-2 e permite atenuação e ganhos do sinal recebido em determinadas direções.

A simulação foi conduzida sobre quatro configurações distintas de rede, de forma a contemplar as possíveis configurações genéricas, mas sem perder de vista o cenário urbano real. As distâncias entre os nós foram ajustadas para 300, 450 e 600 m (múltiplos de 150 m), e as potências de transmissão empregadas foram 23 e 33 dBm EIRP, conforme as seções anteriores.

Figura 49: Comunicação veicular em ambiente urbano.



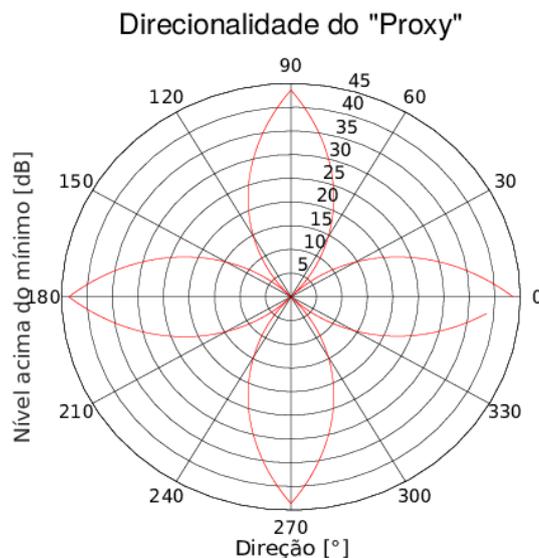
Fonte: (WANG et al., 2011).

Para permitir a avaliação do comportamento do *proxy* sobre o canal simulado, o modelo de propagação teve zerado o desvio padrão e desenvolvida uma simulação de sondagem para averiguar o efeito do *proxy* sobre o canal.

A sondagem consistiu em empregar dois nós, sendo um fixo e outro móvel dando a volta em seu redor, mantendo uma distância constante entre eles, e avaliar o comportamento do nível recebido ao longo dos diferentes ângulos. O resultado está ilustrado na Figura 50, onde se observa que nas direções $(2n - 1)\frac{\pi}{4}$, $n \geq 1$, $n \in \mathbb{Z}$, os níveis são os mínimos. Na direção dos máximos, que ocorre em $k\frac{\pi}{2}$, $k \geq 0$, $k \in \mathbb{Z}$, foi assegurado que o nível recebido é o mesmo que aquele sem o *proxy*.

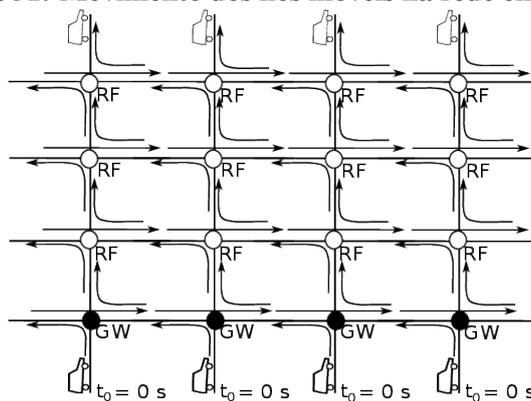
O resultado do emprego do *proxy* para a simulação, é de que ao longo dos eixos das vias onde se deslocam os nós móveis, o sinal a ser recebido e determinada distância é o mesmo que aquele recebido sem ele. Nas direção das bissetrizes dos ângulos de cruzamento das vias o sinal é recebido atenuado em aproximadamente 43 dB, conforme ilustrado no gráfico da Figura 50.

Foram simuladas 4 configurações distintas de redes em grade para fins de avaliação do comportamento da rede devido à combinação de fatores decorrentes da seletividade de ganho,

Figura 50: Nível do sinal acima do mínimo [dB].**Fonte: Autoria própria.**

modelo de propagação e protocolo de roteamento adotados.

A temporização da comunicação entre os GW e os nós móveis foi pensada de forma a ocorrer de maneira cíclica. O primeiro GW à esquerda das redes troca mensagens durante 10 s com o nó móvel, que sobe alternando o trajeto ao longo do sua via vertical, depois ele cessa, e começa o outro GW à sua direita, e assim por diante, até o último GW à direita. Depois o ciclo recomeça no primeiro GW à esquerda, a cada GW corresponde um nó móvel que se afasta pela via vertical.

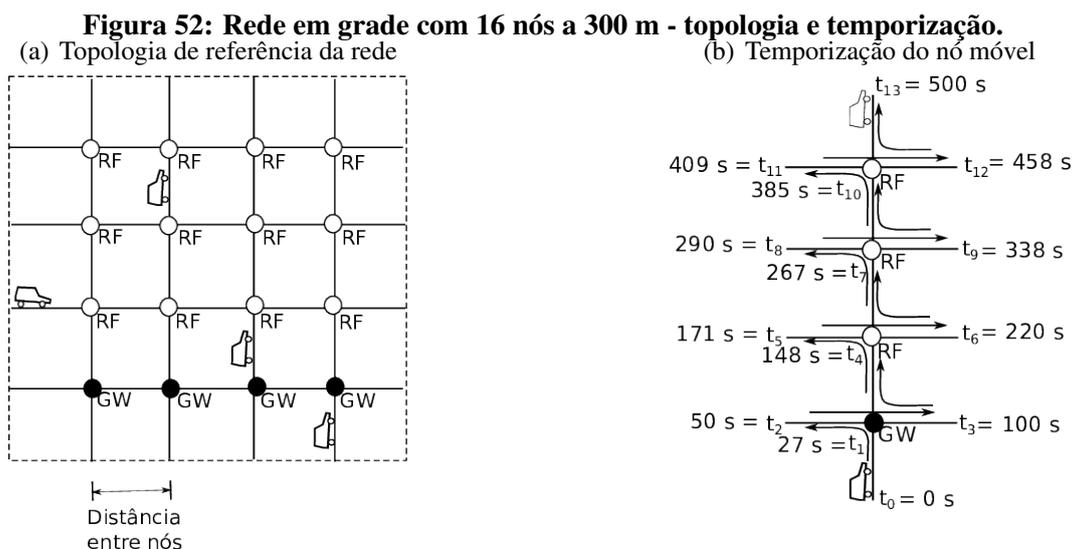
Figura 51: Movimento dos nós móveis na rede em grade.**Fonte: Autoria própria.**

Os nós móveis iniciaram seu movimento em t_0 . Em cada coluna onde há um GW, também circula um nó móvel. O movimento dos nós móveis apresentam pequenas diferenças na temporização devido à simulação de movimento do SUMO. Os nós móveis subiram realizando

movimento alternado de baixo para cima, limitando seu traçado aos cruzamentos com os RFs e GWs à esquerda e à direita da via vertical do GW com o qual troca mensagens. O movimento alternado se repetiu até atingir o limite da secção acima, conforme ilustra a Figura 51.

Com um movimento alternado de deslocamento do nó móvel aliado à seletividade de ganho e ao comportamento do canal, busca-se avaliar o impacto no desempenho da rede em um cenário controlado mais próximo àquele correspondente aos nós móveis circulando entre as quadras nos centros urbanos, mantendo o foco na avaliação da estabilidade do protocolo de roteamento escolhido e rapidez para a solução das rotas.

Rede com 16 nós fixos separados a 300 m operando a 23 dBm EIRP: A rede ilustrada na Figura 52(a) é composta de 16 nós fixos (sendo 4 GW e os demais RF) é percorrida de baixo para cima por 4 nós móveis que, igualmente aos nós fixos, operam com 23 dBm EIRP, seguindo a temporização ilustrada na Figura 52(b). Cada nó móvel troca mensagens com um dos GW à taxa de pacotes de 415 kbps.



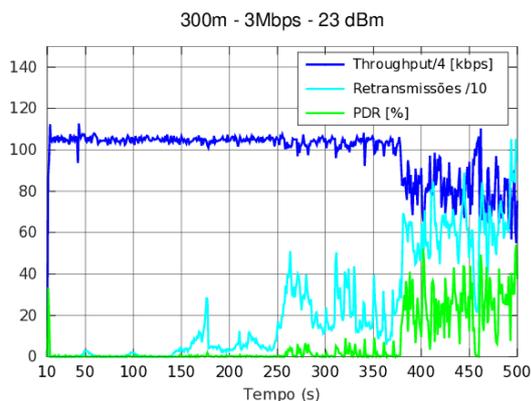
Fonte: Autoria própria.

Analisando o gráfico da Figura 53(a), observa-se que a rede representada pela Figura 52(a) apresentou acentuada degradação de desempenho no instante aproximado de 380 s, que se destaca pelo aumento na instabilidade da rota denunciada pela elevada alternância no número de saltos dos pacotes, conforme ilustrado no gráfico da Figura 53(b). Neste instante o nó móvel estava a 2 saltos do GW e pode contar com a cooperação de um RF para alcançar o nó móvel, conforme se extrai da Figura 52(b), associada com o gráfico da Figura 53(b).

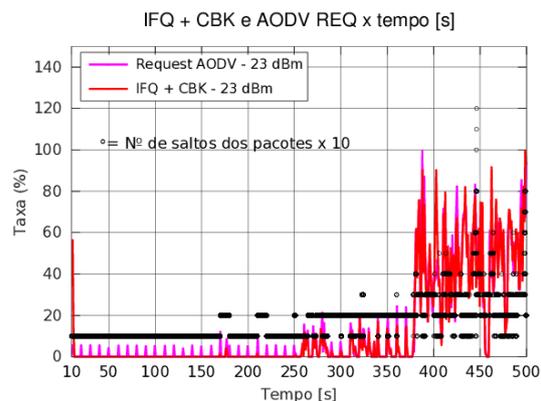
A explicação para o desempenho obtido está na combinação entre o protocolo de roteamento e o modelo de canal escolhido. Quando das requisições de rota, o AODV

Figura 53: Rede em grade com 16 nós a 300 m - desempenho.

(a) Throughput, retransmissões e PDR versus tempo



(b) Contribuições para a PDR e saltos versus tempo

**Fonte: Autoria própria.**

monta as tabelas com base nos primeiros retornos obtidos dos outros nós da rede, que não necessariamente corresponde à melhor rota. Apesar de empregado o proxy, há realizações de canal que permitem aos GW encontrar os nós móveis por rotas que passam por enlaces cujas linhas de visada apresentam ângulo de abertura significativa em relação à direção às vias, até mesmo na bissetriz do ângulo entre elas, porém nestas direções o canal apresenta-se fortemente degradado.

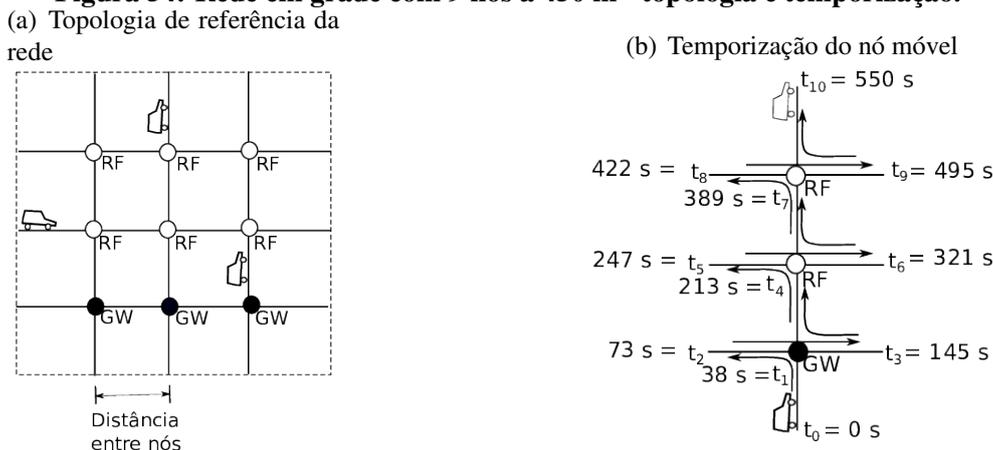
Quanto mais rotas possíveis entre o GW e o nó móvel, o que ocorre à medida que o nó avança para cima, maior a probabilidade da existência destas rotas degradadas na tabela. A cada salto adicional há um acréscimo na degradação do desempenho da rede, que é maior em canais mais degradados, como ocorre em linhas de visada com ângulos muito abertos entre as vias.

Além do exposto acima, soma-se a velocidade de deslocamento dos nós móveis, isto torna a configuração da rede obsoleta em um tempo relativamente curto, como resultado ocorre a degradação da cobertura que poderia ser obtida pela rede com topologia linear.

Rede com 9 nós fixos separados a 450 m operando a 23 dBm EIRP: Com o objetivo de avaliar o comportamento para uma configuração com *outage* mais elevada, foi realizada simulação de rede na configuração ilustrada pela Figura 54(a) composta de 9 nós fixos (sendo 3 GW e 6 RF) e percorrida de baixo para cima por 3 nós móveis, todos os nós operando com 23 dBm EIRP, e da mesma forma que na situação anterior, cada nó móvel trocando mensagens com um dos GW.

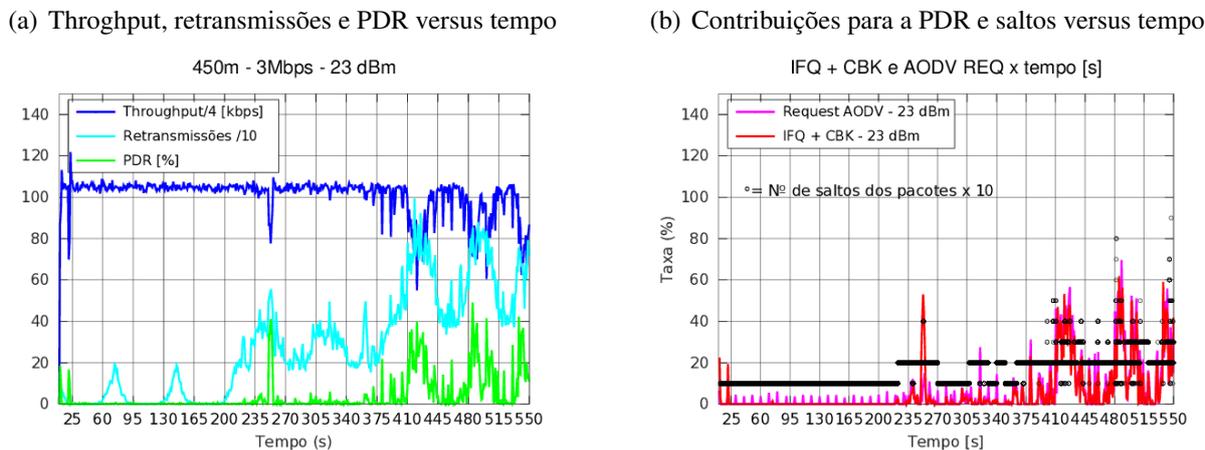
A rede ilustrada na Figura 54(a) apresenta um desempenho estável até o instante 410 s, conforme ilustrado no gráfico da Figura 55(a). Com base na temporização na Figura 54(b) e no

Figura 54: Rede em grade com 9 nós a 450 m - topologia e temporização.



Fonte: Autoria própria.

Figura 55: Rede em grade com 9 nós a 450 m - desempenho.



Fonte: Autoria própria.

gráfico da Figura 55(b) verifica-se que isto corresponde a 2 saltos, resultando na colaboração de um RF para a extensão da cobertura do GW.

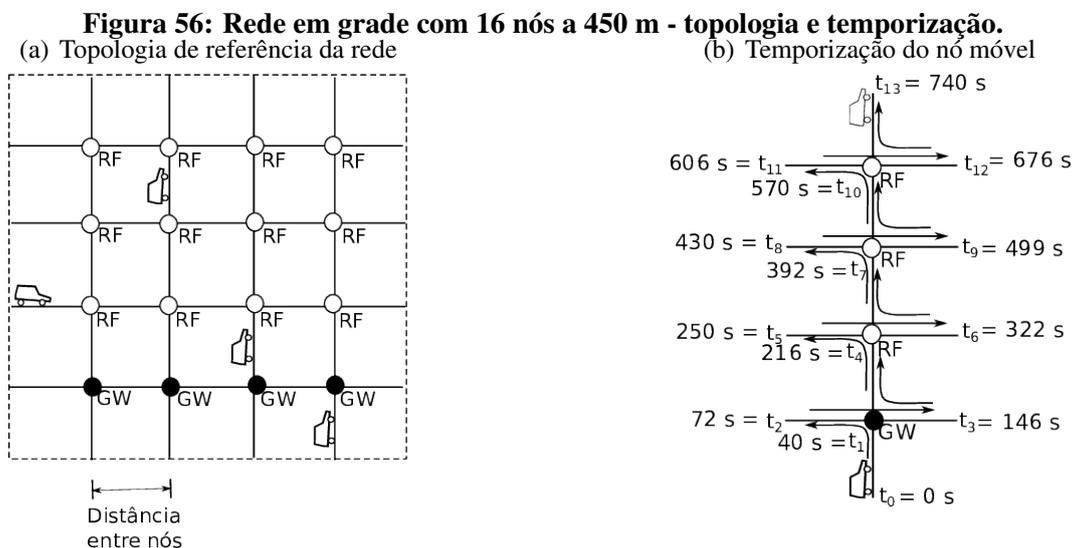
Da mesma forma que na configuração anterior, a instabilidade surge devido à degradação do canal que ocorre quando o nó móvel se desloca na direção transversal em relação à via vertical ao GW. Isto ocorre devido ao *proxy*, que causa degradação do canal, e esta dispara a busca por novas rotas. O número maior de possíveis rotas entre o GW e o nó móvel permite o surgimento de tabelas de rotas que passam por enlaces cujas linhas de visada estão altamente degradadas.

Isto leva a rede com nós fixos separados a 450 m nesta distribuição em grade a apresentar um desempenho inferior àquele verificado para redes lineares com a mesma separação entre os nós fixos, visto na seção anterior.

Rede com 16 nós fixos separados a 450 m operando a 33 dBm EIRP: Para que pudessem ser realizadas avaliações no desempenho da rede para configurações com potência mais elevada, 33 dBm EIRP, foi elaborada simulação considerando uma rede de 16 nós fixos, onde 4 são GW e os demais RF, ilustrada na Figura 56(a).

Esta rede é percorrida por 4 nós móveis, um para cada GW, que percorre a rede ao longo da via no alinhamento vertical com cada GW seguindo um movimento alternado, conforme descreve a Figura 56(b). Todos os nós, fixos e móveis operam a 33 dBm EIRP.

O objetivo é avaliar o ganho de cobertura decorrente da operação em uma potência maior e o comportamento do protocolo de roteamento em conjunto com o modelo de propagação neste cenário.



Fonte: Autoria própria.

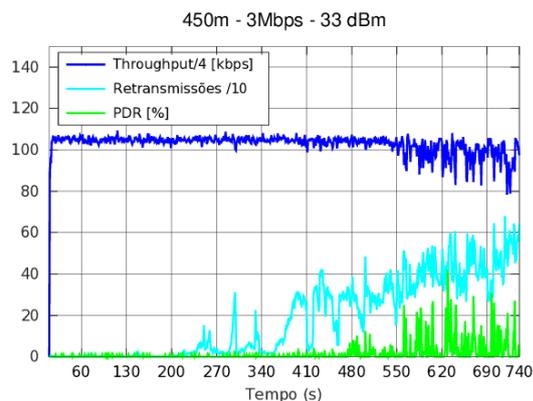
A rede com a configuração indicada na Figura 56(a) apresentou desempenho estável até o instante 550 s, conforme ilustra o gráfico na Figura 57(a). Como os nós apresentam maior cobertura devido à potência mais elevada, observa-se alguma perturbação no trecho final dos deslocamentos. Porém o comportamento da rede se mostra semelhante às configurações em grade anteriores, apresentando estabilidade até 2 saltos, contando com 1 RF para a extensão da cobertura, conforme se extrai da análise dos dados, representada pela Figura 56(b) em conjunto com o gráfico da Figura 57(b).

A natureza da perturbação é a mesma já comentada anteriormente, pois ao se deslocar transversalmente, o nó móvel entra na região onde o *proxy* está atuando com relação ao nó com quem troca mensagens, causando perda de pacotes e instabilidade no protocolo de roteamento.

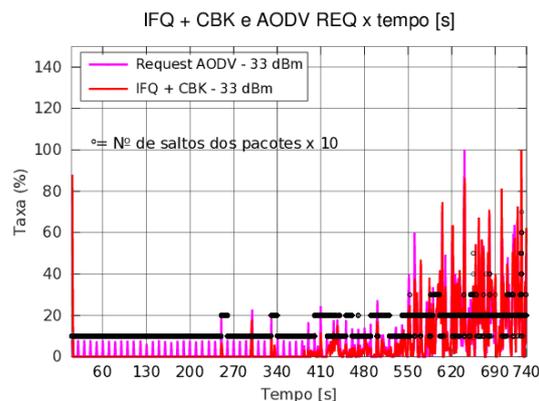
À medida que o nó móvel se distancia do GW mais possibilidades de rotas surgem

Figura 57: Rede em grade com 16 nós a 450 m - desempenho.

(a) Throughput, retransmissões e PDR versus tempo



(b) Contribuições para a PDR e saltos versus tempo

**Fonte: Autoria própria.**

durante as requisições, algumas vezes estas rotas estão associadas a enlaces cujas linhas de visada formam ângulos abertos com o eixo das vias, região onde o canal está mais degradado devido ao proxy. Estas rotas sobre canais mais instáveis e são a causa da degradação do desempenho da rede.

Portanto, o desempenho do protocolo de roteamento contribui para a degradação da rede no trecho final do deslocamento dos nós móveis devido à combinação da seletividade do *proxy* com a comportamento do canal de propagação do sinal.

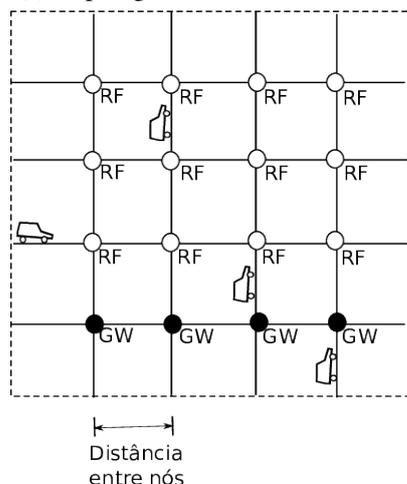
O aumento da potência levou a um acréscimo na cobertura da rede em grade com nós separados a 450 m, todavia o comportamento da rede se mostrou idêntico aos casos de potência menor. A potência maior torna menos críticos os enlaces em que as linhas de visada possuem ângulos de maior abertura com as vias, levando a menos *outages* que a mesma rede operando com potência menor.

Rede com 16 nós fixos separados a 600 m operando a 33 dBm EIRP: A rede ilustrada na Figura 58(a) possui a mesma topologia que a anterior, mas a distância entre os nós foi aumentada para 600 m, e foi concebida com o objetivo de avaliar o comportamento da rede anterior frente a um canal mais desfavorável.

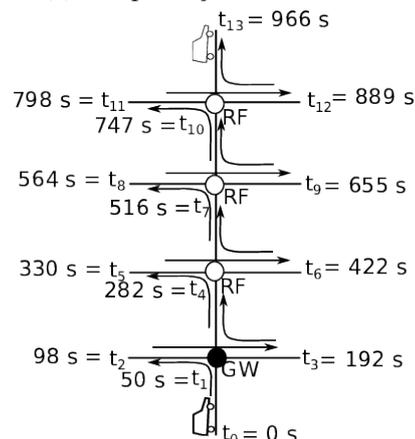
De forma idêntica à anterior, a rede fixa em grade é composta de 16 nós distribuídos regularmente em 4 colunas por 4 linhas. Uma das linhas, a primeira, é composta de GW, o que permite em cada coluna haver um GW e três RF. A cada GW está associado um nó móvel que se desloca em um movimento alternado ao longo da via vertical enquanto troca mensagens com ele. Todos os nós operam a 33 dBm EIRP. A Figura 58(b) ilustra a temporização do movimento dos nós móveis entre os GW e os diversos RF.

Figura 58: Rede em grade com 16 nós a 600 m - topologia e temporização.

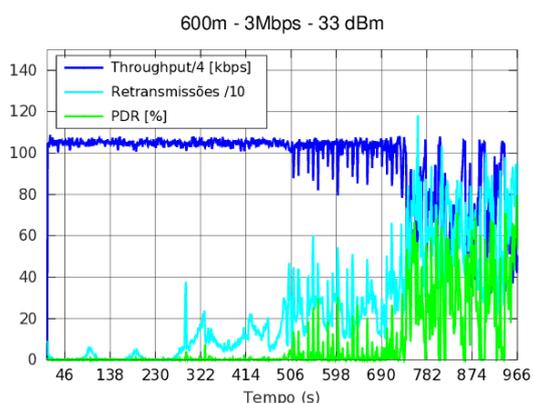
(a) Topologia de referência da rede.



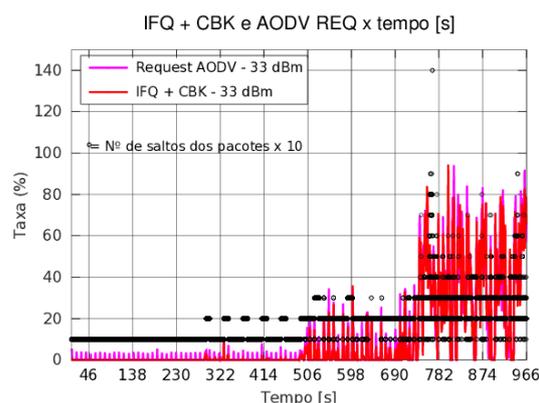
(b) Temporização do nó móvel.

**Fonte: Autoria própria.****Figura 59: Rede em grade com 16 nós a 600 m - desempenho.**

(a) Throughput, retransmissões e PDR versus tempo



(b) Contribuições para a PDR e saltos versus tempo

**Fonte: Autoria própria.**

Conforme é possível extrair do gráfico na Figura 59(a), a rede apresentou-se estável até o instante 506 s, com dois trechos degradados, um entre 506 s e aproximadamente 730 s, e outro mais grave a partir de 730 s até o fim do trajeto em 966 s. A degradação no desempenho da rede está associada a instabilidade das rotas, conforme se verifica nos dados representados no gráfico da Figura 59(b).

O motivo da degradação nesta rede com nós mais espaçados deve-se principalmente à ocorrência sistemática de rotas que passam por enlaces em linha de visada com ângulos abertos em relação ao eixo da via, até mesmo na direção das bissetrizes dos ângulos entre as vias, devido às circunstâncias já discutidas anteriormente.

2.3.3.1 CONCLUSÃO SOBRE TOPOLOGIA DE REDES EM GRADE

Foi empregado um elemento denominado *proxy* sobre o modelo de propagação, de forma a prover aos nós seletividade espacial de ganho de forma a simular os blocos de edificações urbanos. As configurações das redes foram escolhidas com base nos resultados da configuração linear, de maneira a haver um resultado de referência para fins de comparação. Por este motivo o espaçamento entre os nós utilizados foram 300, 450 e 600 m.

O resultado apresentado por esta simulação destacou a influência que a combinação resultante do comportamento do canal devido ao modelo de propagação com o protocolo de roteamento teve no desempenho. À medida que os nós avançavam pela rede, para mais longe dos GW, mais nós fixos ficaram entre os nós móveis e seus GW, e isto contribuiu para o surgimento de rotas menos ótimas. Estas rotas passavam por enlaces com linhas de visada em ângulos abertos em relação às vias, as vezes em direção à bissetriz do ângulo entre elas, onde o ganho é mínimo (43 dB abaixo dos eixos principais). O surgimento destas rotas deveu-se ao modelo de propagação e ao protocolo de roteamento utilizados.

Também verificou-se a existência de rotas pelos nós laterais que se formaram à medida que o NM se deslocou na direção transversal. Neste caso, as condições do canal nos enlaces ao longo da rota dos pacotes fazem elevar a taxa de descarte. Estas rotas que surgem em linhas de visada transversais são a causa de elevada frequência de quebra.

Quando comparadas com o modelo de rede linear, o número de nós RF cooperando com os GW nas redes em grade é inferior. Assim, uma rede linear com nós separados a 300 m e potência de baixo alcance demonstrou poder operar com quatro saltos, todavia devido à bidimensionalidade da rede em grade e o perfil de movimento dos nós móveis, o desempenho da rede ficou limitado a três saltos. O mesmo se verificou para as demais configurações. Assim pode-se resumir as limitações de cada seção de rede em grade bidimensional conforme:

- **Redes com nós separados a 300 m operando com 23 dBm EIRP:** É possível que o móvel seja coberto com a linha dos GW no eixo horizontal e duas linhas horizontais de cada lado dele com nós RF atuando cooperativamente para incremento da cobertura, duas acima e duas abaixo;
- **Redes com nós separados a 450 m operando com 23 dBm EIRP:** A linha horizontal de GW pode contar uma linha horizontal de RF em cada lado, acima e abaixo, cooperando para o aumento da cobertura.
- **Redes com nós separados a 450 m operando com 33 dBm EIRP:** Esta mesma rede operando com potência de médio alcance poderia operar com uma linha horizontal de GW

e duas linhas horizontais de RF acima e duas abaixo dos GW atuando cooperativamente;

- **Redes com nós separados a 600 m operando com 33 dBm EIRP:** O emprego desta configuração permitiria o emprego de uma linha horizontal de GW cuja cobertura pode ser estendida pelo emprego de uma linha de RF acima e outra abaixo.

2.3.4 CONCLUSÃO SOBRE OS MODELOS DE REDES CONECTADAS ESTUDADAS

Nas seções anteriores foram estudadas redes conectadas, que se caracterizaram por assegurar aos nós móveis que circulam por elas conexão permanente com o GW em qualquer ponto do espaço coberto.

O modelo de propagação foi responsável pelo comportamento inconstante do canal, que gerou a instabilidade no protocolo de roteamento pelas sucessivas quebras de rotas. As *outages* devido ao comportamento do canal foram responsáveis pelas retransmissões, o que contribuiu para a ocupação do canal e redução do desempenho da rede.

Na configuração em linha verificou-se elevada PDR no início e no fim do trajeto do nó móvel. Esta taxa elevada de descartes deveu-se ao *buffer* da camada de enlace de determinados nós estar cheio. O acúmulo de pacotes deveu-se à ocupação do canal ocorrida por conta das sucessivas retransmissões da camada de enlace (802.11) por causa das *outages* acumuladas nos saltos ao longo da rede somadas às sucessivas repetições dos pacotes pelos nós ao longo da rede.

Outro fenômeno observado nas redes em linha foi que a PDR elevada no início e no fim do trajeto do nó móvel gerou quebras de rota, o que por sua vez motivou o disparo de requisições de rota pelo protocolo de roteamento, ocupando mais ainda o canal, causando um efeito cascata que acentuou a degradação do desempenho da rede naqueles trechos.

As redes em linha apresentam apenas uma dimensão, quando foram analisadas as redes em grade que são mais complexas devido a bidimensionalidade, surgiram novos comportamentos da rede que contribuiriam para redução do desempenho.

O movimento transversal dos nós móveis, em relação à via vertical do GW promoveu o surgimento de rotas em enlaces com linhas de visada inclinadas em relação às vias. Estas rotas se formam sobre canais muito instáveis devido ao emprego do *proxy*, que eleva a *outage*, motivo do desempenho inferior para um mesmo número de saltos que aquele verificado nas redes em linha.

2.3.5 QUARTA ETAPA - REDES DISRUPTIVAS

Se for considerada a mesma parametrização dos nós fixos, conforme mostrado nas seções anteriores, a distância entre os nós e as condições de propagação do canal podem tornar a rede disruptiva. Um desafio em redes disruptivas é assegurar o encaminhamento das mensagens de serviços que admitem longos tempos de atraso. Nesta seção são avaliadas duas melhorias aplicadas na rede visando aumentar o desempenho no encaminhamento das mensagens em redes veiculares com mesma topologia física.

Para a execução da simulação do desempenho de redes tolerantes a interrupção, foi considerada uma topologia genérica envolvendo e nós fixos atuando como RF e GW, bem como veículos executando trajetos com cronograma (*schedule*) definido.

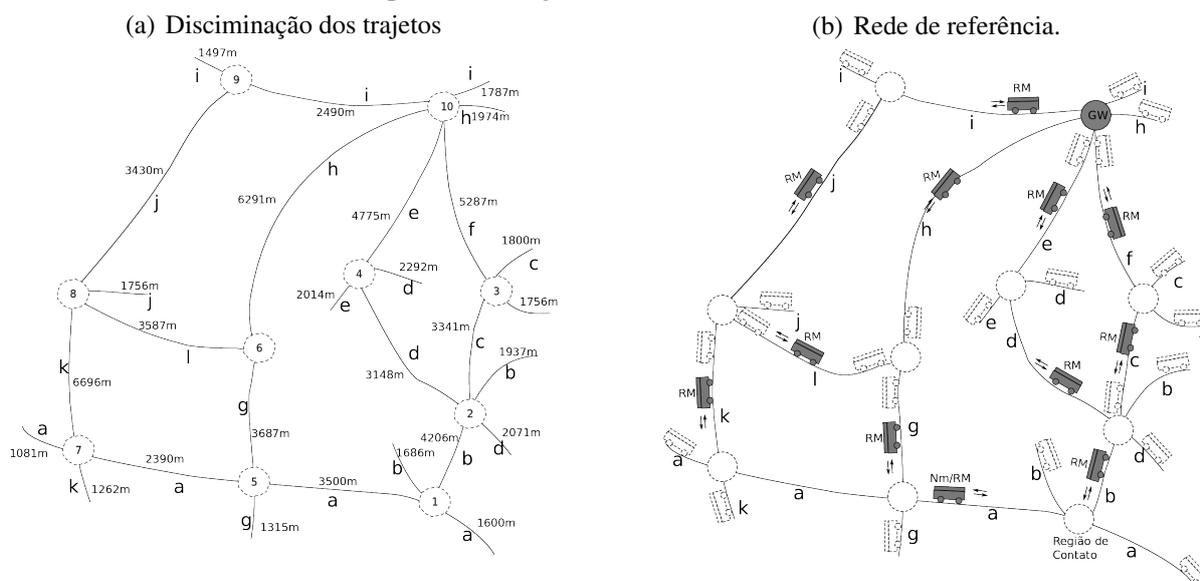
Foi concebida uma rede viária, e nela distribuídos veículos e nós fixos nos pontos de cruzamento dos trajetos. A rede viária concebida é um modelo teórico, onde não foram consideradas paradas intermediárias e nem métodos de controle de tráfego e velocidade. Os veículos desta rede faziam movimentos de ida e volta ao longo de um trajeto determinado.

Por meio do SUMO foram elaboradas simulações de movimento dos nós, de onde foram obtidos arquivos trace utilizados no NS-2. Por meio do trace gerado pelo SUMO foi obtido um modelo de movimento para os nós móveis com velocidade média de 50 km/h, aceleração de 2 m/s^2 e desaceleração de 4 m/s^2 .

Rede de referência: Na rede de referência, ilustrada na Figura 60(a), os nós móveis circulam ao longo dos seus trajetos com uma temporização (“temporização” refere-se ao tempo necessário para que um nó faça seu percurso completo e “cronograma” refere-se ao tempo decorrido na passagem de dois nós sucessivos de um mesmo trajeto) atribuída a cada rota.

A rede de referência não apresenta qualquer melhoria visando maximizar a taxa de troca de mensagens entre os nós, com isso, a troca de *bundles* está sujeita ao cruzamento oportunista dos nós móveis que estejam sob cobertura recíproca. Os nós móveis deslocam em movimento pendular temporizados dentro de seu trajeto, com cronograma definido. Neste modelo, a temporização de cada nó de determinado trajeto ocorre independentemente em relação à dos nós móveis de outros trajetos.

A Tabela 13 descreve o número de nós por trajeto, o número de trajetos na rede e o cronograma (*scheduling*) dos veículos e para a sua elaboração foi o tomado como base o comprimento do trajeto mais curto onde foram aplicados dois nós móveis. A razão entre o comprimento mais curto e o número de nós móveis que circulam por ele deu o cronograma de base.

Figura 60: Trajetos e rede de referência.

Fonte: Autoria própria.

A partir deste cronograma de base, foram dimensionados os veículos necessários nos demais trajetos, buscando manter o cronograma o mais uniforme possível em todos os trajetos.

Tabela 13: Tabela das rotas e cronogramas da rede ilustrada na Figura 60(a).

Trajeto	Nº de Veículos	Cronograma (s)
a	4	306,76
b	3	373,59
c	2	368,45
d	3	359,07
e	3	324,84
f	3	336,20
g	2	358,58
h	3	386,15
i	3	284,84
j	2	371,78
k	3	379,94
l	3	267,54

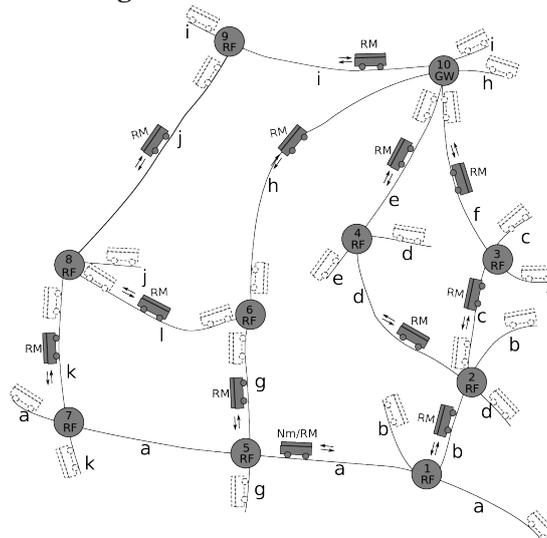
Fonte: Autoria própria.

O conceito explorado com a rede de referência é o impacto causado pela cobertura na troca de mensagens entre os nós. Menor cobertura implica em menor tempo e número de contatos. Pretendeu-se avaliar o impacto causado ao se restringir o tempo para nós trocarmos as mensagens, considerando que uma cobertura menor implica em menos ocorrências de contatos e, quando ocorrem, possuem menor tempo de duração.

Nós fixos: Esta rede foi obtida a partir da rede de referência, acrescentando nós fixos que

atuam como RF nos pontos onde os trajetos se cruzam, ilustrado pela Figura 61. A temporização dos nós móveis é a mesma que a de referência. O nós fixos implantados nos pontos onde os trajetos se cruzam tem a função de receber, armazenar e encaminhar os *bundles* quando da passagem dos nós móveis. O objetivo da instalação dos nós fixos é auxiliar o encaminhamento das mensagens ao longo da rede rumo ao destinatário, de forma a cobrir a falta de sincronismo entre os nós móveis que fazem o percurso por trajetos diferentes.

Figura 61: Rede com nós fixos.



Fonte: Autoria própria.

O conceito explorado com os nós fixos é o ganho de desempenho oferecido pela rede por meio de estações fixas de apoio na transferência das mensagens, o que é possível por diversas linhas urbanas compartilharem pontos de ônibus, terminais e cruzamento de trajetos em locais determinados. Nestas zonas em comum, é possível a alocação de estações que possam atuar como RF, propiciando a troca de *bundles* entre os diversos nós móveis com o apoio destes nós fixos. Pretende-se avaliar o ganho que a alocação de nós fixos trariam sobre a rede de referência nas duas coberturas.

A diferença entre a rede de referência e a rede com nós fixos é a presença dos nós que atuam como *relays* fixos.

Pontos de espera: A rede com pontos de espera consiste em tomar a rede de referência e criar pontos de espera para os nós móveis, próximo aos pontos de cruzamento dos trajetos, de forma que a rede passe a operar com um cronograma (*scheduling*) idêntico para os nós de diferentes trajetos, referenciado em cada um dos pontos de cruzamento. Desta forma, durante um determinado intervalo de tempo um nó de cada trajeto estaciona próximo ao cruzamento de maneira a aumentar a probabilidade de sucesso na troca de mensagens entre eles. Os tempos de

espera estão listados na Tabela 14.

Tabela 14: Tabela de espera acrescida à rede de referência.

Trajeto	Intersecção com o trajeto					
	$T_{e_{ida}}/T_{e_{volta}}$ (s)					
a	b 10/104,47		g 20/20		k 20/100,47	
b	a 11,8/0		c 12,3/0		d 12,3/0	
c	b 13/13		d 13/13		f 13/13	
d	b 20/0		c 20/0		e 16/10,39	
e	GW 10/0	d 74,8/80,8	f 10/0	h 10/0	i 10/0	
f	GW 10,61/0	c 70/53	e 10,61/0	h 10,61/0	i 10,61/0	
g	a 20/21		h 28/0		l 28/0	
h	g 15/0	l 15/0	GW 3/0	e 3/0	f 3/0	i 3/0
i	GW 10/0	j 270/0	h 10/0	e 10/0	f 10/0	
j	e 10/0		k 10/0		i 10/0	
k	a 30/0		l 5/0		j 5/0	
l	h 132/0		g 132/0		k 132/0	

Fonte: Autoria própria.

O objetivo é criar pontos de sincronismo ao longo da rede. Neste trabalho, a sincronização dos nós foi realizada a partir do *gateway* em direção à rede mais remota, com quem ele estava trocando as mensagens nestas simulações. Foram acrescidos tempos de parada dos nós móveis nos pontos de cruzamento (pontos de espera), a partir do trajeto de temporização mais longa, que corresponde ao trajeto “h”, ao qual foi acrescido 3 s de espera no lado do *gateway* e 15 s de espera no cruzamento com os trajetos “l” e “g”. Aos demais trajetos foram acrescidos tempos de espera encadeada a partir do trajeto “h”, de forma que toda a rede apresentou cronograma de aproximadamente 390 s.

A Tabela 14 foi criada com base na rede de referência, à qual foram acrescidos tempos de espera no trajeto de ida, $T_{e_{ida}}$, e tempos de espera no trajeto de volta, $T_{e_{volta}}$, nos pontos de cruzamento dos trajetos. A rede com pontos de espera foi derivada da rede de referência com o objetivo de manter as semelhanças e permitir a comparação dos resultados, por isso não

foram feitos outros tipos de melhorias, que poderiam levar a redimensionamento do número de veículos por trajeto e sua temporização.

A rede com pontos de espera teve como meta a exploração do conceito de sincronismo em grupos de trajetos da rede de transporte público e avaliar o ganho que a melhorias da temporização dos trajetos traz no desempenho de uma rede disruptiva, dado o aumento nas ocorrências de contatos oportunistas.

O sincronismo pode ser obtido fazendo com que os nós móveis de determinados trajetos, ou linhas, apresentem cronogramas semelhantes na passagem pelos pontos de cruzamento dos trajetos comum a eles. Estes ajustes podem ser feitos por meio da inclusão de tempos de espera nestes pontos.

2.3.5.1 CONFIGURAÇÃO DA REDE E DO SIMULADOR

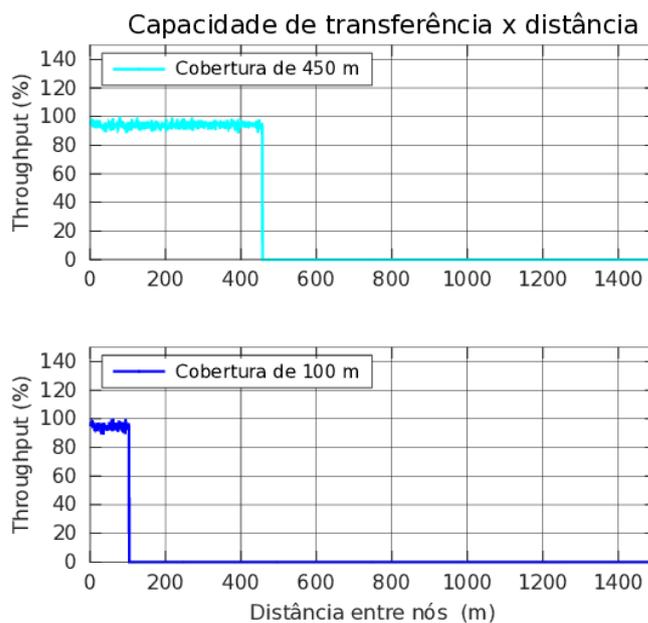
Para a simulação foi utilizado um pacote do NS-2 utilizado no trabalho (LAKKAKORPI et al., 2010), onde os autores estudaram o uso de um protocolo adaptativo para redes DTN. Este pacote também é compatível com redes Ad Hoc veiculares. O simulador utilizou a biblioteca `dei80211mr`, que permite a simulação de uma rede com o padrão 802.11n para múltiplas taxas. O modelo do canal de propagação empregado foi o espaço livre.

O motivo desta parametrização é que o foco desta seção não é a análise da conectividade e o impacto do canal na mesma, mas do comportamento de três modelos de rede disruptivas e as contribuições do tempo de contato.

A potência do transmissor foi ajustada em dois valores, um para prover uma cobertura de 450 m de raio e outra para prover uma cobertura de 100 m de raio, conforme ilustrado nos gráficos da Figura 62. O objetivo do trabalho com duas coberturas é avaliar o impacto que a cobertura apresenta nos “*tempos de contato*” e nas “*oportunidades de contato*” entre os nós. O objetivo também é avaliar o comportamento dos *delays* sofridos pelos *bundles* devido à cobertura.

Para a elaboração da simulação, foi concebida uma rede veicular de referência no SUMO. A rede concebida é teórica, mas tem como objetivo retratar algumas componentes típicas utilizadas na rede de transporte coletivo, como cronograma regular na passagem dos nós móveis por determinados pontos, trajeto determinado e pontos de cruzamento, ou encontro, dos diferentes trajetos.

A seguir, foram incluídos no SUMO nós fixos (estáticos) nos pontos de cruzamento dos diversos trajetos, enquanto os nós móveis circularam conforme cronograma concebido na

Figura 62: Capacidade versus distância.

Fonte: Autoria própria.

rede de referência.

Por fim, o cronograma dos nós móveis foi alterado por meio do acréscimo dos pontos de espera nos cruzamentos dos trajetos no SUMO, em alguns deles foram inseridos apenas em um sentido e em outros em ambos.

Por meio da ferramenta TraceExporter do SUMO foram criados traces de mobilidade a partir de cada configuração de movimento. Estes traces de movimento foram empregados no NS2 com o objetivo de simular as redes.

O cenário de mobilidade foi elaborado em um modelo onde os nós se deslocam ao longo dos trajetos nominados com as letras de “a” a “l”. Nestes trajetos foram disparados veículos circulando com velocidade máxima de aproximadamente 16,667 m/s (~60 km/h) e espaçados entre si de forma a permitir um cronograma mais próximo possível entre todos os nós móveis da rede.

O protocolo DTN utilizado nesta simulação foi o Epidêmico, um protocolo de roteamento ingênuo. Foi habilitado no simulador um recurso desenvolvido em (HAAS; SMALL, 2006), denominado "VACCINE", que promove nos nós a exclusão daqueles *bundles* ainda armazenados ao longo da rede quando o destinatário já tiver sido encontrado e rejeitem novas cópias após o *bundle* ter sido recebido, agindo como um anti-pacote.

O objetivo em usar o protocolo Epidêmico numa sequência de transmissão de um

bundle a cada 300 s, é caracterizar o envelope de *delay* para cada um dos modelos de rede analisados e permitir a avaliação da efetividade das melhorias na rede. Não foi habilitado o controle de congestionamento, a transferência de custódia e nem o descarte do *bundle* que tenha sido transferido.

O tempo de vida dos *bundles* foi ajustado para 3000 s. Se após transcorrido este tempo ele não tiver sido entregue ao destinatário, ele é descartado. Nesta simulação não foram requisitadas transferência de custódia, cada *bundle* foi ajustado para 10 mil *bytes* e o tamanho do *buffer* para o *bundle* foi ajustado para 100 milhões de *bytes* (capacidade para 10 mil *bundles*).

Estes *bundles* foram gerados em um dos nós do trajeto “a” e destinado ao GW, em um total de 10 *bundles* por execução. Estes 10 *bundles* se propagaram ao longo da rede e chegaram ao GW em diferentes instantes, entregues pelos diversos nós que os encaminharam. Se não houver descarte, é esperada a recepção de 40 *bundles*, uma vez que a análise desta seção é feita sobre o total agregado das quatro execuções (e não a média como nos casos de redes conectadas), 10 *bundles* de cada execução.

Foi realizada também avaliação de saturação da rede, para tanto o mesmo cenário foi considerado, porém foi habilitado um fator de espalhamento inicial de 16, o que causou a multiplicação dos *bundles* ao longo da rede.

2.3.5.2 RESULTADOS E CONCLUSÕES

Executadas as simulações, observou-se que as redes apresentaram desempenhos diferentes. Os gráficos da Figura 63 mostram os resultados obtidos do trace para nós com cobertura de 100 m.

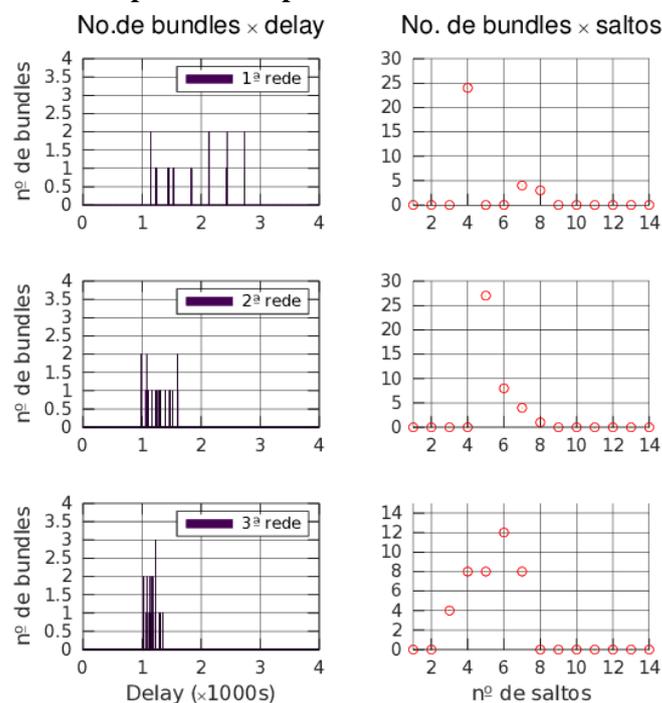
Tabela 15: Tabela-resumo dos gráficos da Figura 63.

rede	<i>Bundles</i> entregues	Média do <i>delay</i> (s)	Média dos saltos
1 ^a (referência)	31	1834,07	4,7772
2 ^a (<i>relays</i> fixos)	40	1265,18	5,475
3 ^a (pontos de espera)	40	1169,80	5,3

Fonte: Autoria própria.

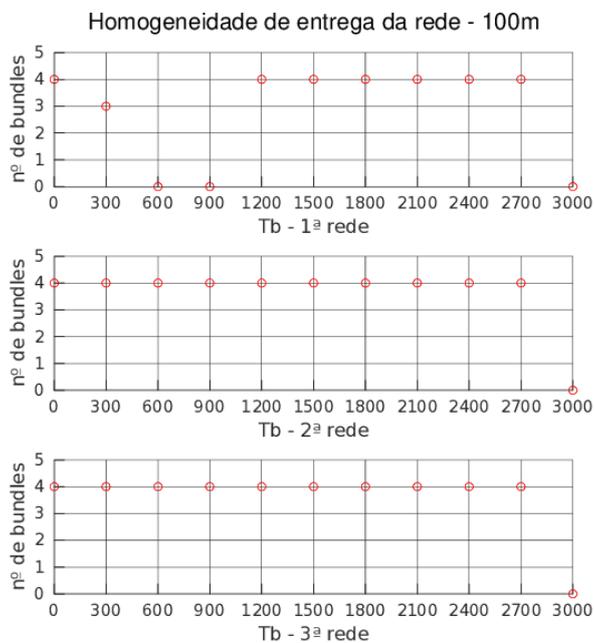
A análise do trace da rede com menor cobertura demonstrou que as melhorias aplicadas à rede de referência foram efetivas, conforme ilustram os gráficos da Figura 63. O *delay* dos *bundles* na rede de referência apresentam-se mais espalhados que aqueles nas redes com melhorias. Ao acrescentar nós fixos, verificou-se também o incremento no número de saltos dos *bundles*.

Figura 63: Histograma dos *delays* dos *bundles*, cobertura de 100 m. 1ª rede = referência, 2ª rede = com *relays* fixos, 3ª rede = com pontos de espera.



Fonte: Autoria própria.

Figura 64: Distribuição do desempenho individual por *bundle* das simulações realizadas nas redes propostas. 1ª rede = referência, 2ª rede = com *relays* fixos, 3ª rede = com pontos de espera. Cobertura de 100 m.



Fonte: Autoria própria.

Outra informação adicional relevante se extrai da Tabela 15, onde é possível observar que a rede de referência não entregou todos os *bundles* gerados, portanto seu *throughput* (número de pacotes entregues ao longo de determinado intervalo de tempo) é menor que as demais. Com relação ao *delay*, observa-se que a aplicação de “pontos de espera” foi aquela com melhor desempenho, resultando em menor média do *delay*.

O gráfico da Figura 64 mostra quais trechos da rede apresentam maior perda. No caso da rede de referência, das quatro simulações realizadas, o *bundle* gerado em 300 s não foi entregue em uma delas, enquanto que os *bundles* gerados em 600 e 900 s não foram entregues em nenhuma das simulações. A aplicação de melhorias na rede de referência contribuiu para incrementar o *throughput* da rede.

Sobre o menor *throughput* da rede de referência, isto ocorreu devido à limitação do tempo de vida dos *bundles*. O tempo de vida de uma mensagem (ajustado para 3000 s) em uma rede disruptiva está associado ao seu “tempo de vida útil” (*useful life* em (IETF RFC4838, 2007)), e a eliminação das mensagens obsoletas contribui para liberação de espaço de armazenamento na memória dos elementos da rede.

Os gráficos da Figura 65 mostram os resultados obtidos do trace para nós com cobertura de 450 m e tem como objetivo avaliar a contribuição que a cobertura oferecida pelos nós apresentam no desempenho da rede.

Analisando os traces, observa-se que a rede de referência apresenta maior variação e média no *delay* sofrido pelos *bundles*, conforme ilustrado nos gráficos das Figuras 63 e 65. As melhorias consideradas neste trabalho apresentaram acréscimo no desempenho, permitindo redução na média do *delay*.

A Tabela 16 mostra que a menor média de *delay* ocorre na melhoria por meio de nós fixos atuando como *relays*, com um desempenho pouco melhor que a melhoria com pontos de espera.

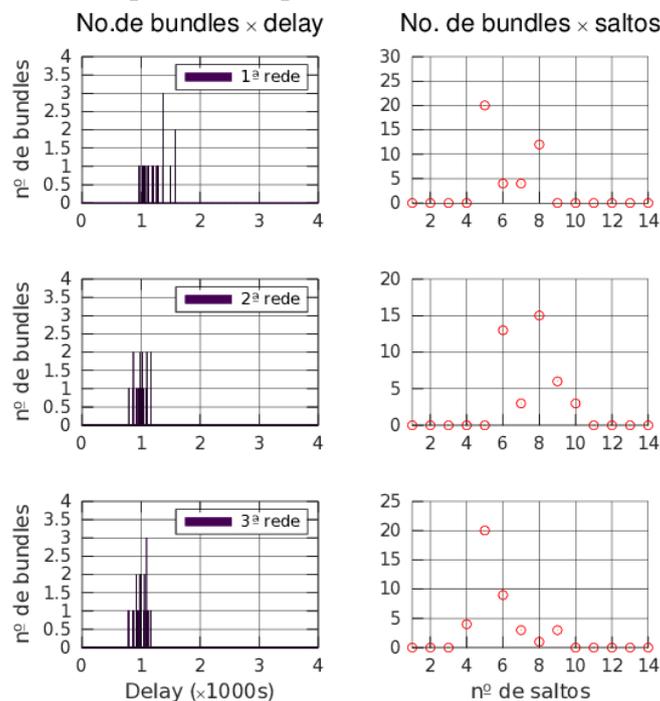
Tabela 16: Tabela-resumo dos gráficos da Figura 65.

Rede	Bundles entregues	Média do delay (s)	Média dos saltos
1ª (referência)	40	1238,13	6,2
2ª (<i>relays</i> fixos)	40	984,38	7,575
3ª (pontos de espera)	40	991,82	5,65

Fonte: Autoria própria.

Sobre a rede com cobertura maior, apesar dos três modelos de rede simulados terem diferentes mecanismos de contato entre os nós, que resultam no encanhamento dos *bundles* significativamente diferentes entre si, os resultados apresentaram diferenças para a média do

Figura 65: Histograma dos *delays* dos *bundles*, cobertura de 450 m. 1ª rede = referência, 2ª rede = com *relays* fixos, 3ª rede = com pontos de espera.



Fonte: Autoria própria.

delay não tão expressivas, conforme se verifica na Tabela 16 . Nele se observa que a média dos atrasos e volume de *bundles* entregues variam pouco entre os três modelos durante a simulação (6000 s).

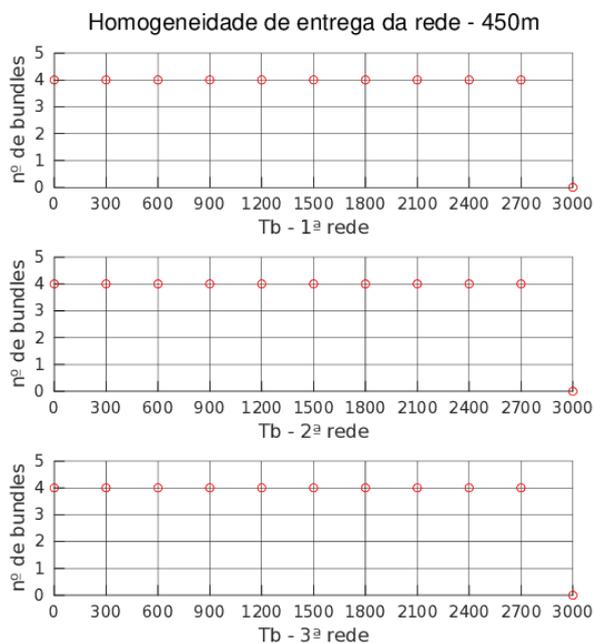
Analisando os gráficos da Figura 66 verifica-se que nas quatro simulações todos os *bundles* gerados foram todos entregues.

O desempenho apresentado por qualquer dos modelos das redes com cobertura maior foi superior ao daquelas com cobertura menor, tanto pelo sucesso na entrega dos *bundles*, no caso da rede de referência, como pelo tempo menor de *delay* em todos os casos.

O número médio de saltos para redes com nós de cobertura maior foi superior que aqueles verificados para redes com nós de cobertura menor, da mesma forma que redes com melhorias em relação à rede de referência no caso de cobertura menor. Isto se deve ao maior número de oportunidades de contado, o que levou a recepção de *bundles* transferidos entre um número maior de nós intermediários.

Observa-se que no caso de cobertura menor, o desempenho do modelo sem melhorias ficou sensivelmente inferior aos demais. As redes com melhorias apresentaram melhor desempenho, sendo marginalmente melhor aquela em que o cronograma dos nós foi

Figura 66: Distribuição do desempenho individual por *bundle* das simulações realizadas nas redes propostas. 1ª rede = referência, 2ª rede = com *relays* fixos, 3ª rede = com pontos de espera. Cobertura de 450 m.



Fonte: Autoria própria.

sincronizado A explicação do motivo pela qual a rede com RF teve redução de desempenho ligado à redução da cobertura é que o tempo de contato também foi reduzido, o que diminuiu o volume de *bundles* entregues com sucesso em cada um destes contatos.

Observa-se também do gráfico da Figura 66 que as redes do com melhorias apresentam uniformidade na quantidade dos *bundles* gerados e entregues em ambas as configurações de cobertura.

Comparando os gráficos das Figuras 64 e 66 verifica-se que no primeiro caso não houve entrega entregou nenhum dos *bundles* gerados em 600 e 900 s e perda de um dos *bundles* gerado no instante 300 s, ao passo que no segundo caso não houve perdas. Isto mostra que a rede com nós de menor cobertura e sem melhorias apresenta regiões propensas a perdas, na parametrização adotada.

Destaca-se, portanto, da análise destes modelos disruptivos teóricos:

- A cobertura impacta significativamente no desempenho da rede devido à limitação do tempo de contato nas redes de cobertura menor;
- Técnicas de melhorias da rede podem promover o aumento do desempenho e uniformizam regiões propensas a perdas de mensagens;
- Em redes com cobertura menor o ganho de desempenho conseguido com melhorias

- visando o aumento nas oportunidades de contato e tempo de contato foi mais significativo;
- O uso de RF nos pontos compartilhados por diferentes trajetos mostrou-se como uma solução para aumento no desempenho da rede disruptiva;

3 CONCLUSÃO

3.1 GERAL

Este trabalho foi desenvolvido com objetivo de estudar a viabilidade do emprego de SRC para aplicações em C-ITS e avaliar o seu desempenho em diferentes graus de conectividade de redes utilizando o padrão 802.11p, considerando a comunicação cooperativa da rede no objetivo de estender o alcance de determinado nó de acesso a outras redes.

Inicialmente foi avaliada a capacidade de reencaminhamento de pacotes entre o nó de origem e o destino em redes com topologia linear tendo os nós distâncias diferentes e uniformes de separação. A seguir, foi concebida uma rede com topologia em grade regular onde os nós apresentavam distâncias uniformes e diferentes, o objetivo desta rede é avaliar a estabilidade do protocolo de roteamento escolhido e o impacto que ele causa no desempenho da rede.

Na última etapa foram avaliados métodos para melhorias de desempenho de redes disruptivas sobre uma rede de referência, por meio da melhora na estatística de contatos oportunistas.

3.2 ANÁLISE DAS REDES CONECTADAS:

As análises dos resultados deste trabalho mostraram que o modelo de propagação impacta significativamente no desempenho da rede e do protocolo de roteamento, conforme demonstrado na seção 2.3.2. Naquela seção o modelo de propagação deste trabalho foi comparado com o modelo de “dois raios”, permitindo concluir que quando a rede opera em um canal melhor comportado, a cobertura é maior e o protocolo de roteamento se apresenta mais estável.

Resultado relevante é que o controle RTS/CTS pode não ser efetivo na melhora do desempenho de uma rede cujo canal apresenta forte comportamento estatístico, uma vez que o ganho obtido na redução das colisões dos pacotes de dados é perdido devido à maior ocupação do canal. Resultado totalmente antagônico foi obtido utilizando-se um canal comportado, como

o modelo de “dois raios”, onde observou-se efetividade na melhoria do desempenho da rede com uso deste mecanismo de controle de acesso ao meio.

O AODV foi empregado por ser um protocolo muito utilizado na literatura para comparações com novos protocolos, porém seu desempenho mostrou-se prejudicado em redes de maior mobilidade como VANET.

Há uma relação de compromisso nas redes fixas. Se os nós estão muito distantes, verifica-se redução no desempenho devido a *outage* do canal que provoca a perda de pacotes devido ao limite de *backoff* devido a ocupação elevada do canal pelas retransmissões. Se os nós estão muito próximos há uma ocupação maior do canal devido às repetições que contribui para saturação e eventuais colisões com as correspondentes perdas de pacotes.

Há uma redução no desempenho da rede quando considerado o modelo em grade comparada ao modelo linear com o mesmo espaçamento entre os nós. Para um determinado distanciamento entre os nós fixos, obteve-se um certo número de nós atuando cooperativamente (RF) na rede linear (em dada taxa de transmissão de pacotes). Este mesmo espaçamento entre nós fixos (e taxa de transmissão de pacotes) em uma rede em grade permitiu um número menor de nós cooperativos.

Na comparação entre o modelo linear e em grade, o responsável pelo desempenho relativo inferior desta última foi uma combinação do protocolo de roteamento com o *proxy* empregado. O nó móvel desenvolveu uma trajetória oscilando em torno da semi-reta formada pelos nós cooperativos e com isso o protocolo de roteamento escolheu algumas vezes rotas menos ótimas, que se quebravam com alta frequência, e a situação mostrou-se pior à medida que um maior número de possibilidades de rotas foram oferecidas entre os nós origem e destino da mensagem, o que ocorria à medida que um dos nós progredia ao longo da rede, para longe daquele com quem estava trocando as mensagens.

3.3 ANÁLISE DAS REDES DISRUPTIVAS:

Sobre uma rede de referência foram analisados dois métodos para melhoria de rede disruptivas. A concepção da rede de referência teve como base uma rede de transporte coletivo, em que os veículos cumprem um trajeto repetitivo com periodicidade determinada. Sobre a rede de referência foram acrescentados nós fixos nos pontos de cruzamento entre os trajetos, de maneira que houvesse um elemento atuando como uma espécie estática de “mula de dados”. Com base na rede de referência, outro método foi elaborado condicionando a temporização dos nós, de forma que os trajetos passaram a apresentar sincronismo nos pontos de cruzamento.

Estas melhorias foram feitas objetivando aumentar o número de contatos oportunistas. Observou-se que o tempo de contato, que está relacionado ao alcance dos nós, e o volume das mensagens impactou no desempenho das redes disruptivas analisadas. A capacidade da rede em transferir elevado volume de mensagens entre os nós também está associada ao tempo de contato.

A análise do desempenho demonstrou que quando há limitação maior do alcance, a rede sem melhorias é mais susceptível à queda no desempenho. As redes com melhorias apresentaram pouca diferença em seu desempenho com a mudança de alcance, e método que explora a sincronização do contato entre os nós por meio de pontos de espera mostrou-se o menos sensível à variação do alcance.

4 DESENVOLVIMENTO FUTURO:

4.1 TRABALHOS DECORRENTES

Foram discutidas as contribuições do comportamento do canal no desempenho da rede conectada. Será desenvolvida uma solução analítica para o desempenho da rede, considerando um canal com perdas em uma rede utilizando a pilha DSRC/WAVE com múltiplos saltos, a função de coordenação híbrida de acesso ao meio (HCF) e a contribuição no desempenho devido ao fenômeno de interferência de canal adjacente (ALMEIDA et al., 2016) (CAMPOLO et al., 2014) (CAMPOLO et al., 2016) (ZHAO et al., 2013).

Neste trabalho foi considerado o uso de um dispositivo com dois canais, um dedicado ao canal de serviço e outro ao canal de controle com uso de protocolos IPv6 e que as mensagens de segurança de trânsito seguem somente sobre o canal de controle. Como trabalho futuro, será considerado o impacto decorrente da operação no modo alternado, o uso de protocolos WSM para envio das mensagens de telemetria e a priorização do tráfego de mensagens de segurança.

O modelo de propagação utilizado baseou-se no múltiplos pontos de quebra e um ajuste mais refinado poderia ter sido feito utilizando modelos de pequena escala, como o Nakagami-m, ou ainda empregando uma solução baseada em geometria, como o GEMV². Como trabalho futuro, será implementado o suporte ao GEMV² sobre o NS-2 e realizadas análises específicas considerando os canais V2V, V2I e I2I.

Os autores do trabalho que serviu de base para a determinação dos parâmetros do modelo de propagação a ser utilizado empregaram dois veículos (V2V) (CHENG et al., 2007) e com antenas em um dos veículos a uma altura de 1,51 m, e no outro a 1,93 m. O impacto na propagação do sinal decorrente das diferenças entre o cenário utilizado no trabalho de referência citado e este, com relação aos enlaces V2V, V2I e I2I, diferenças nas alturas das antenas e disposição dos nós, será objeto de trabalho futuro.

Este trabalho se limitou a avaliar a conectividade oferecida pela rede dentro no âmbito de um dos canais. Ao se operar com dois canais, passa-se a contar com diversas sub-redes, algumas operando em um canal, outras operando em outro canal. Neste trabalho,

foi desconsiderado o impacto em uma sub-rede operando em determinado canal, pelas sub-redes vizinhas, operando em outro canal, e pelo canal de controle. Como trabalho futuro será realizado estudo complementar considerando a contribuição decorrente das sub-redes vizinhas operando em canal adjacente e do canal de controle, tendo em vista o exposto em (ZHAO et al., 2013), (ALMEIDA et al., 2016) e (CAMPOLO et al., 2016).

A configuração dos nós móveis e repetidores é um problema a ser resolvido. Como proposta de trabalho futuro está a análise de viabilidade do Mobile IP (IETF RFC6275, 2011) e de técnicas para autoconfiguração de redes móveis (VILLALBA et al., 2011) (SANDRA, 2012), incluindo o AHCP (*Ad-Hoc Configuration Protocol*).

O padrão IEEE802.11p está sendo revisto pelo 802.11bd (NAIK et al., 2019). Como trabalho futuro está avaliar o ganho de desempenho que o novo padrão traria para a este estudo.

REFERÊNCIAS

5GAA. *Making connected cars a reality with 5G (and LTE)*. Maio 2019.

ABDELGADER, A. M. S.; LENAN, W. The physical layer of the IEEE 802.11p WAVE communication standard: The specifications and challenges. In: **Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science 2014**. São Francisco, Estados Unidos: IEEE, 2014. v. 2, p. 691–698. ISSN 2078-0966.

AGRAWAL, P.; JOSHI, A.; PALARIA, R. Systematic review on routing protocols for vehicular ad hoc networks: A survey and future perspectives. **International Journal on Emerging Technologies**, v. 8, n. 1, p. 678–682, 2017. ISSN 2249-3255.

AGUIAR, L. F. U. **Contribution to the Design of VANET Routing Protocols for Realistic Urban Environments**. Tese (Doutorado) — Universitat Politècnica de Catalunya, Catalunya, Espanha, Fevereiro 2016.

AHMED, S.; ARIFFIN, S. H. S.; FISAL, N. Overview of wireless access in vehicular environment (WAVE) protocols and standards. **Indian Journal of Science and Technology**, v. 7, 07 2013. ISSN 0974-5645.

AKHTAR, N.; OZKASAP, O.; ERGEN, S. C. VANET topology characteristics under realistic mobility and channel models. In: **2013 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)**. Shangai, China: IEEE, 2013. p. 1774–1779. ISSN 1525-3511.

ALI, H. M. **Simulation and Analysis of Vehicular ad-hoc Networks in Urban and Rural Areas**. Dissertação de Mestrado — University of Vaasa, Vaasa, Finlândia, Dezembro 2013.

ALMEIDA, J. et al. Mitigating adjacent channel interference in vehicular communication systems. **Digital Communications and Networks**, v. 2, n. 2, p. 57 – 64, 2016. ISSN 2352-8648.

ALTMAN, E.; JIMENEZ, T. **NS Simulator for Beginners**. San Rafael, Estados Unidos: Morgan & Claypool Publishers, 2012. (Synthesis Lectures on Data Management Series). ISBN 9781608456925.

ALVES JUNIOR, J. **Estratégias para Aumentar a Conectividade e o Desempenho das VANETs: Infraestrutura Baseada no Transporte Coletivo e Protocolos**. Tese (Doutorado) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, Dezembro 2016.

ANGELES, W. et al. The impact of propagation models in the performance of ad hoc routing protocols for urban VANET. In: **2016 IEEE 84th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall)**. Montreal, Canada: IEEE, 2016. p. 1–5.

ARIB-STD-T75. **ARIB STD T75**. Setembro 2001.

ARIB-STD-T88. **ARIB STD T88**. Maio 2004.

BARRADI, M.; HAFID, A. S.; GALLARDO, J. R. Establishing strict priorities in IEEE 802.11p WAVE vehicular networks. In: **2010 IEEE Global Telecommunications Conference GLOBECOM 2010**. Flórida, Estados Unidos: IEEE, 2010. p. 1–6. ISSN 1930-529X.

BATTY, M. et al. Smart cities of the future. **The European Physical Journal Special Topics**, v. 214, n. 1, p. 481–518, Novembro 2012. ISSN 1951-6401. Disponível em: <<https://doi.org/10.1140/epjst/e2012-01703-3>>.

BENAMAR, M. et al. Study of VDTN routing protocols performances in sparse and dense traffic in the presence of relay nodes. **Journal of Mobile Multimedia**, v. 10, n. 1, p. 078–093, 2014. ISSN 1550-4646.

BERENS, F. et al. **Worldwide Standards and Regulation Landscape for Cooperative ITS Systems**. Maio 2015.

BOBAN, M.; BARROS, J.; TONGUZ, O. K. Geometry-based vehicle-to-vehicle channel modeling for large-scale simulation. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, v. 63, p. 4146–4164, Abril 2014. ISSN 1939-9359.

BOSSOM, R. et al. **D31 European ITS Communication Architecture**. Outubro 2008.

BOUK, S. H. et al. Hybrid adaptive beaconing in vehicular ad hoc networks: A survey. **International Journal of Distributed Sensor Networks**, v. 11, p. 1151–1155, Fevereiro 2015.

CAMPOLO, C.; MOLINARO, A.; VINEL, A. Understanding adjacent channel interference in multi-channel VANETs . In: **2014 IEEE Vehicular Networking Conference (VNC)**. Paderborn, Alemanha: IEEE, 2014. p. 101–104.

CAMPOLO, C. et al. On the impact of adjacent channel interference in multi-channel VANETs. In: **2016 IEEE International Conference on Communications (ICC)**. Kuala Lumpur, Malásia: IEEE, 2016. p. 1–7.

CAR2CAR, C. **Car2Car Communication Consortium Manifesto**. Agosto 2007.

CET - Sinal Verde. <http://cetsp1.cetsp.com.br/sinalverde/osSemaforosAgora.aspx\#>. Acesso em: 16 de novembro de 2018.

CHENG, L. et al. A measurement study of time-scaled 802.11a waveforms over the mobile-to-mobile vehicular channel at 5.9 GHz. **IEEE Communications Magazine**, v. 46, n. 5, p. 84–91, Maio 2008. ISSN 0163-6804.

CHENG, L. et al. Mobile vehicle-to-vehicle narrow-band channel measurement and characterization of the 5.9 GHz dedicated short range communication (DSRC) frequency band. **IEEE Journal on Selected Areas in Communications**, v. 25, n. 8, p. 1501–1516, Outubro 2007. ISSN 0733-8716.

COHDA Web Site. <https://cohdawireless.com/solutions/hardware/>. Acesso em: 16 de dezembro de 2019.

COTTATELLUCCI, L. et al. Cooperative communications in wireless networks. **EURASIP J. Wireless Comm. and Networking**, v. 2009, 01 2009.

CRUZ-SANCHEZ, H.; FRANCK, L.; BEYLOT, A. L. Routing metrics for store and forward satellite constellations. **IET Communications**, v. 4, n. 13, p. 1563–1572, Setembro 2010. ISSN 1751-8628.

DINESH, P. S. Design of reactive routing protocols to improve the performance of VANET . *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 03 2014.

DONG, X. et al. Research on bus rapid transit (BRT) and its real-time scheduling. In: **Proceedings of 2011 IEEE International Conference on Service Operations, Logistics and Informatics**. Pequim, China: IEEE, 2011. p. 342–346.

DOUSSE, O.; THIRAN, P.; HASLER, M. Connectivity in ad-hoc and hybrid networks. In: **Twenty-First Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies**. Nova Iorque, Estados Unidos: IEEE, 2002. v. 2, p. 1079–1088 vol.2.

ECKHOFF, D.; BRUMMER, A.; SOMMER, C. On the impact of antenna patterns on VANET simulation. In: **2016 IEEE Vehicular Networking Conference (VNC)**. Columbus, Estados Unidos: IEEE, 2016. p. 1–4.

EMMELMANN, M.; BOCHOW, B.; KELLUM, C. C. **Vehicular Networking - Automotive Applications and Beyond**. 1a. ed. Nova Iorque, Estados Unidos: John Wiley and Sons, 2010. ISBN 978-0-470-74154-2.

ER, N.; DEEP, K. S.; BONNIN, J. On the performance of VDTN routing protocols with V2X communications for data delivery in smart cities. In: **The Second International Workshop on Smart Sensing Systems (IWSSS '17)**. Oulu, Finlândia: UBICOMP, 2017.

ETSI-EN-302-663. **Intelligent Transport Systems (ITS); ITS-G5 Access layer specification for Intelligent Transport Systems operating in the 5 GHz frequency band**3. Maio 2019.

ETSI-TR-102-492-2. **Electromagnetic compatibility and Radio spectrum Matters (ERM); Intelligent Transport Systems (ITS); Part 2: Technical characteristics for pan European harmonized communications equipment operating in the 5 GHz frequency range intended for road safety and traffic management, and for non-safety related ITS applications; System Reference Document**. Julho 2006.

ETSI-TR-202-663. **Intelligent Transport Systems (ITS); European profile standard for the physical and medium access control layer of Intelligent Transport Systems operating in the 5 GHz frequency band**. Novembro 2009.

EZE, E. C. et al. Advances in vehicular ad-hoc networks (VANETs): Challenges and road-map for future development. **International Journal of Automation and Computing**, v. 13, n. 1, p. 1–18, Fevereiro 2016. ISSN 1751-8520. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s11633-015-0913-y>>.

FERNÁNDEZ, H. et al. Path loss characterization for vehicular communications at 700 MHz and 5.9 GHz under LOS and NLOS conditions. **IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters**, v. 13, p. 931–934, 2014. ISSN 1536-1225.

FERNANDEZ, J. A. et al. Performance of the 802.11p physical layer in vehicle-to-vehicle environments. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, v. 61, n. 1, p. 3–14, Janeiro 2012. ISSN 0018-9545.

FERREIRO-LAGE, J. A. et al. Analysis of unicast routing protocols for VANETs . In: **2009 Fifth International Conference on Networking and Services**. Valencia, Espanha: IEEE, 2009. p. 518–521.

FESTAG, A. Cooperative intelligent transport systems standards in Europe . **Communications Magazine, IEEE**, v. 52, p. 166–172, 12 2014.

FEUERSTEIN, M. J. et al. Path loss, delay spread, and outage models as functions of antenna height for microcellular system design. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, v. 43, n. 3, p. 487–498, Agosto 1994. ISSN 1939-9359.

FONSECA, M.; MUNARETTO, A.; GALVÁN, W. O impacto dos modelos de propagação nos protocolos de roteamento para redes veiculares urbanas. In: . Santarém, Brasil: SBrT, 2016.

GALLAGHER, B.; AKALSUKA, H.; SUZUKI, H. Wireless communications for vehicle safety: Radio link performance and wireless connectivity methods. **IEEE Vehicular Technology Magazine**, v. 1, n. 4, p. 4–24, Dezembro 2006. ISSN 1556-6072.

GAVILANES, G. et al. Comparative characterization of four antennas for VANETs by on-field measurements. In: **2013 IEEE International Conference on Microwaves, Communications, Antennas and Electronic Systems (COMCAS 2013)**. Tel Aviv, Israel: IEEE, 2013. p. 1–5.

GOLDSMITH, A. **Wireless Communications**. 1a. ed. Cambridge, Inglaterra: Cambridge University Press, 2005. ISBN 0521837162.

GRANDA, F. et al. Spatial characterization of radio propagation channel in urban vehicle-to-infrastructure environments to support WSNs deployment. **Sensors**, v. 17, n. 6, 2017. ISSN 1424-8220. Disponível em: <<http://www.mdpi.com/1424-8220/17/6/1313>>.

HAAS, Z.; SMALL, T. A new networking model for biological applications of ad hoc sensor networks. **IEEE/ACM Transactions on Networking**, v. 14, n. 1, p. 27–40, Fevereiro 2006. ISSN 1558-2566.

HARDING, J. et al. **Vehicle-to-Vehicle Communications: Readiness of V2V Technology for Application**. Agosto 2014.

HEINOVSKI, J. et al. Performance comparison of IEEE 802.11p and ARIB STD-T109. In: **2016 IEEE Vehicular Networking Conference (VNC)**. Columbus, Estados Unidos: IEEE, 2016. p. 1–8.

HORTON, G. et al. **Research Theme Analysis Report - Cooperative Intelligent Transport Systems**. Luxemburgo, Outubro 2016. 100 p. Correspondence.

IEEE1609.3. **IEEE 1609-3 (2016)**. Janeiro 2016.

IEEE1609.4. **IEEE 1609-4 (2016)**. Janeiro 2016.

IETF RFC4838. Draft, **Delay-Tolerant Networking Architecture**. Abril 2007.

IETF RFC6275. Draft, **Mobility Support in IPv6** . Julho 2011.

INSTITUTO de Telemática da Universidade Tecnológica de Hamburgo. <https://wiki.ti5.tuhh.de/>. Acesso em: 6 de dezembro de 2018.

ISO-21215-2018. **Intelligent transport systems — Localized communications — ITS-M5**. Jun 2018.

ISO-21217-2014. **Intelligent transport systems — Communications access for land mobiles (CALM) — Architecture**. Abril 2014.

JAIN, S.; FALL, K.; PATRA, R. Routing in delay tolerant network. In: **SIGCOMM'04 Proceedings of the 2004 Conference on Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communications**. Portland, Estados Unidos: ACM, 2004. p. 145–158.

JARDOSH, P. et al. Understanding congestion in 802.11b wireless networks. In: **Proceedings of the 5th Conference on Internet Measurement 2005**. Berkeley, Estados Unidos: USENIX, 2005.

KAPSCH Web Site. `connectedvehicles.kapsch.net`. Acesso em: 16 de dezembro de 2019.

KARAGIANNIS, G. et al. Vehicular networking: A survey and tutorial on requirements, architectures, challenges, standards and solutions. **IEEE Communications Surveys Tutorials**, v. 13, n. 4, p. 584–616, Fourth 2011. ISSN 1553-877X.

KIHL, M.; SICHITIU, M.; H., J. Design and evaluation of two geocast protocols for vehicular ad-hoc networks. **Journal of Internet Engineering**, Janeiro 2008.

KRAUS, J. D.; CARVER, K. R. **Eletromagnetics**. 2a. ed. Nova Iorque, Estados Unidos: McGraw-Hill Education Europe., 1973. ISBN 0070353964.

LAKKAKORPI, J.; PITKÄNEN, M.; OTT, J. Adaptive routing in mobile opportunistic networks. In: **Proceedings of the 13th ACM International Conference on Modeling, Analysis, and Simulation of Wireless and Mobile Systems (MSWIM'10)**. Bodrum, Turquia: ACM, 2010. p. 101–109.

LEONARD, K. **Dedicated Short-Range Communications (DSRC) and Spectrum Police**. 2016.

LUCENT-ALCATEL. White Paper, **Smart City Network Architecture Guide**. Setembro 2019. Disponível em: <<https://www.al-enterprise.com/-/media/assets/internet/documents/smart-city-network-architecture-guide-en.pdf>>.

LV, F.; ZHU, H.; XUE, H. An empirical study on urban IEEE 802.11p vehicle-to-vehicle communication. In: **2016 - 13th Annual IEEE International Conference on Sensing, Communication, and Networking (SECON)**. Londres, Inglaterra: IEEE, 2016. ISBN 978-1-5090-1732-4.

MALAGAR, V.; KUMAR, M. A comparative analysis of routing protocols in vehicular ad-hoc network. **International Journal of Advanced Research in Electronics and Communication Engineering**, v. 6, p. 378–389, Maio 2017. ISSN 2278-909X.

MARTINEZ, J. F. et al. Assessing the impact of a realistic radio propagation model on VANET scenarios using real maps. In: **2010 Ninth IEEE International Symposium on Network Computing and Applications**. Cambridge, Estados Unidos: IEEE, 2010. p. 132–139.

MASUI, H.; KOBAYASHI, T.; AKAIKE, M. Microwave path-loss modeling in urban line-of-sight environments. **IEEE Journal on Selected Areas in Communications**, v. 20, n. 6, p. 1151–1155, Agosto 2002. ISSN 0733-8716.

MOLINA-MASEGOSA, R.; GOZALVEZ, J. LTE-V for Sidelink 5G V2X vehicular communications: A new 5G technology for short-range vehicle-to-everything communications. **IEEE Vehicular Technology Magazine**, v. 12, n. 4, p. 30–39, Dezembro 2017.

NAGARAJ, U.; KHARAT, M. U.; DHAMAL, P. Study of various routing protocols in VANET . **International Journal of Computer Science & Technology**, v. 2, p. 45–52, Dezembro 2011. ISSN 0976-8491.

NAIK, G.; CHOUDHURY, B.; PARK, J. IEEE 802.11bd 5G NR V2X: Evolution of radio access technologies for V2X communications. **IEEE Access**, v. 7, p. 70169–70184, 2019. ISSN 2169-3536.

PAUL, B.; IBRAHIM, M.; BIKAS, M. A. N. VANET routing protocols: Pros and cons. **ArXiv**, abs/1204.1201, 2011.

RAPPAPORT, T. S. **Wireless Communications Principles and Practice**. 2nd.. ed. Upper Saddle River, Estados Unidos: Prentice Hall, 2001. ISBN 0130422320.

SANDRA, L. C. U. **IP Mobility Support in Multi-hop Vehicular Communications Networks**. UWSpace, 2012. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10012/6889>>.

SEREDYNSKI, M.; VITI, F. A survey of cooperative ITS for next generation public transport systems. In: **2016 IEEE 19th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)**. Rio de Janeiro, Brasil: IEEE, 2016. p. 1229–1234.

SHARMA, D. K.; PATRA, A. N.; KUMAR, C. . P-AODV: A priority based route maintenance process in mobile ad hoc networks. **Wireless Personal Communications**, v. 95, n. 4, p. 4381–4402, Agosto 2017. ISSN 1572-834X. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s11277-017-4085-7>>.

SLAWOMIR, G. Next generation ITS implementation aspects in 5G wireless communication network. In: **2017 15th International Conference on ITS Telecommunications (ITST)**. Varsóvia, Polônia: IEEE, 2017. p. 1–7.

SONG, C. Performance analysis of the IEEE 802.11p multichannel MAC protocol in vehicular ad hoc networks. **Sensors**, Dezembro 2017.

SONG, Y.; CHOI, H. Analysis of V2V broadcast performance limit for WAVE communication systems using two-ray path loss model. **ETRI**, p. 213–221, Abril 2017.

SPAHO, E. et al. VANET simulators: A survey on mobility and routing protocols. In: **2011 International Conference on Broadband and Wireless Computing, Communication and Applications**. Barcelona, Espanha: IEEE, 2011. p. 1–10.

STROM, E. G. On medium access and physical layer standards for cooperative intelligent transport systems in europe. **Proceedings of the IEEE**, v. 99, n. 7, p. 1183–1188, Julho 2011. ISSN 0018-9219.

STÜBER, G. L. **Principles of Mobile Communication**. 2nd. ed. Cham, Suíça: Kluwer Academic Publishers, 2002. ISBN 0-306-47315-1.

SUN, W.; LIU, Q.; LI, K. Research on congestion management in delay-tolerant networks. In: **2011 International Conference on Computer Science and Information Technology**. Singapura: IACSIT Press, 2012.

SYED, I.; ROH, B. H. Delay analysis of IEEE 802.11e EDCA with enhanced qos for delay sensitive applications. In: **2016 IEEE 35th International Performance Computing and Communications Conference (IPCCC)**. Las Vegas, Estados Unidos: IEEE, 2016. p. 1–4.

TORABI, N.; GHAFAROKHI, B. S. Survey of medium access control schemes for inter-vehicle communications. **Elsevier - Computers and Electrical Engineering**, v. 64, p. 450–472, Novembro 2017.

TORONTO, M. de. **Map of Traffic Control Signals**. Julho 2019. Disponível em: <<https://www.toronto.ca/wp-content/uploads/2018/01/96d8-Traffic-Control-System-Map-2018-01-09-a.pdf>>.

URBS-2019. **URBS em números**. Novembro 2019. Disponível em: <<https://www.urbs.curitiba.pr.gov.br/institucional/urbs-em-numeros>>. Acesso em: 23 de novembro de 2019.

VANDENBERGHE, W.; MOERMAN, I.; DEMEESTER, P. Approximation of the IEEE 802.11p standard using commercial off-the-shelf IEEE 802.11a hardware. In: **2011 11th International Conference on ITS Telecommunications**. São Petersburgo, Rússia: IEEE, 2011. p. 21–26.

VIEIRA, T. **Incorporating the GEMV2 Geometry-Based Vehicle-to-Vehicle Radio Propagation Channel Model Into the Artery Simulation Framework for VANET Applications**. Dissertação de Mestrado — Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, Agosto 2018.

VILLALBA, L. G. et al. Auto-configuration protocols in mobile ad hoc networks. **Sensors (Basel, Switzerland)**, v. 11, p. 3652–66, 12 2011.

VISTEON Web Site. <https://www.visteon.com/products/telematics/>. Acesso em: 16 de dezembro de 2019.

WANG, S. Y. et al. Design and implementation of a more realistic radio propagation model for wireless vehicular networks over the NCTUns network simulator. In: **2011 IEEE Wireless Communications and Networking Conference**. Cancún, México: IEEE, 2011. p. 1937–1942. ISSN 1525-3511.

WANG, Y. **Connectivity Constraints in Network Analysis**. Tese (Doutorado) — Texas A & M University, Austin, Estados Unidos, 08 2015.

WANG, Y. et al. Throughput and delay limits of 802.11p and its influence on highway capacity. In: **13th COTA International Conference of Transportation Professionals (CICTP 2013)**. Shenzhen, China: Elsevier Procedia, 2013. v. 96, p. 2096–2104.

YANG, M. et al. Performance of the priority control strategies for bus rapid transit: Comparative study from scenario microsimulation using VISSIM . **Discrete Dynamics in Nature and Society**, v. 2013, 2013.

YOO, H.; KIM, D. Dynamic channel coordination schemes for IEEE 802.11p/1609 vehicular networks: A survey. **International Journal of Distributed Sensor Networks**, 2013.

ZEADALLY, S. et al. Vehicular ad hoc networks (VANETS): status, results, and challenge. **Telecommunication Systems**, v. 50, n. 4, p. 217–241, Agosto 2012. ISSN 1572-9451. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s11235-010-9400-5>>.

ZEAR, A.; Kumar Singh, P. K.; SINGH, Y. Intelligent transport system: A progressive review. **Indian Journal of Science and Technology**, v. 9, n. 32, 2016. ISSN 0974 -5645. Disponível em: <<http://www.indjst.org/index.php/indjst/article/view/100713>>.

ZHANG, L. **Realistic, Efficient and Secure Geographic Routing in Vehicular Networks**. Tese (Doutorado) — University of Victoria, Victoria, Canadá, 2015.

ZHAO, L. et al. Feasibility analysis of multi-radio in DSRC vehicular networks. In: **2013 16th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC)**. Atlantic City, Estados Unidos: IEEE, 2013. p. 1–6. ISSN 1882-5621.

ZHU, D.; CUI, G.; FU, Z. DT-AODV: an on-demand routing protocol based DTN in VANET . **Applied Mathematics & Information Sciences**, v. 8, n. 6, p. 2955–2963, Novembro 2014.

APÊNDICE A – CONFIGURAÇÃO DO NS-2

Em linhas gerais, a parametrização foi feita conforme segue:

```
Phy/WirelessPhyExt set CStresh_          3.9810717055349694e-13
Phy/WirelessPhyExt set Pt_              0.1;# 20dBm
#Phy/WirelessPhyExt set Pt_            1.0;# 30dBm
Phy/WirelessPhyExt set noise_floor      1.26e-13
Phy/WirelessPhyExt set L_              1.0
Phy/WirelessPhyExt set PowerMonitorThresh_ 3.981071705534985e-18
Phy/WirelessPhyExt set HeaderDuration_  0.000040
Phy/WirelessPhyExt set BasicModulationScheme_ 0;
# (0=3Mbps, 1=6Mbps, 2=12Mbps, 3=24Mbps)
Phy/WirelessPhyExt set PreambleCaptureSwitch_ 1
Phy/WirelessPhyExt set DataCaptureSwitch_ 1
Phy/WirelessPhyExt set SINR_PreambleCapture_ 3.1623;# 5 dB
Phy/WirelessPhyExt set SINR_DataCapture_ 10.0;# 10 dB
Phy/WirelessPhyExt set trace_dist_     1e6;
Phy/WirelessPhyExt set PHY_DBG_        0
```

A camada de acesso ao meio foi simulada com o pacote 802.11Ext, também nativo da versão 2.35, configurada conforme segue:

```
Mac/802_11Ext set CWMin_                15
Mac/802_11Ext set CWMax_                1023
Mac/802_11Ext set SlotTime_            0.000013
Mac/802_11Ext set SIFS_                0.000032
Mac/802_11Ext set ShortRetryLimit_     7
Mac/802_11Ext set LongRetryLimit_     4
Mac/802_11Ext set HeaderDuration_     0.000040
Mac/802_11Ext set SymbolDuration_     0.000008
Mac/802_11Ext set BasicModulationScheme_ 0
Mac/802_11Ext set use_802_11a_flag_   true
Mac/802_11Ext set RTSThreshold_       2346
Mac/802_11Ext set MAC_DBG              0
Mac/802_11Ext set Logbackoff           1
```

```
LL set mindelay_          50us
LL set delay_             25us
LL set bandwidth_        0
```

Foi também considerado ganho de 4 dBi para as antenas, consideradas todas a 1,5 metros do solo, inclusive os nós de infraestrutura¹:

```
Antenna/OmniAntenna set X_          0
Antenna/OmniAntenna set Y_          0
Antenna/OmniAntenna set Z_          1.5
Antenna/OmniAntenna set Gt_         2.5118
Antenna/OmniAntenna set Gr_         2.5118
```

Para realizar a simulação, foram tomados os valores obtidos para propagação em larga e média escala com base nas medições realizadas em Pittsburgh, nos Estados Unidos por (CHENG et al., 2007). Como o NS-2 possui apenas o modelo log-normal, foi necessário escrever um modelo de propagação de múltiplos pontos de quebra (ou Modelo Linear por Partes), que foi parametrizado conforme segue:

```
Propagation/Shadowing2 set pathlossExp1_  2.0
Propagation/Shadowing2 set pathlossExp2_  4.0
Propagation/Shadowing2 set std_db1_       5.6
Propagation/Shadowing2 set std_db2_       8.4
Propagation/Shadowing2 set dist0_         1.0
Propagation/Shadowing2 set dist1_         100.0
Propagation/Shadowing2 set seed_          $opt(seed)
```

Foi alterado o modelo Nakagami-m nativo do NS-2 para receber os parâmetros fornecidos no trabalho em (CHENG et al., 2007), de forma a permitir avaliação do modelo de pequena escala na simulação do NS-2, que foi parametrizado segundo o que segue:

```
Propagation/Nakagami set use_nakagami_dist_ true
Propagation/Nakagami set gamma0_ 2.0 ;#Prop. Exp. until 1st breakpoint
Propagation/Nakagami set gamma1_ 4.0 ;#Prop. Exp. until 2nd breakpoint
Propagation/Nakagami set gamma2_ 4.0 ;#Prop. Exp. after 2nd breakpoint
Propagation/Nakagami set d0_gamma_ 100.0 ;# Dist. 1st. breakpoint (m)
Propagation/Nakagami set d1_gamma_ 10000.0 ;#Dist. 2nd. breakpoint (m)
Propagation/Nakagami set m0_ 3.01 ;#Nakagami-m coeff. until d0_m
Propagation/Nakagami set m1_ 1.18 ;#Nakagami-m coeff. until d1_m
```

¹Embora os elementos de sinalização sobre a via estejam em altura aproximada de 5,5 m, como não foi empregado o modelo de dois raios, o NS-2 não utiliza as informações de altura das antenas para fins de cálculo de propagação.

```

Propagation/Nakagami set m2_ 1.94 ;#Nakagami-m coeff. until d2_m
Propagation/Nakagami set m3_ 1.86 ;#Nakagami-m coeff. until d3_m
Propagation/Nakagami set m4_ 0.45 ;#Nakagami-m coeff. until d4_m
Propagation/Nakagami set m5_ 0.32 ;#Nakagami-m coeff. after d4_m
Propagation/Nakagami set d0_m_ 4.7 ;#Dist. 1st m coeff.
Propagation/Nakagami set d1_m_ 11.7;#Dist. 2nd m coeff.
Propagation/Nakagami set d2_m_ 28.9;#Dist. 3rd m coeff.
Propagation/Nakagami set d3_m_ 71.6;#Dist. 4th m coeff.
Propagation/Nakagami set d4_m_ 177.3 ;# Dist. 5th m coeff.

```

Os ajustes das variáveis de ambiente do simulador. Os valores dos vetores val(x) e val(y) sofreram alterações conforme necessário para a etapa da simulação. A parametrização foi feita conforme segue:

```

Agent/Null set sport_ 0
Agent/Null set dport_ 0
Agent/CBR set sport_ 0
Agent/CBR set dport_ 0
Agent/TCPSink set sport_ 0
Agent/TCPSink set dport_ 0
Agent/TCP set sport_ 0
Agent/TCP set dport_ 0
Agent/TCP set packetSize_ 1460

set val(chan)          Channel/WirelessChannel
set val(prop)          Propagation/Shadowing2
set val(netif)         Phy/WirelessPhyExt
set val(mac)           Mac/802_11Ext
set val(ifq)           Queue/DropTail/PriQueue
set val(ll)            LL
set val(ant)           Antenna/OmniAntenna
set val(ifqlen)        50
set val(nn)            $opt(nn)
set val(rp)            AODV
set val(x)             3500
set val(y)             3500
set val(start)         0.0
set val(stop)          $opt(simtime)
set val(vseed)         $opt(seed)
set val(mv)            $opt(mobility)
set val(traf)          $opt(trafego)

set topo              [new Topography]
$topo load_flatgrid $val(x) $val(y)

```

As configurações dos nós são aplicadas conforme:

```
set chan_1_ [new $val(chan)]
set chan_2_ [new $val(chan)]

$ns_ node-config -adHocRouting $val(rp) \
-llType $val(ll) \
-macType $val(mac) \
-ifqType $val(ifq) \
-ifqLen $val(ifqlen) \
-antType $val(ant) \
-propType $val(prop) \
-phyType $val(netif) \
-topoInstance $topo \
-agentTrace ON \
-routerTrace ON \
-macTrace ON \
-PhyTrace ON \
-movementTrace OFF \
-channel $chan_1_
```

Conforme se observa acima, todas as simulações foram realizadas com apenas um canal, embora o padrão DSRC/WAVE disponibilize quatro canais de serviço.

O tráfego foi ajustado conforme a etapa de simulação necessitou. Assim, para a primeira etapa o código de tráfego de dados teve o seguinte perfil:

```
for {set j 0} {$j < 36 } { incr j } {
set con_id [expr $j]
set send_time [expr 10*$j]
set udp_(0) [new Agent/UDP]
$ns_ attach-agent $node_(0) $udp_(0)
set null_(0) [new Agent/Null]
$ns_ attach-agent $node_(1) $null_(0)
set cbr_(0) [new Application/Traffic/CBR]
$cbr_($con_id) set packetSize_ 512
$cbr_($con_id) set random_ 1
$cbr_($con_id) set rate_ 415000
$cbr_(0) attach-agent $udp_(0)
$ns_ connect $udp_(0) $null_(0)
$ns_ at 1.0 "$cbr_(0) start"
$ns_ at [expr $send_time + 10] "$cbr_($con_id) stop" }
```

Da mesma forma, para a segunda etapa tem-se como exemplo para nós separados a 300 m:

```
for {set j 0} {$j < 48 } { incr j } {
set con_id [expr $j]
set send_time [expr 10*$j]
set udp_($con_id) [new Agent/UDP]
$ns_ attach-agent $node_(7) $udp_($con_id)
set null_($con_id) [new Agent/Null]
$ns_ attach-agent $node_(15) $null_($con_id)
set cbr_($con_id) [new Application/Traffic/CBR]
$cbr_($con_id) set packetSize_ 512
$cbr_($con_id) set random_ 1
$cbr_($con_id) set rate_ 415000
$cbr_($con_id) attach-agent $udp_($con_id)
$ns_ connect $udp_($con_id) $null_($con_id)
$ns_ at $send_time "$cbr_($con_id) start"
$ns_ at [expr $send_time + 10] "$cbr_($con_id) stop"
}
```

O trecho de código gerado para simular o modelo de propagação empregado neste trabalho foi o seguinte:

```
double avg_db;
if (dist > dist0_) {
if (dist > dist1_){
avg_db = -10.0 * pathlossExp1_ * log10(dist1_/dist0_) \\\
-10.0 * pathlossExp2_ * log10(dist/dist1_);
}
else{
avg_db = -10.0 * pathlossExp1_ * log10(dist/dist0_);
}} else {
avg_db = 0.0;
}
```

O modelo Nakagami-m nativo do NS-2 foi alterado com as seguintes modificações:

```
...
bind_bool ("use_nakagami_dist_" ,&use_nakagami_dist_); // Use random \\\
variation superimposed on the mean reception power or not
bind("m0_" ,&m0);
bind("m1_" ,&m1);
bind("m2_" ,&m2);
```

```

bind("m3_", &m3);
bind("m4_", &m4);
bind("m5_", &m5);
bind("d0_m_", &d0_m);
bind("d1_m_", &d1_m);
bind("d2_m_", &d2_m);
bind("d3_m_", &d3_m);
bind("d4_m_", &d4_m);
}
...
Nakagami::Nakagami(double g0, double g1, double g2, double d0_g, double d1_g, \
double m_0, double m_1, double m_2, double m_3, double m_4, double m_5, \
double d0m, double d1m, double d2m, double d3m, double d4m, \
int use_distribution)
{
gamma0 =g0;
gamma1 =g1;
gamma2 =g2;
d0_gamma=d0_g;
d1_gamma= d1_g;
m0= m_0;
m1= m_1;
m2= m_2;
m3= m_3;
m4= m_4;
m5= m_5;
d0_m= d0m;
d1_m= d1m;
d2_m= d2m;
d3_m= d3m;
d4_m= d4m;
use_nakagami_dist_ = use_distribution;
}
...
if (!use_nakagami_dist_) {
return Pr;
} else {
double m;
if ( dist <= d0_m)
m = m0;
else if ( dist <= d1_m)
m = m1;
else if ( dist <= d2_m)

```

```

m = m2;
else if ( dist <= d3_m)
m = m3;
else if ( dist <= d4_m)
m = m4;
else
m = m5;
...

```

Sobre o *proxy*, após adicionado ao código do NS-2 o arquivo fonte obtido de <https://wiki.ti5.tuhh.de>, foi executado o comando “validate” para verificar eventuais prejuízos aos valores de referência do simulador. Após isto, e na etapa de simulação da rede em grade com *proxy*, foram adicionadas as seguintes linhas no *script*.

```

...
# create propagation proxy instance
set opt(propInstance) [new Propagation/APProxy]
$opt(propInstance) propagation [new $val(prop)]
if { [info exists opt(propInstance)] } {
$ns_ node-config -propInstance $opt(propInstance)
} else {
$ns_ node-config -propType $val(prop)
}
...
# Remove value -propType from node configuration below.
$ns_ node-config -adhocRouting $val(rp) \
-llType $val(ll) \
-macType $val(mac) \
-ifqType $val(ifq) \
-ifqLen $val(ifqlen) \
-antType $val(ant) \
-phyType $val(netif) \
-topoInstance $topo \
-agentTrace ON \
-routerTrace ON \
-macTrace ON \
-PhyTrace ON \
-movementTrace OFF \
-channel $chan_1_
...
for {set i 0} {$i < $val(nn) } {incr i} {
set node_($i) [$ns_ node]
$node_($i) random-motion 0 ;# disable random motion

```

```

$ns_ initial_node_pos $node_($i) 20
$opt(propInstance) profile $node_($i) 0 -10 0 -10 0 -10 0 -10
}

```

E para o tráfego de dados com o *proxy*, a troca de mensagens foi realizada entre os GW e os nós móveis, um para cada GW, conforme o *script* abaixo, que foi escrito para redes com 16 nós.

```

for {set j 0} {$j < 27 } { incr j } {
for {set i 0} {$i < 4 } {incr i} {
set con_id [expr 4*$j + $i]
set send_time [expr 40*$j + 10*$i]
set udp_($con_id) [new Agent/UDP]
$ns_ attach-agent $node_($i) $udp_($con_id)
set null_($con_id) [new Agent/Null]
$ns_ attach-agent $node_([expr $i + 16]) $null_($con_id)
set cbr_($con_id) [new Application/Traffic/CBR]
$cbr_($con_id) set packetSize_ 512
$cbr_($con_id) set random_ 1
$cbr_($con_id) set rate_ 415000
$cbr_($con_id) attach-agent $udp_($con_id)
$ns_ connect $udp_($con_id) $null_($con_id)
$ns_ at [expr $send_time + 10] "$cbr_($con_id) start"
$ns_ at [expr $send_time + 20] "$cbr_($con_id) stop"
puts "no tx = $i, j = $j, $send_time e $con_id ."
}}

```