

## **TRABALHO DE GRADUAÇÃO**

# **SISTEMA DE COMUNICAÇÃO MÓVEL APLICADO AO TRANSPORTE COLETIVO RODOVIÁRIO URBANO**

**Filipe Basílio Lage  
Helena Magalhães Mian  
Henrique Zaidan Lopes  
Mateus de Oliveira Ferreira  
Vinícius de Carvalho Amaral**

**Brasília, dezembro de 2009**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA**

TRABALHO DE GRADUAÇÃO

**SISTEMA DE COMUNICAÇÃO MÓVEL  
APLICADO AO TRANSPORTE COLETIVO  
RODOVIÁRIO URBANO**

**Filipe Basílio Lage  
Helena Magalhães Mian  
Henrique Zaidan Lopes  
Mateus de Oliveira Ferreira  
Vinícius de Carvalho Amaral**

Relatório submetido como requisito parcial para obtenção  
do grau de Engenheiro Eletricista

**Banca Examinadora**

Prof. Paulo Henrique Portela de Carvalho, UnB/ ENE  
(Orientador)

---

Elmo Vasconcelos de Melo (Coorientador)

---

Prof. Antonio José Martins Soares, UnB/ ENE

---

Prof. Leonardo R.A.X. Menezes, UnB/ ENE

---

**Dedicatória(s)**

*Dedicamos esse trabalho a nossas famílias e amigos que entenderam nossas ausências e impaciências.*

*Filipe, Helena, Henrique, Mateus e Vinícius.*

## **Agradecimentos**

*Agradecemos a todos que colaboraram na elaboração desse trabalho, especialmente ao professor Paulo e ao nosso coorientador Elmo. Agradecemos uns aos outros pelo companheirismo.*

*Filipe, Helena, Henrique, Mateus e Vinícius.*

---

## RESUMO

Este trabalho estuda a viabilidade de uma rede de comunicação móvel aplicada ao transporte coletivo rodoviário urbano. Estudam-se sistemas similares já existentes e é proposto um sistema que utiliza uma rede *ad hoc* de veículos, isto é, uma VANET (*vehicular ad hoc network*), a ser implantada com o padrão de redes locais sem fio IEEE 802.11. Além das características das extensões 802.11a e 802.11p desse padrão, são estudados aspectos da propagação do sinal e do roteamento. Adicionalmente, o sistema celular 3G UMTS (*universal mobile telecommunications system*) é estudado como alternativa ao sistema proposto para contornar situações em que o desempenho da rede *ad hoc* for insatisfatório, assegurando maior confiabilidade ao sistema. Como ferramenta para a validação do sistema, foi adotado o *software* OPNET Modeler<sup>®</sup>. As simulações realizadas focam um estudo de caso aplicado à avenida W3 de Brasília.

---

## ABSTRACT

The present work studies the feasibility of a wireless mobile network applied to the urban public transportation. Similar systems are studied and it is made a proposal of a solution based on a vehicular *ad hoc* network, *i.e.*, a VANET, to be implanted using the IEEE 802.11 standard. Besides the characteristics of the extensions 802.11a and 802.11p, aspects of signal propagation and routing are also considered. Additionally, the third generation cellular system UMTS is analyzed as an alternative to the proposed system, to operate when the *ad hoc* network may not satisfy minimum system's requirements, in order to provide reliability. The software OPNET Modeler<sup>®</sup> was adopted as a tool for system validation. The simulations focus on a case study of the W3 avenue in Brasília.

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>DESCRIÇÃO DO SISTEMA .....</b>	<b>3</b>
2.1	INTRODUÇÃO .....	3
2.2	APLICAÇÕES DESEJADAS .....	3
2.3	SISTEMAS EXISTENTES .....	4
2.4	VANETS.....	6
2.5	SISTEMA PROPOSTO.....	7
2.5.1	SISTEMA CENTRALIZADO .....	7
2.5.2	SISTEMA CENTRALIZADO COM PONTOS DE ACESSO.....	8
2.5.3	SISTEMA SECUNDÁRIO.....	8
2.6	CONCLUSÃO.....	9
<b>3</b>	<b>REDES VANETS .....</b>	<b>10</b>
3.1	REDES IEEE 802.11.....	10
3.1.1	A FAMÍLIA IEEE 802.11.....	10
3.1.2	TIPOS DE REDES 802.11 .....	12
3.1.3	ÁREAS DE SERVIÇO ESTENDIDO.....	12
3.1.4	FUNDAMENTOS DA SUBCAMADA MAC 802.11.....	13
3.1.5	CAMADA FÍSICA 802.11a.....	18
3.1.6	IEEE 802.11p .....	22
3.2	ESTUDOS DE PROPAGAÇÃO .....	26
3.2.1	DESVANECIMENTO DE GRANDE ESCALA .....	27
3.2.2	DESVANECIMENTO DE PEQUENA ESCALA .....	29
3.3	PROTOCOLOS DE ROTEAMENTO .....	32
3.3.1	TIPOS DE PROTOCOLO DE ROTEAMENTO PARA REDES <i>AD HOC</i> MÓVEIS.....	32
3.3.2	TERMINOLOGIA .....	33
3.3.3	PROTOCOLO AODV – <i>AD HOC ON-DEMAND DISTANCE VECTOR</i> .....	34
3.3.4	PROTOCOLO OLSR – <i>OPTIMIZED LINK STATE ROUTING</i> .....	36
3.3.5	PROTOCOLO GRP – <i>GEOGRAPHIC ROUTING PROTOCOL</i> .....	36
3.4	CONCLUSÃO.....	38
<b>4</b>	<b>UMTS.....</b>	<b>39</b>
4.1	INTRODUÇÃO .....	39
4.2	ARQUITETURA DE REDES UMTS .....	39
4.3	INTERFACE AÉREA .....	41
4.4	CANAIS .....	42
4.4.1	CANAIS LÓGICOS .....	43
4.4.2	CANAIS DE TRANSPORTE.....	44
4.4.3	CANAIS FÍSICOS.....	45
4.5	MODULAÇÃO WCDMA E APLICAÇÕES SISTÊMICAS.....	47
<b>5</b>	<b>MODELAMENTO E SIMULAÇÕES DO SISTEMA PROPOSTO.....</b>	<b>50</b>
5.1	MODELAMENTO DO SISTEMA .....	50
5.1.1	MOBILIDADE.....	51
5.1.2	TRÁFEGO .....	54
5.1.3	CANAL RÁDIO-MÓVEL .....	55
5.1.4	OUTRAS CONFIGURAÇÕES DO SISTEMA VANET.....	67
5.1.5	SISTEMA CELULAR UMTS .....	68

5.2	RESULTADOS E ANÁLISE DO SISTEMA VANET .....	70
5.2.1	ESTATÍSTICAS DE SIMULAÇÃO .....	70
5.2.2	SIMULAÇÕES DEMONSTRATIVAS DE ASPECTOS DO PADRÃO IEEE 802.11a .....	71
5.2.3	SIMULAÇÕES DEMONSTRATIVAS DE ASPECTOS DO CANAL .....	75
5.2.4	SIMULAÇÕES DO SISTEMA VANET .....	87
5.3	RESULTADOS E ANÁLISE DO SISTEMA CELULAR UMTS .....	95
5.3.1	COMPARATIVO ENTRE DSCH E DCH .....	95
5.3.2	COMPARATIVO DE DESEMPENHO DO AGENDAMENTO DO FACH .....	96
5.3.3	COMPARATIVO DE DESEMPENHO DE REDE COM SOFT HANDOVER E COM HARD HANDOVER.....	98
5.3.4	DESEMPENHO DA REDE COM DIFERENTES NÚMEROS DE MÓVEIS .....	100
5.3.5	DESEMPENHO DA REDE COM OUTROS USUÁRIOS .....	101
5.3.6	CONCLUSÕES .....	103
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES E PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>104</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>106</b>
	<b>ANEXO I – VISÃO GERAL DO SOFTWARE OPNET MODELER .....</b>	<b>I.1</b>
I.I	EDITOR DE PROJETOS ( <i>PROJECT EDITOR</i> ) .....	i.2
I.II	EDITOR DE NÓ ( <i>NODE EDITOR</i> ) .....	i.3
I.III	EDITOR DE PROCESSOS ( <i>PROCESS EDITOR</i> ) .....	i.3
I.IV	EDITOR DE CÓDIGO FONTE ( <i>OPEN MODEL SOURCE CODE</i> ).....	i.3
I.V	MODELANDO REDES <i>WIRELESS</i> .....	i.3
I.VI	MODELOS SEM FIO .....	i.7
I.VII	MODELANDO O TRÁFEGO DA REDE .....	i.7
I.VIII	ESTATÍSTICAS .....	i.12
I.IX	RADIO TRANSCEIVER PIPELINE.....	i.14
I.X	UMTS .....	i.17
	<b>ANEXO II – ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DO PONTO DE ACESSO KRAZER WAP 354H .....</b>	<b>II.1</b>

# LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Fotos da rede CITFOR [4].....	5
Figura 2.2. Esquema do sistema NextBus. Adaptada de [5]. .....	5
Figura 2.3. Esquema do sistema HelMi. Adaptada de [6].....	6
Figura 2.4. Sistema proposto sem pontos de acesso à Central.....	7
Figura 2.5. Sistema proposto com pontos de acesso à Central.....	8
Figura 2.6. Sistema secundário .....	9
Figura 3.1. Subdivisão IEEE das duas primeiras camadas do modelo OSI .....	11
Figura 3.2. Modos de operação de um BSS. Adaptada de [8]. .....	12
Figura 3.3. Problema da estação oculta. Adaptada de [8]. .....	15
Figura 3.4. Utilização de RTS/CTS, ACK e NAV. Adaptada de [8].....	15
Figura 3.5. Relação entre tempos de espera entre quadros. Adaptada de [8]. .....	16
Figura 3.6. Quadro MAC 802.11 genérico. Adaptada de [8].....	17
Figura 3.7. Exemplo de ortogonalidade em frequência. Adaptada de [8].....	19
Figura 3.8. Composição do Símbolo OFDM do padrão IEE 802.11a. Adaptada de [8]. ....	19
Figura 3.9. Subportadoras OFDM utilizadas pelo padrão IEEE 802.11a. Adaptada de [8]. .....	20
Figura 3.10. Formato do preâmbulo do 802.11a. Adaptada de [8]. .....	21
Figura 3.11. Formato do quadro 802.11a. Adaptada de [8].....	21
Figura 3.12. Comportamento do canal multipercurso. Adaptada de [14].....	31
Figura 3.13. <i>Dead-end</i> no roteamento geográfico. Adaptada de [16].....	37
Figura 4.1. Arquitetura UMTS – Modelo Conceitual. Modificada de [21].....	40
Figura 4.2. Arquitetura da rede UMTS. Adaptada de [22].....	41
Figura 4.3. Canais lógicos, físicos e de transporte para o WCDMA. Adaptada de [21]. ...	42
Figura 4.4. Canais UMTS. Adaptada de [24].....	43
Figura 4.5. Estrutura de um quadro de WCDMA [25].....	47
Figura 4.6. Sinal antes e depois do espalhamento. Modificada de [24]. .....	48
Figura 5.1. Foto da vista superior de trecho da avenida W3 .....	50
Figura 5.2. Visão geral das trajetórias sobre avenida W3.....	52
Figura 5.3. Exemplo de modelo de velocidade de um móvel ao longo do tempo.....	54
Figura 5.4. Curva de Shadowing com média zero e desvio padrão de 10 dB. ....	56
Figura 5.5. Função Densidade de Probabilidades da curva mostrada na Figura 5.4 comparada com uma Função Densidade de Probabilidades de uma distribuição normal.	57
Figura 5.6. Comportamento da relação sinal/ruído em um mesmo cenário com três valores de <i>offset</i> .....	58
Figura 5.7. Destaque da curva de relação Sinal/Ruído com o valor de <i>offset</i> 1.....	59
Figura 5.8. Curva de relação Sinal/Ruído com o valor de <i>offset</i> 3.....	59
Figura 5.9. BER vs $E_b/N_0$ para diferentes comportamentos de canal.....	61
Figura 5.10. Perfil de $E_b/N_0$ das 48 subportadoras OFDM antes de passar pelo canal ....	61
Figura 5.11. Perfil de $E_b/N_0$ das 48 subportadoras OFDM depois de passar pelo canal...	62
Figura 5.12. Nuvem de pontos de RBIR vs BER após o mapeamento e curva obtida por processo de fitagem.....	63
Figura 5.13. Exemplo de canal seletivo em frequência para determinado instante de tempo .....	63
Figura 5.14. Efeito do <i>fading</i> no desempenho da comunicação .....	66
Figura 5.15. <i>Throughput</i> obtido com os móveis a 200 m de distância .....	66
Figura 5.16. <i>Throughput</i> obtido com os móveis a 500 m de distância .....	67
Figura 5.17. <i>Throughput</i> Efetivo em função da Taxa de Transmissão para diferentes tamanhos de pacotes .....	73
Figura 5.18. <i>Throughput</i> Efetivo em Função da Taxa de Transmissão com e sem uso de RTS/CTS e fragmentação.....	74
Figura 5.19. Relação sinal/ruído com e sem RTS/CTS.....	75

Figura 5.20. Probabilidade de comunicação para diferentes variabilidades de meio .....	78
Figura 5.21. Comportamento do <i>throughput</i> médio em função da distância para diferentes velocidades.....	80
Figura 5.22. Comportamento do <i>throughput</i> médio em função da distância para diferentes velocidades com taxa de 10 Mbps.....	80
Figura 5.23. <i>Throughput</i> instantâneo apenas com <i>fading</i> .....	82
Figura 5.24. BER apenas com <i>fading</i> .....	83
Figura 5.25. Atraso apenas com <i>fading</i> .....	83
Figura 5.26. <i>Throughput</i> com <i>shadowing</i> e <i>fading</i> .....	84
Figura 5.27. Relação Sinal/Ruído com <i>shadowing</i> e <i>fading</i> .....	85
Figura 5.28 – BER com <i>shadowing</i> e <i>fading</i> .....	85
Figura 5.29. Atraso com <i>shadowing</i> e <i>fading</i> .....	86
Figura 5.30. Comportamento do <i>throughput</i> médio em função da distância para diferentes velocidades com taxa de 10 Mbps.....	86
Figura 5.31. Média da carga do sistema em função do número de ônibus .....	88
Figura 5.32. Perdas por ultrapassagem do limite de retransmissões em função do número de ônibus .....	89
Figura 5.33. Eficiência da rede em função do número de ônibus .....	89
Figura 5.34. Perdas por ultrapassagem do limite de retransmissões em função do número de ônibus .....	90
Figura 5.35. Eficiência da rede em função do número de ônibus .....	91
Figura 5.36. Atraso médio em função do número de ônibus .....	91
Figura 5.37. Percentual de páginas respondidas em função do tempo máximo de resposta de página .....	94
Figura 5.38. Número de Portadoras ( <i>radio beares</i> ) ativas no DSCH.....	96
Figura 5.39. Atraso fim-afim para diferentes QoS .....	98
Figura 5.40. Tempo de Resposta do FTP .....	99
Figura 5.41. Potência de Transmissão na Subida (camada física do móvel) .....	99
Figura 5.42. Máxima taxa recebida .....	100
Figura 5.43. <i>Throughput</i> recebido pela RNC em função do número de móveis. ....	101
Figura 5.44. Atraso fim-a-fim e <i>jitter</i> na rede com influencia de móveis externos ao sistema. ....	102
Figura 5.45. Tráfego recebido e enviado entre os UEs e a UTRAN. ....	102

# LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1. Taxas de transmissão utilizadas pelo padrão IEEE 802.11a .....	20
Tabela 3.2. Requerimentos mínimos de Sensibilidade.....	22
Tabela 3.3. Relações entre parâmetros da camada física e Parâmetros do Canal a serem atendidas .....	24
Tabela 3.4. Comparação entre 802.11a e 802.11p.....	26
Tabela 5.1. Campos Contidos no Pacote do Tráfego CBR.....	55
Tabela 5.2. Tempo de coerência para diferentes velocidades do móvel .....	64
Tabela 5.3. Parâmetros das Equações 5.3 e 5.4.....	72
Tabela 5.4. Parâmetros utilizados com e sem RTS/CTS e fragmentação.....	74
Tabela 5.5. Distâncias máximas de comunicação para diferentes taxas de comunicação. ....	77
Tabela 5.6. Estudo do alcance para diferentes valores de antena.....	79
Tabela 5.7. Desempenho da rede em função do período de sinalização.....	93
Tabela 5.8 . Desempenho da rede em função do intervalo entre TCs.....	93

# LISTA DE SÍMBOLOS

## Siglas e Abreviações de Língua Inglesa

3G	<i>Third Generation</i>	Terceira geração
3GPP	<i>Third Generation Partnership Project</i>	Projeto de parceira da terceira geração
ACK	<i>Acknowledgment</i>	Reconhecimento
AIFS	<i>Arbitrary Interframe Space</i>	Espaço arbitrário entre quadros
AODV	<i>Ad hoc On-Demand Distance Vector</i>	Roteamento por vetor distância sob demanda para redes <i>ad hoc</i>
AP	<i>Access Point</i>	Ponto de acesso
BCCH	<i>Broadcast Control Channel</i>	Canal de controle de radiodifusão
BCH	<i>Broadcast Channel</i>	Canal de radiodifusão
BSS	<i>Basic Service Set</i>	Conjunto básico de serviço
BSSID	<i>Basic Service Set Identifier</i>	Identificador de conjunto básico de serviço
CBR	<i>Constant Bit Rate</i>	Taxa constante de <i>bits</i>
CCCH	<i>Common Control Channel</i>	Canal de controle comum
CCPCH	<i>Common Control Physical Channel</i>	Canal físico de controle comum
CDMA	<i>Code Division Multiple Access</i>	Múltiplo acesso por divisão de código
CGF	<i>Charging Gateway Function</i>	Portal de cobrança
CN	<i>Core Network</i>	Núcleo da rede
CPCH	<i>Common Packet Channel</i>	Canal comum de pacote
CPICH	<i>Common Pilot Channel</i>	Canal piloto comum
CS	<i>Circuit Switched</i>	Comutação por circuito
CSMA	<i>Carrier Sense Multiple Access</i>	Múltiplo acesso por detecção de portadora
CSMA/CA	<i>Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance</i>	Múltiplo acesso por detecção de portadora com evitação de colisão
CSMA/CD	<i>Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection</i>	Acesso múltiplo por detecção de portadora com detecção de colisão
CTCH	<i>Common Traffic Channel</i>	Canal de tráfego comum
CTS	<i>Clear to Send</i>	Liberação para enviar
CW	<i>Contention Window</i>	Janela de contenção
DCCH	<i>Dedicated Control Channel</i>	Canal de controle dedicado
DCF	<i>Distributed Coordination Function</i>	Função de coordenação distribuída
DCH	<i>Dedicated Transport Channel</i>	Canal de transporte dedicado
DFS	<i>Dynamic Frequency Selection</i>	Seleção de frequência dinâmica
DIFS	<i>DCF Interframe Space</i>	Espaço entre quadros da DCF
DPCCCH	<i>Dedicated Physical Control Channel</i>	Canal físico dedicado de controle
DPDCH	<i>Dedicated Physical Data Channel</i>	Canal de dados físico dedicado
DPCH	<i>Dedicated Physical Channel</i>	Canal físico dedicado
DSCH	<i>Downlink Shared Channel</i>	Canal de descida compartilhado
DSRC	<i>Dedicated Short-Range Communications</i>	Comunicações dedicadas em curto alcance

	<i>Direct Sequence Spread Spectrum</i>	Espalhamento espectral por sequência direta
DSSS		
DTCH	<i>Dedicated Traffic Channel</i>	Canal de tráfego dedicado
EDGE	<i>Enhanced Data Rates for GSM Evolution</i>	Taxas elevadas de dados para a evolução do GSM
EIFS	<i>Extended Interframe Space</i>	Espaço estendido entre quadros
ESS	<i>Extended Service Set</i>	Conjunto de estendido de serviço
FACH	<i>Forward Access Channel</i>	Canal de acesso direto
FCS	<i>Frame Check Sequence</i>	Sequência de verificação de quadro
FDD	<i>Frequency Division Duplex</i>	Duplexação por divisão na frequência
FHSS	<i>Frequency Hopping Spread Spectrum</i>	Espalhamento espectral com salto em frequência
FTP	<i>File Transfer Protocol</i>	Protocolo de transferência de arquivo
GERAN	<i>GSM/EDGE RAN</i>	Rede de acesso de rádio do GSM/EDGE
GGSN	<i>Gateway GPRS Support Node</i>	Nó de suporte GPRS
GMSC	<i>Gateway Mobile Switching Centre</i>	Centro de comutação móvel do roteador
GPRS	<i>General Packet Radio Service</i>	Serviço de Rádio para transmissão de pacotes em geral
GPS	<i>Global Positioning System</i>	Sistema de posicionamento global
GPSR	<i>Greedy Perimeter Stateless Routing</i>	Roteamento geográfico com modos <i>greedy</i> e perímetro
GRP	<i>Geographic Routing Protocol</i>	Protocolo de roteamento geográfico
GSM	<i>Global System for Mobile Communications</i>	Sistema global para comunicações móveis
HCF	<i>Hybrid Distributed Coordination</i>	Função de coordenação híbrida
HLR	<i>Home Location Register</i>	Registro de localização local
HR/DSSS	<i>High Rate Direct Sequence Spread Spectrum</i>	Espalhamento espectral por sequência direta de alta taxa
HS-DSCH	<i>High Speed Downlink Shared Channel</i>	Canal compartilhado de enlace de descida de alta velocidade
HTTP	<i>Hypertext Transfer Protocol</i>	Protocolo de transferência de hipertexto
IBSS	<i>Independent Basic Service Set</i>	Conjunto básico de serviços independente
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronic Engineers</i>	Instituto de engenheiros eletricitistas e eletrônicos
IETF	<i>Internet Engineering Task Force</i>	Força tarefa de engenharia para a Internet
IMS	<i>IP Multimedia Subsystem</i>	Subsistema de multimídia por IP
IMT-2000	<i>International Mobile Telecommunications at 2000 MHz</i>	Telecomunicações móveis internacionais em 2000 MHz
IP	<i>Internet Protocol</i>	Protocolo internet
ITU	<i>International Telecommunication Union</i>	União internacional de telecomunicações
LAN	<i>Local Area Network</i>	Rede de área local
LLC	<i>Logical Link Control</i>	Controle lógico de enlace
MAC	<i>Media Access Control</i>	Controle de acesso a mídia
MIMO	<i>Multiple Input Multiple Output</i>	Múltiplas entradas e múltiplas saídas
MPR	<i>Multipoint Relay</i>	Relé multiponto
MSC	<i>Mobile Switching Centre</i>	Centro de comutação móvel

MSDU	<i>MAC Service Data Unit</i>	Unidade de dados de serviço MAC
MT	<i>Mobile Terminal</i>	Terminal móvel
NAV	<i>Network Allocation Vector</i>	Vetor de alocação de rede
NODE-B	<i>Node-Base</i>	Estação rádio base relativo à tecnologia 3G UMTS
OFDM	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>	Multiplexação por divisão em frequências ortogonais
OFDMA	<i>Orthogonal Frequency Division Multiple Access</i>	Múltiplo acesso por divisão ortogonal de frequências
OLSR	<i>Optimized Link State Routing</i>	Roteamento por estado de enlace otimizado
OSI	<i>Open Systems Interconnection</i>	Interconexão de sistemas abertos
PCCH	<i>Paging Control Channel</i>	Canal de controle de <i>paging</i> (envio de pequenos recados)
PCF	<i>Point Distributed Coordination</i>	Função de coordenação pontual
PCH	<i>Paging Channel</i>	Canal de <i>paging</i> (envio de pequenos recados)
PCPCH	<i>Physical Common Packet Channel</i>	Canal físico comum de pacote
PDSCH	<i>Physical Downlink Shared Channel</i>	Canal físico compartilhado de descida
PHY	<i>Physical Layer</i>	Camada física
PIFS	<i>PCF Interframe Space</i>	Espaço entre quadros da PCF
PLPC	<i>Physical Layer Convergence Procedure</i>	Procedimento de convergência da camada física
PMD	<i>Physical Medium Dependent</i>	Dependente do meio físico
PS	<i>Packet Switched</i>	Comutação por pacotes
PRACH	<i>Physical Random Access Channel</i>	Canal físico de acesso aleatório
QAM	<i>Quadrature Amplitude Modulation</i>	Modulação por amplitude em quadratura
QoS	<i>Quality of Service</i>	Qualidade de serviço
QPSK	<i>Quadrature Phase Shift Keying</i>	Chaveamento por deslocamento de fase em quadratura
RACH	<i>Random Access Channel</i>	Canal de acesso aleatório
RAN	<i>Radio Access Network</i>	Rede de acesso de rádio
RERR	<i>Route Error</i>	Erro de rota
RFC	<i>Request For Comments</i>	Requisição de comentários
RNC	<i>Radio Network Controller</i>	Controlador de rádio da rede
RNS	<i>Radio Network System</i>	Sistema de rádio da rede
RREP	<i>Route Reply</i>	Resposta de rota
RREQ	<i>Route Request</i>	Requisição de rota
RTS	<i>Request to Send</i>	Requisição para enviar
SCH	<i>Synchronization Channel</i>	Canal de sincronização
SGSN	<i>Serving GPRS Support Node</i>	Nó de suporte GPRS em serviço
SIFS	<i>Short Interframe Space</i>	Espaço curto entre quadros
SNR	<i>Signal to Noise Ratio</i>	Razão entre sinal e ruído
SSID	<i>Service Set Identifier</i>	Identificador de conjunto de serviço
TC	<i>Topology Control</i>	Controle de topologia
TDD	<i>Time Division Duplex</i>	Duplexação por divisão no tempo
TE	<i>Terminal Equipment</i>	Equipamento terminal

TDMA	<i>Time Division Multiple Access</i>	Múltiplo acesso por divisão do tempo
TPC	<i>Transmission Power Control</i>	Controle de potência de transmissão
UMTS	<i>Universal Mobile Telecommunications System</i>	Sistema universal de telecomunicações móveis
USIM	<i>Universal Subscriber Identity Module</i>	Módulo universal de identidade do usuário
UTRAN	<i>UMTS Terrestrial Radio Access Network</i>	Rede de acesso de rádio terrestre universal
VANET	<i>Vehicular Ad hoc Network</i>	Rede <i>ad hoc</i> veicular
VLR	<i>Visitor Location Register</i>	Registro de localização de visitante
VoIP	<i>Voice Over Internet Protocol</i>	Voz sobre protocolo internet
WCDMA	<i>Wide-Band Code Division Multiple Access</i>	Múltiplo acesso por divisão no código utilizando portadora de banda larga
WDS	<i>Wireless Distribution System</i>	Sistema de distribuição sem Fio
WiMAX	<i>Worldwide Interoperability for Microwave Access</i>	Interoperabilidade mundial para acesso por microondas

## Símbolos Latinos

$L$	Perdas de propagação	
$P_{TX}$	Potência de transmissão	[W]
$P_{RX}$	Potência de recepção	[W]
$G_{TX}$	Ganho da antena de transmissão	
$G_{RX}$	Ganho da antena de recepção	
$d$	Distância	[m]
$H_T$	Altura da antena transmissora	[m]
$H_R$	Altura da antena receptora	[m]
$D_{cross}$	Distância de <i>crossover</i>	[m]
$L_S$	Perdas por desvanecimento de larga escala	[dB]
$P_L$	Perdas de percurso	[dB]
$X$	Perdas devido por sombreamento	[dB]
$h(t)$	Resposta impulsional	
$a$	Amplitude do impulso	
$i$	Índice do multipercurso	
$f_c$	Frequência central da portadora	[Hz]
$e$	Número de Euler	
$T_c$	Tempo de coerência	[s]
$f_m$	Desvio Doppler	[Hz]
$v$	Velocidade	[m/s]
$B_{total}$	Número de <i>bits</i> total em uma operação atômica	

$T_{bit}$	Duração de um <i>bit</i>	[ $\mu$ s]
$R_{ef}$	<i>Throughput</i> Efetivo,	[Mbps]
$B_{dados}$	Número de <i>bits</i> de informação por pacote	
$B_{MAC}$	Número de <i>bits</i> de <i>overhead</i> MAC	
$B_{encap}$	Número de <i>bits</i> do <i>overhead</i> de encapsulamento	
$N_{ACK}$	Número de quadros ACK	
$B_{ACK}$	Número de <i>bits</i> de um quadro ACK	
$B_{RTS}$	Número de <i>bits</i> de um quadro RTS	
$B_{CTS}$	Número de <i>bits</i> de um quadro CTS	
$T_{CW}$	Média da duração da janela de contenção	[ $\mu$ s]
	Número de SIFS na operação atômica	
$N_{SIFS}$		
$T_{SIFS}$	Duração de um SIFS	[ $\mu$ s]
$T_{DIFS}$	Duração de um DIFS	[ $\mu$ s]
$T_{pre}$	Duração do preâmbulo	[ $\mu$ s]
$T_{PLCP}$	Duração do PLCP	[ $\mu$ s]

### Símbolos Gregos

$\lambda$	Comprimento de onda	[m]
$\pi$	Número Pi	
$\sigma$	Desvio padrão	
$\tau$	Atraso do impulso	
$\phi$	Desvio de fase	
$\delta$	Delta de Dirac	

### Unidades

<i>bps</i>	<i>Bits</i> por segundo
<i>kbps</i>	Quilo <i>bits</i> por segundo
<i>Mbps</i>	Mega <i>bits</i> por segundo

# 1 INTRODUÇÃO

A rede de transporte coletivo rodoviário urbano atende diariamente a uma expressiva parcela da população das grandes cidades. Entretanto, na maioria dessas redes, não há nenhum tipo de sistema que transmita informações aos usuários, informando, por exemplo, a que distância determinado ônibus se encontra da parada, o tempo estimado de chegada e qual a próxima parada do ônibus, como acontece em aeroportos e estações de trens.

Neste contexto, existe uma tendência do governo federal em estimular a pesquisa e a implementação de formas de promover a acessibilidade de pessoas portadoras de deficiência ou com mobilidade reduzida aos meios de transporte e de comunicação. Um exemplo desta tendência é o decreto Nº 5.296 de dezembro de 2004 [1], no qual é definida a acessibilidade e são estabelecidas formas de apoio e estímulo ao desenvolvimento de soluções que visem proporcioná-la. Neste decreto é explicitado que este desenvolvimento deve partir de parcerias com universidades e centros de pesquisa. Algumas formas de promover essa acessibilidade são sistemas sonoros de informação (como existem em aeroportos), botão de solicitação de parada em terminais rodoviários, painéis em paradas de ônibus informando distância e tempo de chegada de cada ônibus, entre outras funcionalidades.

Além disso, em face aos inúmeros problemas de segurança encontrados nas grandes cidades, um sistema de comunicações aplicado à rede de transporte pode possibilitar a criação de aplicações de segurança, tais como monitoramento de frota e alertas de emergência.

Tendo em vista todos esses pontos, o presente trabalho estuda a viabilidade do uso de uma rede de comunicações móvel no sistema de transporte rodoviário urbano, a qual pode promover acessibilidade e inclusão digital. Ao longo do trabalho são apresentadas tecnologias e topologias possíveis de serem utilizadas e será feita uma proposta de sistema. A comparação das diferentes tecnologias e topologias, que leva à proposta do sistema, será feita através de simulações, utilizando-se o *software* OPNET Modeler<sup>®</sup>. O Anexo I fornece uma visão geral deste programa, que é um simulador de eventos discretos capaz de simular redes de comunicações, como LANs (*local area networks*), WLANs (*wireless local area networks*), sistemas celulares, entre outras.

Dentre as opções avaliadas estão a rede celular GPRS (*general packet radio service*), o 3G, o WiMAX (*worldwide interoperability for microwave access*) e algumas redes de comunicações dedicadas. Cada uma dessas tecnologias possui características próprias que as tornam mais ou menos adequadas para aplicação em sistemas veiculares, que é o caso estudado neste trabalho. Em [2] é feito um extenso estudo de diversas dessas tecnologias e conclui-se que a opção que mais se adéqua a uma rede veicular como a que será estudada é uma VANET (*vehicular ad hoc network*) utilizando o padrão IEEE 802.11. Além disso, pode-se perceber uma tendência em artigos e congressos de se adotar essa solução para redes veiculares. Portanto, este trabalho focará o estudo desta solução.

Uma VANET é um tipo de rede *ad hoc*, na qual as informações a serem transmitidas são passadas de nó em nó até chegarem ao seu destino. Os nós podem ser ônibus, paradas de ônibus ou outros terminais. A movimentação dos ônibus torna a topologia da rede dinâmica, o que exige que a rede se reorganize constantemente e autonomamente, sem a necessidade de uma infraestrutura de controle. Esse fato faz com que a definição do protocolo de roteamento a ser utilizado tenha grande importância no desempenho do sistema. Em função disso, será feito um estudo dos protocolos disponíveis e, através de simulações, será determinado qual é o mais adequado.

Outra consequência da natureza dinâmica desta rede é a variação da densidade de nós. Existem momentos em que há a presença de vários ônibus entre uma parada e outra e momentos em que não há nenhum. Consequentemente, torna-se necessário determinar características como alcance médio de comunicação e probabilidade de comunicação a diversas distâncias para verificar o funcionamento do sistema nas diversas situações. Para que esta análise seja precisa, será feito um estudo das características do canal rádio móvel, assim como simulações de sua influência no desempenho do sistema.

Devido à possibilidade de haver momentos em que a cobertura da rede VANET seja insuficiente para o bom funcionamento do sistema, será feito um estudo da necessidade do uso de uma rede secundária para lhe oferecer maior confiabilidade. Como rede secundária será estudada a rede celular UMTS (*universal mobile telecommunications system*), devido ao fato de ser uma rede que oferece uma boa cobertura em áreas urbanas e já possuir infraestrutura instalada.

Por fim, sistemas similares já existem em diferentes localidades do mundo e do Brasil, sendo uma questão de tempo para que Brasília e outras cidades passem a adotá-los. Entretanto, a maioria desses sistemas é baseada na tecnologia GPRS ficando, portanto, dependente dos custos da utilização dessa rede. O foco desses sistemas é principalmente a administração da frota de ônibus, não oferecendo serviços de acessibilidade e inclusão digital aos usuários. Caso estes serviços sejam implementados, o tráfego de dados na rede aumenta consideravelmente, o que eleva os custos do sistema. Logo, neste contexto surge a necessidade da implantação de uma rede própria para o sistema de transporte rodoviário, como o que será estudado ao longo deste trabalho.

Este trabalho é dividido da seguinte forma: o capítulo 1 contém os objetivos e a visão geral do trabalho; o capítulo 2 apresenta descrição detalhada do sistema proposto e das formas como ele pode ser implantado, além de descrever sistemas semelhantes já implantados; o capítulo 3 apresenta um estudo sobre aspectos de redes VANET, incluindo padrões de comunicação sem fio e protocolos de roteamento. Também é apresentado um estudo sobre aspectos da propagação e desvanecimento do canal rádio-móvel para este sistema; o capítulo 4 detalha o sistema UMTS, abordando a arquitetura, interface aérea e canais; o capítulo 5 descreve o modelamento do sistema e apresenta resultados e análise das simulações realizadas para a sua validação. Finalmente, são feitas as conclusões do trabalho e as sugestões para trabalhos futuros.

## 2 DESCRIÇÃO DO SISTEMA

*Neste capítulo é descrito o sistema proposto, partindo de considerações a respeito dos serviços que se deseja oferecer e da análise de sistemas já implantados que oferecem recursos similares.*

### 2.1 INTRODUÇÃO

Deseja-se que o sistema a ser proposto melhore a qualidade do transporte coletivo rodoviário urbano. Para se chegar a uma proposta desse sistema, inicialmente são estudados os serviços e aplicações que se deseja oferecer. Em seguida são examinados sistemas similares já implantados, observando-se as tecnologias utilizadas e os serviços oferecidos. Um breve estudo de redes VANET é realizado em seguida para embasar a escolha dessa tecnologia na proposição do sistema. Finalmente apresenta-se uma visão geral da proposta, detalhando o funcionamento e as topologias que serão verificadas no decorrer deste trabalho.

### 2.2 APLICAÇÕES DESEJADAS

Para melhorar a qualidade e a acessibilidade do sistema de transporte público, e promover a inclusão digital aos usuários, são propostas quatro tarefas principais a serem executadas pelo sistema.

A primeira é a disponibilização de informações a respeito das linhas de ônibus aos passageiros. O sistema deve permitir que os usuários saibam quanto tempo falta para o próximo ônibus de determinada linha chegar à parada na qual irá aguardá-lo. Tais informações devem ser disponibilizadas em *sites* na Internet, em *displays* nas paradas de ônibus, pelo serviço SMS (*short message service*) e por outros possíveis meios de comunicação.

A segunda tarefa serve para conferir maior segurança. Os dados enviados pelos veículos devem conter *flags* que informam a respeito de defeito mecânico, perigos na pista ou ocorrência de acidentes na via.

De posse das informações dos veículos, o sistema pode executar uma terceira atividade, informando aos usuários as condições do tráfego em diversas vias da cidade. A ocorrência de baixas velocidades em muitos ônibus localizados em um mesmo trecho permite ao sistema identificar um possível engarrafamento no local.

Uma última tarefa seria a disponibilização de serviços típicos de Internet através da rede de ônibus, proporcionando aos usuários navegar por *websites*, por exemplo, entre outras aplicações.

No sistema, os dispositivos de comunicação a serem instalados nos ônibus e paradas devem ser integrados com equipamentos que forneçam acessibilidade aos portadores de necessidades especiais, como sistemas de informação sonoros, sistemas audiovisuais, entre outros.

Para que possam ser definidos os elementos necessários à implantação de um sistema que ofereça esses recursos, na próxima seção são descritos sistemas já implantados que oferecem aplicações semelhantes.

## 2.3 SISTEMAS EXISTENTES

Alguns sistemas já implantados no Brasil e em outros países oferecem serviços e aplicações similares aos passageiros. A seguir, com o objetivo de se mostrar a tecnologia utilizada e os recursos disponibilizados por esses sistemas, são brevemente descritas quatro implementações.

- Projeto GEOSIT (monitoramento *online* do sistema integrado de transporte) – Uberlândia:

Existente desde 2003, o projeto GEOSIT[3] controla todo o perímetro urbano de Uberlândia ampliando as decisões da Secretaria Municipal em nível de fiscalização e planejamento. Módulos de posicionamento que utilizam as tecnologias GPS (*global positioning system*) para localização e GPRS para a transmissão de dados foram instalados em aproximadamente 450 veículos que rodam por aproximadamente 100 rotas de ônibus. As transmissões ocorrem em cada um dos 2.000 pontos de paradas espalhados pelas diferentes rotas, gerando cerca de 800 mil registros de posição por dia o que equivale a aproximadamente 3 GB de dados por mês. O custo estimado do sistema é de aproximadamente 200 reais por mês para cada veículo. O projeto disponibiliza um *site* onde é possível visualizar a posição que o ônibus de cada rota se encontra na trajetória.

- CITFOR (Controle Integrado de Transportes de Fortaleza):

O sistema CITFOR [4] está sendo implantado na cidade de Fortaleza. O objetivo é realizar a gestão e monitoramento de frotas e disponibilizar informações aos passageiros em tempo real. O sistema funciona a partir de um receptor GPS nos ônibus que transmitem os dados de localização à central via GPRS. A central analisa os dados e repassa as mensagens para painéis de mensagens e para o sistema de priorização de semáforos que funciona da seguinte forma: caso o sistema identifique que um dos ônibus esteja atrasado, essa informação é repassada para o controle de semáforos para que este veículo tenha prioridade nos cruzamentos onde esteja passando. As figuras abaixo mostram o sistema CITFOR. A Figura 2.1, mostra fotos com o letreiro digital dentro do ônibus indicando a próxima parada e o letreiro digital das paradas, indicando os próximos ônibus que chegarão.



Figura 2.1. Fotos da rede CITFOR [4]

- NextBus – Estados Unidos

O sistema NextBus [5] é utilizado em mais de cinquenta cidades nos Estados Unidos. Este sistema também utiliza as tecnologias GPS para localização dos veículos e GPRS para a transmissão de dados. As informações são disponibilizadas para os usuários através de painéis públicos, de *websites* e de serviços telefônicos. A Figura 2.2 ilustra este sistema.

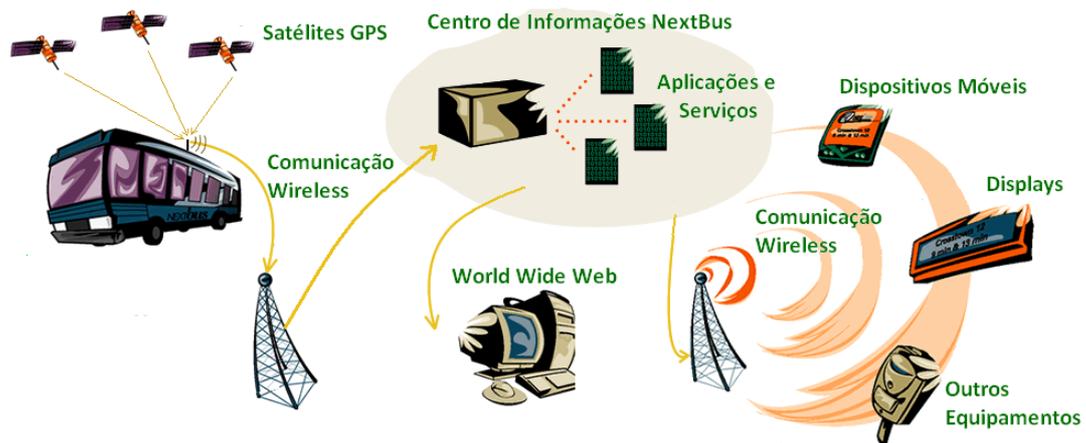


Figura 2.2. Esquema do sistema NextBus. Adaptada de [5].

- HelMi – Finlândia

No sistema HelMi [6], em Helsinki, na Finlândia, é utilizada uma rede de rádio pertencente à cidade. Três estações-base localizadas em pontos altos da cidade garantem a cobertura. São utilizadas seis frequências diferentes: três para os ônibus da rede, um para sinal de prioridade, um para atualização dos *displays* dos ônibus e paradas e um para manutenção dos dados durante a noite. Trezentos veículos, equipados com computadores e *modems* de rádio *on-board*, podem ser monitorados simultaneamente. A Figura 2.3 ilustra este sistema.

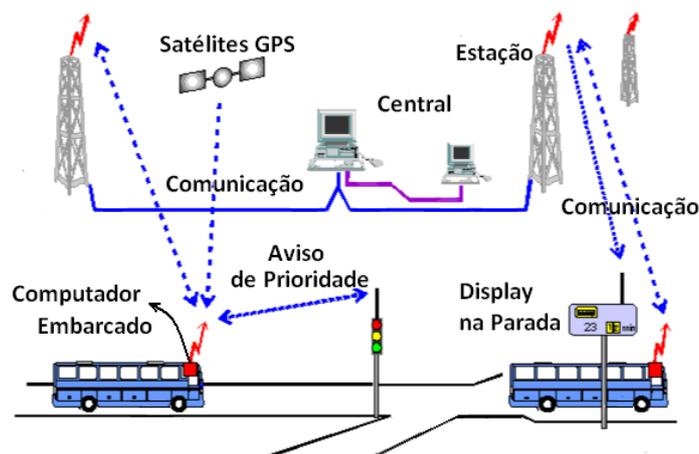


Figura 2.3. Esquema do sistema HelMi. Adaptada de [6].

Considerando essas informações, verifica-se que três dos quatro sistemas já implantados são dependentes da infraestrutura e dos custos de utilização do sistema celular. O último sistema apresentado, o HelMi, por sua vez, também depende de uma infraestrutura de grande porte, uma vez que utiliza três torres para conseguir cobertura da cidade.

## 2.4 VANETS

As VANETs (*vehicular ad hoc networks*) são redes móveis *ad hoc* em ambientes veiculares. Essas redes têm despertado grande interesse e despontam como uma das tecnologias fundamentais dos futuros automóveis. Esse interesse se deve a diversas possíveis aplicações e serviços utilizáveis em um ambiente veicular. Exemplos destes serviços são: prover maior segurança e conforto ao motorista; aumentar o grau de automação na condução do veículo; prevenir engarrafamentos; e realizar o planejamento de tráfego. O sucesso dessas aplicações depende da troca de dados entre veículos (*inter-vehicle communication – IVC*) e entre veículos e dispositivos auxiliares ao longo das ruas (*road vehicle communication – RVC*).

Uma característica intrínseca e singular das VANETs é que elas são extremamente dinâmicas, isto é, sua topologia – a distribuição dos nós no espaço e suas respectivas interfaces de comunicação – varia muito rapidamente. Os veículos, sendo eles os nós constituintes dessas redes, possuem grande mobilidade e podem se deslocar a altas velocidades. Esta característica, somada ao ambiente urbano, com prédios, carros, árvores e interferência, representa um verdadeiro desafio à implantação de sistemas de comunicação veiculares.

Atualmente está sendo desenvolvido um padrão para uso em redes veiculares. O padrão, denominado 802.11p, e conhecido como WAVE (*wireless access in vehicle environments*), é uma extensão do 802.11, que é o padrão do IEEE (*institute of electrical and electronic engineers*) para redes locais sem fio.

## 2.5 SISTEMA PROPOSTO

Com base nos serviços que se pretende oferecer, no estudo dos sistemas similares já implantados e no estudo de redes VANET, optou-se por propor um sistema baseado em uma VANET. A escolha de uma rede veicular tem como principal vantagem a independência em relação aos custos de uso do sistema celular e a possibilidade de oferecer outros serviços aos passageiros. A seguir é apresentada uma visão geral da topologia e dos elementos que compõem o sistema.

### 2.5.1 SISTEMA CENTRALIZADO

O processamento e o armazenamento de dados gerados por uma grande quantidade de veículos demandam a definição de uma Central. A Central deve ser compreendida como uma entidade responsável por receber, armazenar e processar todos os dados gerados pelos ônibus. O processamento inclui operações que envolvem o cálculo da estimativa do tempo de chegada, a verificação de engarrafamentos e a disponibilização dessas informações na Internet, por SMS e outros possíveis meios de comunicação. A Central também atua como transmissora de dados, enviando para as paradas o tempo estimado de chegada de cada ônibus.

A Figura 2.4 ilustra o sistema proposto. Nessa figura, ônibus e paradas estão representados, respectivamente, por nós móveis e nós fixos. O nó apoio é na verdade um repetidor, a ser posicionado em trechos nos quais a distância entre nós fixos adjacentes for maior do que o alcance dos transceptores utilizados.

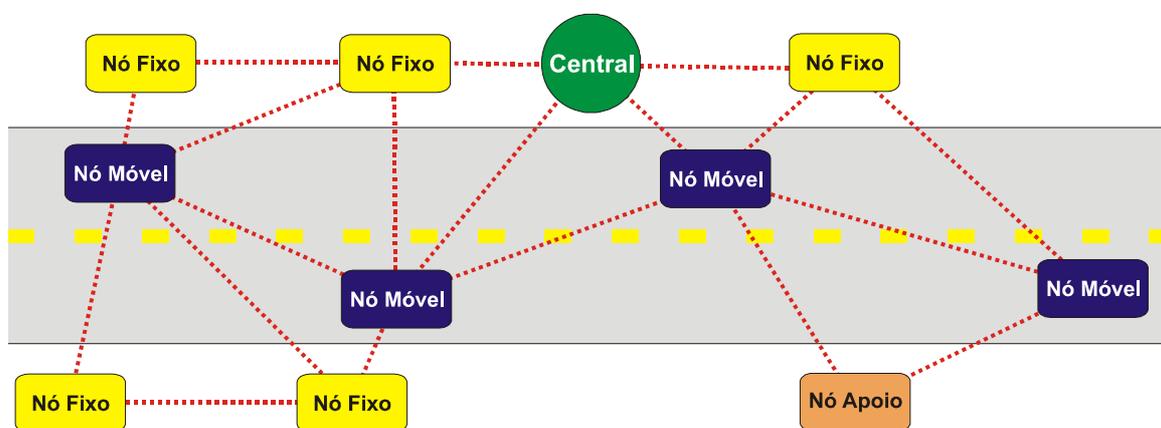


Figura 2.4. Sistema proposto sem pontos de acesso à Central

Para se comunicarem, Central, ônibus e paradas são equipados com dispositivos de transmissão e recepção sem fio. Nessa comunicação, as informações geradas pelos ônibus serão sempre destinadas à Central. Os dados serão processados na Central e então encaminhados às paradas.

As mensagens conterão dados como identificação da estação, *flags* de alerta, posição e velocidade, os dois últimos fornecidos por receptor GPS.

### 2.5.2 SISTEMA CENTRALIZADO COM PONTOS DE ACESSO

Uma segunda topologia para o sistema proposto é obtida com a colocação de pontos de acesso até a Central. Estes pontos de acesso seriam paradas especiais em comunicação direta com a central. O uso de pontos de acesso tem como objetivo evitar que a ocorrência de congestionamento da rede e diminuir a quantidade de saltos realizados por um pacote até o seu destino.

A Figura 2.5 ilustra o sistema proposto com a utilização de pontos de acesso. No esquema, são mostrados dois pontos de acesso. Assume-se que a conexão entre o ponto de acesso e a Central é um *link* de alta capacidade e que o destino das mensagens dos nós móveis é sempre o ponto de acesso mais próximo à sua posição atual.

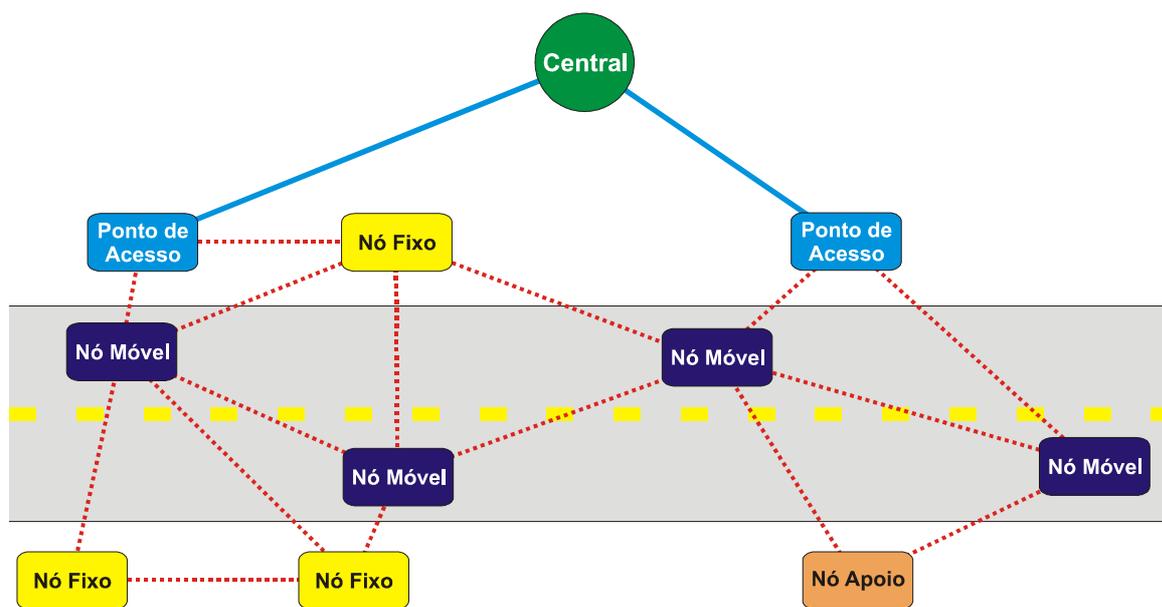


Figura 2.5. Sistema proposto com pontos de acesso à Central

### 2.5.3 SISTEMA SECUNDÁRIO

No trabalho, será verificada a necessidade de se colocar o sistema celular 3G como suporte à rede, atuando quando a rede veicular não atender os requisitos necessários para executar as aplicações propostas ou quando não houver cobertura. Utilizando o sistema secundário, o sistema assume a forma mostrada na Figura 2.6.

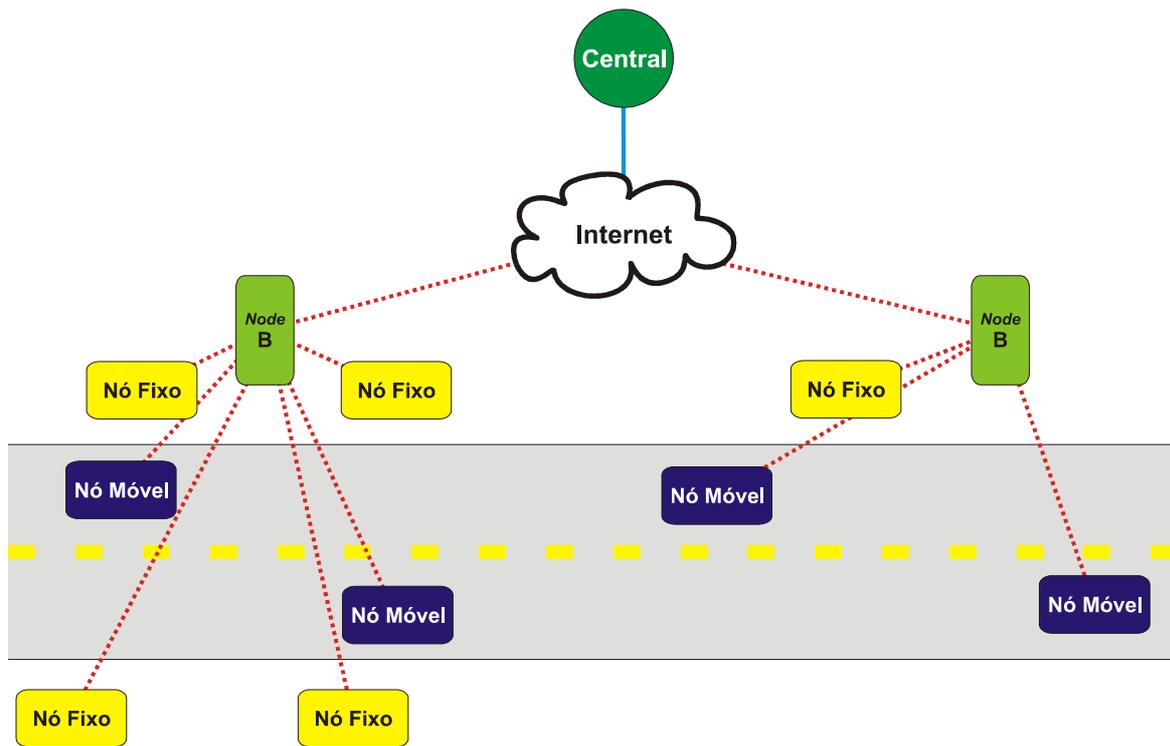


Figura 2.6. Sistema secundário

## 2.6 CONCLUSÃO

Existem diferentes formas e diferentes tecnologias existentes para a criação de um sistema de comunicação móvel aplicado ao transporte coletivo rodoviário urbano. Neste capítulo, a análise dos serviços desejados e de sistemas similares existentes levou a definição de uma proposta de sistema. Nos próximos capítulos serão estudadas as tecnologias a serem empregadas neste sistema e, posteriormente, validadas as topologias e o emprego das tecnologias escolhidas.

## 3 REDES VANETS

*Neste capítulo são apresentados os aspectos pertinentes a redes VANET utilizados na avaliação do sistema proposto.*

### 3.1 REDES IEEE 802.11

A transmissão de dados entre os nós de uma rede sem fio é uma necessidade básica para o sistema proposto. A demanda cada vez maior por conectividade tem exigido o desenvolvimento de um padrão de comunicação para ambientes móveis que possua grande alcance e baixos atrasos. Várias tecnologias foram propostas nesse contexto, entretanto, existem diversos fatores que limitam suas aplicações.

Para que uma tecnologia seja adequada às aplicações estudadas neste trabalho, ela deve possibilitar a comunicação entre móveis e entre móveis e pontos fixos, sem que haja uma infraestrutura, ou seja, em modo *ad hoc*. Isto exclui grande parte das tecnologias existentes, pois sistemas móveis banda larga, como o WiMAX (*worldwide interoperability for microwave access*), o UMTS (*universal mobile telecommunication system*) e outros padrões DSRC (*dedicated short-range communications*), permitem a comunicação apenas entre uma estrutura central e um móvel, não permitindo a comunicação direta de dados entre dois móveis em modo *ad hoc* [2].

Dentre os diversos padrões propostos, o que mais se destaca e está sendo adotado mundialmente é o WAVE (*wireless access in vehicular environment*), no qual a camada física e a subcamada MAC (*media access control*) são especificadas pelo padrão IEEE 802.11p. Este padrão, ainda em desenvolvimento, visa permitir o estabelecimento de comunicação entre nós separados em até mil metros de distância e com o mínimo de *overhead* e atraso possíveis. O 802.11p está sendo desenvolvido com base no padrão IEEE 802.11a, com algumas alterações para possibilitar a aplicabilidade em ambientes de alta mobilidade [7].

O conhecimento da tecnologia utilizada pelo sistema é fundamental para que a análise da viabilidade e o dimensionamento da rede sejam precisos. Esta seção descreve com detalhes o padrão IEEE 802.11 e suas extensões 802.11a e 802.11p.

#### 3.1.1 A FAMÍLIA IEEE 802.11

O padrão IEEE 802 especifica uma série de características para uma Rede Local (LAN – *local area network*), focando-se nas duas primeiras camadas do modelo OSI (*open systems interconnection*): A camada física (PHY – *physical layer*) e a camada de enlace de dados.

Especificações individuais na série 802 são identificadas por um número secundário. O padrão IEEE 802.2 especifica a subcamada LLC (*logical link control*) da camada de enlace, que é responsável pelo gerenciamento da comunicação entre os dispositivos de um enlace. A subcamada LLC juntamente com a subcamada MAC formam a versão IEEE da camada de enlace.

O padrão IEEE 802.11, também chamado de Wi-Fi, faz parte dessa família e possibilita o acesso sem fio a redes 802, utilizando o encapsulamento LLC/802.2. Para trabalhar com ondas de rádio, o padrão 802.11 requer especificações complexas e precisas. Além de incorporar novos atributos à subcamada MAC, a camada PHY é dividida em dois componentes: O PLCP (*physical layer convergence procedure*) e o PMD (*physical medium dependent*). O PMD realiza funções relacionadas à radiofrequência como modulação, demodulação e amplificação, e é responsável pela transmissão e recepção desses sinais. Já o PLCP faz a formatação dos quadros para transferência entre as subcamadas MAC e PMD [8]. A Figura 3.1 ilustra a subdivisão IEEE das duas primeiras camadas do modelo OSI.

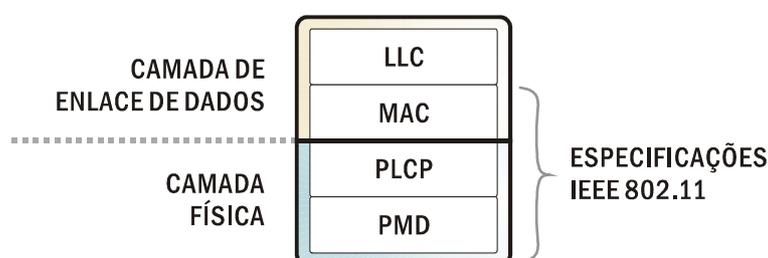


Figura 3.1. Subdivisão IEEE das duas primeiras camadas do modelo OSI

A camada física do 802.11 foi originalmente especificada para utilizar uma das duas técnicas de espalhamento espectral: FHSS (*frequency hopping spread spectrum*) ou DSSS (*direct sequence spread spectrum*). Revisões posteriores adicionaram novas técnicas às camadas físicas. A extensão 802.11b especifica uma sequência direta de alta taxa chamada HR/DSSS (*high rate DSSS*). A técnica OFDM (*orthogonal frequency division multiplexing*) foi adicionada pelas extensões 802.11a, que opera nas faixas de 2,4 e 5 GHz, e 802.11g, que opera na faixa de 2,4 GHz e é compatível com o padrão 802.11b. A extensão 802.11n adiciona a tecnologia MIMO (*multiple input multiple output*) e opera também em OFDM, nas faixas de 2,4 e 5 GHz.

Outras extensões do padrão IEEE 802.11 foram desenvolvidas para agregar novas funcionalidades ou atender a requisitos regulatórios de diferentes países. O padrão IEEE 802.11e adiciona qualidade de serviço (QoS – *quality of service*), enquanto o 802.11i aperfeiçoa funções de segurança da rede. O *draft* IEEE 802.11p é próprio para aplicações veiculares, enquanto o *draft* 802.11s é utilizado para redes *mesh*. Uma descrição completa das extensões disponíveis do padrão IEEE 802.11 pode ser encontrada em [9].

### 3.1.2 TIPOS DE REDES 802.11

O bloco básico de construção de redes 802.11 é o BSS (*basic service set*) que é formado por um grupo de estações com alcance direto que se comunicam. Existem dois modos de operação de BSSs, o modo “Infraestrutura” e o modo “*ad hoc*” ou modo “IBSS” (*independent BSS*), como ilustrado na Figura 3.2.

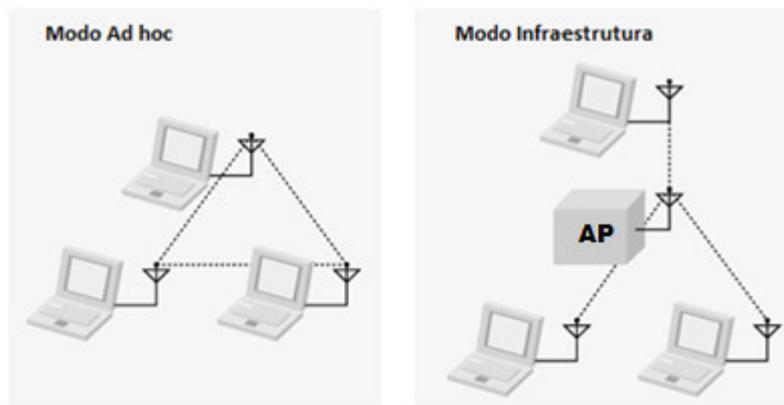


Figura 3.2. Modos de operação de um BSS. Adaptada de [8].

O modo Infraestrutura é definido pela utilização de pontos de acesso (AP – *access point*). Estes dispositivos são responsáveis pela gerência de toda a comunicação das estações, incluindo a comunicação entre duas estações móveis em um mesmo BSS.

Estações em modo *ad hoc* comunicam-se diretamente umas com as outras, sem a necessidade de um AP. O padrão 802.11 não define nenhum tipo de roteamento entre as estações que só podem comunicar-se através de um único salto.

Em uma rede em modo Infraestrutura, as estações devem se associar a um único AP para obter serviços de rede. O procedimento de associação é sempre iniciado pela estação móvel e o AP pode permitir ou negar o pedido de associação. O padrão 802.11 não limita o número de estações móveis por AP. Este limite será determinado pelas características da rede [8].

Redes VANET operam em modo *ad hoc*, o que torna o padrão IEEE 802.11 adequado para atendê-las. Contudo, uma estratégia de roteamento é um requisito necessário para o seu funcionamento. Por este motivo, posteriormente neste capítulo, serão estudados protocolos de roteamento para redes *ad hoc* que utilizam diferentes estratégias de roteamento.

### 3.1.3 ÁREAS DE SERVIÇO ESTENDIDO

Para ampliar a área de cobertura de uma rede utilizando mais de um AP, o padrão 802.11 possibilita o encadeamento de BSSs através de um *backbone*, criando uma área de serviço estendido (ESS – *extended service set*). Todos os APs da ESS devem ter o mesmo “nome” na rede, ou seja, o mesmo SSID (*service set identifier*). Entretanto, o padrão não restringe a tecnologia de rede para o *backbone*. Os serviços de associação e reassociação possibilitam a um usuário 802.11 mover-se entre áreas BSSs adjacentes dentro de uma mesma rede ESS sem perder a conexão.

O grau máximo de abstração de uma rede 802.11 é a ESS. Os APs em uma ESS operam de forma a permitir que cada estação seja identificada pelo seu endereço MAC. Somente o AP a qual determinada estação esteja associada entregará o quadro correspondente para esta estação. A mobilidade entre BSSs dentro de uma mesma ESS é suportada. Entretanto, o padrão não suporta a transição de estações entre ESS.

A utilização de enlaces sem fio como parte do sistema de distribuição é possível através do sistema WDS (*wireless distribution system*) também chamado de *wireless bridge*. Dessa forma, duas ou mais LANs podem comunicar-se diretamente pelo meio sem fio através dos seus APs, sem necessitar de um *backbone* cabeado. Os APs WDS podem funcionar como estações base, conectadas à rede Ethernet; como repetidores, transmitindo dados entre estações distantes; ou como estações remotas e pontos de acesso às estações móveis ao mesmo tempo.

Para a utilização do modo WDS, todos os APs precisam estar utilizando o mesmo canal de frequência e o mesmo serviço de confidencialidade<sup>1</sup>. Pode-se configurar os APs com SSIDs iguais para formar uma única rede ou, alternativamente, usar SSIDs diferentes, formando redes distintas [8].

Como alternativa para o modo de operação *ad hoc*, é possível criar uma rede VANET através do sistema WDS. Nesta configuração, cada móvel transportará um AP que será interligado em *bridge* com os demais. O tamanho desse tipo de rede pode ser limitado, pois os fabricantes normalmente definem um número máximo de endereços MAC aos quais determinado AP pode se conectar em *bridge*. Contudo, o sistema WDS pode ser útil em ambientes de teste, já que APs comumente possuem potências de transmissão mais elevadas e antenas com maiores ganhos que estações comuns. Um possível protótipo para testes do sistema VANET proposto foi idealizado utilizando esta configuração.

### 3.1.4 FUNDAMENTOS DA SUBCAMADA MAC 802.11

A subcamada MAC contém importantes especificações do padrão IEEE 802.11. A MAC é o centro de controle de toda a operação de quadros e transmissão de dados pelo meio sem fio e realiza as tarefas de integração com o *backbone* cabeado.

O meio sem fio está sujeito a ruídos e interferências diversas. Devido a esta instabilidade, muitos erros podem ocorrer durante uma comunicação. O 802.11 é baseado no estilo Ethernet de múltiplo acesso e também utiliza o mecanismo CSMA (*carrier sense multiple access*) para fazer o controle de acesso ao meio. Entretanto, no ambiente sem fio, colisões podem degradar muito a capacidade de transmissão e em vez de detectar colisões como faz o padrão Ethernet através do CSMA/CD (*carrier sense multiple access with collision detection*), o 802.11 tenta prevenir essas colisões com o mecanismo CSMA/CA (*carrier sense multiple access with collision avoidance*).

---

<sup>1</sup> O serviço de confidencialidade fornece proteção contra escutas indevidas através de criptografia e outros métodos de proteção [8].

O acesso ao meio sem fio no padrão IEEE 802.11 é controlado por funções de coordenação. O CSMA/CA é usado pela “Função de Coordenação Distribuída” ou DCF (*distributed coordination function*). Esta função realiza a transferência assíncrona de dados. É um mecanismo de acesso distribuído, em que todos os tipos de estação utilizam o mesmo método para ganhar o meio, num modo *best-effort*, não existindo um controle centralizado como ocorre em redes celulares, por exemplo. Esta é uma característica importante para o estabelecimento de redes *ad hoc* que são essencialmente distribuídas.

Além da DCF que será a função de coordenação tratada neste trabalho, a subcamada MAC 802.11 especifica outros dois modos opcionais de acesso. A “Função de Coordenação Pontual” ou PCF (*point distributed coordination*) e a “Função de Coordenação Híbrida” ou HCF (*hybrid distributed coordination*).

A PCF é usada somente em sistemas no modo infraestrutura, pois necessita de pontos de coordenação, os quais residem nos APs. É uma função que possibilita o acesso ao meio sem disputa, adicionando prioridade sobre outros quadros.

A HCF permite adicionar diferentes níveis de prioridade aos quadros que trafegam na rede, balanceando o acesso ao meio em favor de aplicações que necessitam de uma melhor qualidade de serviço. Esta função é especificada pelo padrão 802.11e [10].

#### **3.1.4.1 O ACESSO AO MEIO**

As estações sem fio normalmente trabalham em *half-duplex*, não tendo a capacidade de transmitir e “escutar” o canal ao mesmo tempo. Assim, quando transmitem um quadro, para detectarem se houve colisão ou não, utilizam o mecanismo de “Reconhecimento Positivo”. Neste mecanismo, a transmissão de um quadro é seguida por um quadro de reconhecimento enviado pelo destino, denominado ACK (*acknowledgment*). Este quadro é enviado após um período de tempo bem especificado denominado SIFS (*short interframe space*). Todo o quadro enviado deve ser reconhecido através do ACK e havendo falha em qualquer parte da transmissão, o quadro inteiro é considerado perdido.

A sequência de enviar um quadro e receber o ACK de confirmação é chamada de “operação atômica” [8], e as estações de origem e destino tem a capacidade de garantir o controle do canal durante esta operação, evitando que outras estações interfiram tentando transmitir.

Os sistemas sem fio tem a característica de possuir fronteiras de cobertura pouco definidas e muitas vezes, a área de cobertura de um nó não é suficiente para alcançar todos os outros nós da mesma rede. Quando dois nós não podem comunicar-se entre si, mas ambos conseguem comunicar-se com um terceiro nó, ocorre o “problema da estação oculta”, conforme ilustrado na Figura 3.3.

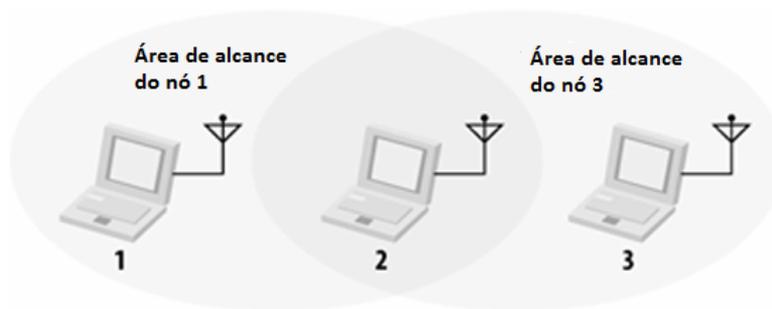


Figura 3.3. Problema da estação oculta. Adaptada de [8].

Nesta figura, se os nós 1 e 3 tentarem se comunicar com o nó 2 simultaneamente, muitas colisões poderão ocorrer já que um não sabe que o outro está transmitindo. Para minimizar este problema, o padrão IEEE 802.11 permite a adição de quadros RTS (*request to send*) e CTS (*clear to send*) à operação atômica. Desta forma, quando uma estação deseja transmitir, ela envia um quadro RTS requisitando o canal e contendo o tempo necessário para o quadro ser transmitido. Caso a estação de destino receba o RTS corretamente, ela enviará, após esperar um tempo igual ao SIFS, o quadro CTS de confirmação. A estação de origem, após receber o CTS, aguarda o tempo SIFS e envia o quadro de dados. Os mecanismos de RTS/CTS e reconhecimento positivo são ilustrados na Figura 3.4.

A vantagem de utilizar o RTS/CTS é que as estações “ocultas” podem receber um desses quadros de controle e aguardar o tempo especificado por eles sem transmitir, evitando que ocorram colisões.

O controle do tempo que uma estação deve aguardar antes de transmitir é feita através de um “Vetor de Alocação de Rede” ou NAV (*network allocation vector*). Todos os quadros transmitidos contêm um campo que indica o NAV, com o tempo (em microssegundos) que as estações pretendem utilizar o canal. O NAV inclui todo o tempo necessário para completar a operação atômica. Quando uma estação recebe um quadro, atualiza o valor do NAV e aguarda sem transmitir nem “escutar” o meio que estará ocupado. A estação então decrementa seguidamente o valor do NAV até chegar a zero, indicando que o meio está livre.

O NAV previne que a operação atômica seja interrompida por outras estações. A Figura 3.4 também mostra a temporização envolvida na operação atômica, indicando quando cada quadro é enviado pelas estações de origem e destino, e mostrando o NAV recebido por estações que não participam da transmissão.

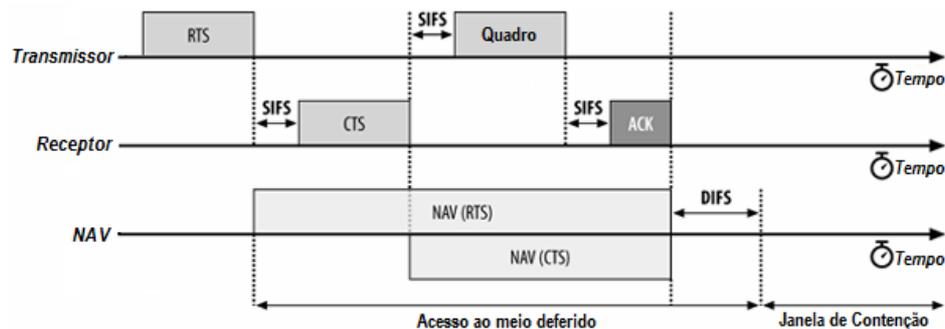


Figura 3.4. Utilização de RTS/CTS, ACK e NAV. Adaptada de [8].

Deve ficar claro que o uso do RTS/CTS é opcional e que o NAV é transmitido tanto nos quadros RTS, CTS e ACK quanto em quadros de dados. É possível configurar um valor limiar de RTS (*RTS threshold*), no qual o mecanismo de RTS/CTS só será utilizado para transmitir quadros com tamanho superior ao valor estipulado. Posteriormente neste trabalho são realizadas simulações específicas para avaliar o comportamento de enlaces com e sem a utilização do mecanismo de RTS/CTS. Além disso, é avaliada a influência do RTS/CTS na redução do *throughput* de uma rede, o que leva à escolha do valor limiar de RTS através de uma solução de compromisso.

Para mensagens enviadas em *broadcast* ou *multicast*, os mecanismos de RTS/CTS e ACK não são utilizados. Como o ACK finaliza a operação atômica, ao NAV transmitido por ele é atribuído o valor zero, indicando que o meio está livre.

Depois de concluída a operação atômica, todas as estações aguardam um tempo de espera igual ao DIFS (*DCF interframe space*) e em seguida, caso queiram transmitir, entram em uma disputa pelo meio denominada “Janela de Contenção” que adota um esquema de *backoff* aleatório.

A janela de contenção é formada por um número de segmentos de tempo denominado *CW* (*contention window*). Cada segmento deve ter duração fixa e suficiente para permitir a transmissão de uma estação e o recebimento do quadro pelas demais estações. Passado o DIFS, cada estação escolherá um dos *CW* segmentos de tempo de acordo com uma distribuição uniforme, e esperará para começar a transmitir naquele segmento. A estação que escolher o segmento de tempo de menor índice ganhará a disputa e transmitirá primeiro que as outras, reservando o meio para si. Caso duas estações escolham o mesmo número aleatório do segmento, haverá colisão. Quando isto ocorre, a duração da janela de contenção é dobrada e uma nova disputa se inicia. O primeiro valor da janela de contenção é definido como  $CW_{MIN}$  e pode ser dobrado até um limite definido por  $CW_{MAX}$ . Quando uma transmissão ocorre com sucesso, ou quando o número máximo de retransmissões é alcançado, o número de segmentos da janela de contenção retorna para o valor inicial. Também há um limite para o número máximo de tentativas de retransmissão que pode ser configurado de acordo com as características do sistema. Se esse número for ultrapassado e a estação de origem não receber o ACK, o quadro é descartado [10].

São definidos cinco tempos de espera entre quadros. Já foram mencionados o SIFS e o DIFS, e ainda estão definidos o tempo PIFS (*PCF interframe space*), o EIFS (*extended interframe space*) e o AIFS (*arbitrary interframe space*). Cada tempo de espera é utilizado para estabelecer uma prioridade diferente para as operações. O EIFS e o AIFS não possuem duração fixa, porém tem duração sempre maior que o DIFS. A relação entre os tempos de espera fixos é mostrada na Figura 3.5.

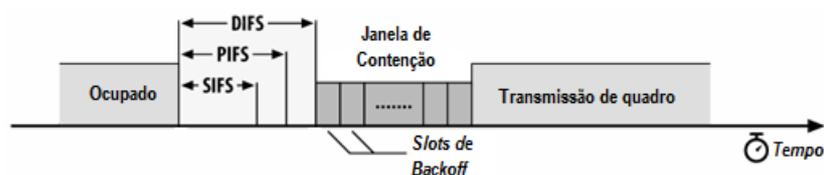


Figura 3.5. Relação entre tempos de espera entre quadros. Adaptada de [8].

Como o SIFS é o menor tempo de espera, ele tem a maior prioridade, e é utilizado dentro da operação atômica em conjunto com o NAV para garantir o controle do meio.

O PIFS é utilizado em operações livres de disputa, coordenadas pela função PCF e permite atribuir prioridade maior a quadros de dados específicos.

O EIFS é utilizado quando ocorre um erro na transmissão de um frame. Não está representado na Figura 3.5 porque, assim como o AIFS, não possui uma duração fixa. Seu tempo é a soma do SIFS, DIFS e do tempo de ACK, este último, dependente da taxa de transmissão.

O AIFS é utilizado pela função HCF para atribuição de QoS e possui diferentes durações, dependendo da prioridade das classes de tráfego. Entretanto, como esse tempo é sempre maior que o DIFS, dispositivos que utilizam as funções DCF ou PCF sempre terão prioridade maior em relação aos que utilizam a função HCF [10].

Para a transmissão de quadros maiores que um determinado limiar, o padrão IEEE 802.11 especifica um procedimento de fragmentação que permite “quebrar” os quadros em pedaços menores. A interferência afetará dessa forma uma menor quantidade de dados de cada vez, o que pode melhorar o desempenho de redes que estão sujeitas a muita interferência.

Os fragmentos são transmitidos em rajada. Para que a estação transmissora mantenha o controle do meio até completar a transmissão de todos os fragmentos, uma combinação de SIFS e NAVs é utilizada. Além disso, cada fragmento deve ser reconhecido positivamente através do ACK enviado pelo receptor. Somente o último ACK enviado, relativo ao último fragmento, configura o NAV com valor zero, indicando o fim da rajada e liberação do meio [8].

### 3.1.4.2 FORMATAÇÃO DO QUADRO MAC

Para atender às necessidades da transmissão de dados através do meio sem fio, a subcamada MAC precisou adaptar seus quadros acrescentando e retirando campos do quadro MAC do padrão Ethernet. A Figura 3.6 apresenta os campos básicos de um quadro MAC 802.11. Nesta figura há a indicação do comprimento de cada campo, medido em *bytes*.



Figura 3.6. Quadro MAC 802.11 genérico. Adaptada de [8].

A transmissão do quadro é feita a partir do campo “*Frame Control*”, finalizando com a transmissão do campo “*FCS – frame check sequence*”.

O campo de controle de quadro (*Frame Control*) indica a versão do protocolo e o tipo de quadro que está sendo enviado, que pode ser quadro de dados, de controle ou de gerenciamento. O subtipo do quadro também é informado.

O campo “*Duration/ID*” informa a duração do NAV, ou seja, o tempo em microssegundos que o meio permanecerá ocupado. Quando um modo especial de economia de energia está habilitado, o modo “*Power Saving*”, as estações ociosas entram em um estado de hibernação. Periodicamente elas “acordam” e enviam quadros destinados ao AP para recuperar quaisquer mensagens armazenadas no *buffer* por ele. Nesta situação, este campo pode ser parte de um quadro de controle, informando a identidade do AP ao qual a estação estava associada antes de “adormecer”.

O quadro MAC 802.11 possui até quatro campos de endereço. O endereçamento segue a mesma convenção do padrão IEEE 802. São formados por 48 *bits* que indicam um endereço IEEE MAC. Para endereços *unicast*, o primeiro *bit* é marcado como 0. Se o endereço for *multicast*, este *bit* será 1, e no caso *broadcast*, todos os *bits* serão marcados com 1. Dependendo do tipo de quadro que está sendo enviado, cada um dos endereços pode ter um significado, que pode ser o endereço de origem, de destino, do transmissor, do receptor ou o BSSID (*basic service set identifier*) do AP. Este último representa o endereço MAC utilizado pela interface sem fio do AP. Maiores detalhes sobre os endereços utilizados por cada tipo de quadro podem ser encontrados em [8].

O campo de controle de sequência (*sequence control field*) é utilizado para a desfragmentação e para o descarte de quadros duplicados. Este campo indica o número de sequência do quadro e o número do fragmento. Caso um pacote de uma camada superior precise ser fragmentado, todos os fragmentos deste pacote terão o mesmo número de sequência.

O campo de dados (*frame body*) encapsula os pacotes provenientes de camadas superiores, que então são tratados como dados para a subcamada MAC. O tamanho máximo do campo de dados dependerá do MSDU (*MAC service data unit*).

A sequência de verificação de quadro (FCS – *frame check sequence*) possibilita que as estações verifiquem a integridade dos quadros recebidos através de um procedimento matemático baseado na verificação de redundância cíclica. O cálculo inclui todos os campos do quadro MAC. Para a verificação, a estação transmissora calcula o FCS e envia o quadro para a estação receptora, que ao recebê-lo, recalcula este valor. Caso os valores do FCS não coincidam, o quadro é descartado. Como não há um reconhecimento negativo, a estação transmissora aguardará o *timeout* do ACK para efetuar a retransmissão [8].

### **3.1.5 CAMADA FÍSICA 802.11a**

O padrão IEEE 802.11a adota uma camada física baseada na tecnologia OFDM (*orthogonal frequency division multiplexing*) operando em torno da frequência de 5 GHz. Esta técnica divide o canal de transmissão de 20 MHz, no caso do 802.11a, em 64 subcanais, ou subportadoras ortogonais, de 312,5 kHz cada um. Dessas 64 subportadoras, 52 são utilizadas, sendo 48 para transmissão de dados e as 4 restantes são usadas como subportadoras piloto para funções de controle, referência aos deslocamentos de fase e frequência que ocorrem durante a transmissão do sinal e estimação do canal [8].

A divisão do canal é realizada utilizando subportadoras ortogonais de modo que, na frequência em que ocorre o maior pico de amplitude de cada subportadora, não haja interferência das subportadoras restantes. Dessa forma, não é necessário reservar banda de guarda para a transmissão, aumentando a eficiência espectral [8]. Um exemplo de ortogonalidade na frequência pode ser vista na Figura 3.7.

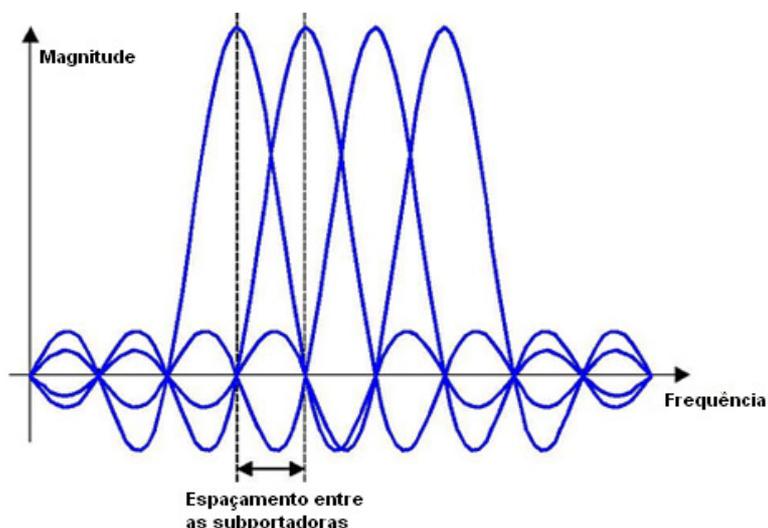


Figura 3.7. Exemplo de ortogonalidade em frequência. Adaptada de [8].

Esse tipo de sistema é mais robusto a canais seletivos em frequência, sem utilizar complexos filtros de equalização [11]. Isso ocorre já que cada subportadora ocupa uma largura de banda estreita, com isso, o canal visto pela subportadora pode ser aproximado por um canal plano em frequência. Além disso, com o OFDM a interferência inter-simbólica (IIS) não é um problema significativo [11], mas em compensação, pequenos desvios de frequência podem causar interferência entre as subportadoras. Esse fenômeno é chamado de interferência inter-portadoras (IIP). Os desvios de frequência podem ocorrer devido ao efeito Doppler ou devido a pequenos problemas de sincronismo de frequências entre transmissor e receptor [8].

Para reduzir a IIS e a IIP, o transmissor OFDM reserva o início do período de símbolo como tempo de guarda e realiza a transformada de Fourier somente na porção de símbolo fora do tempo de guarda, como mostrado na Figura 3.8.

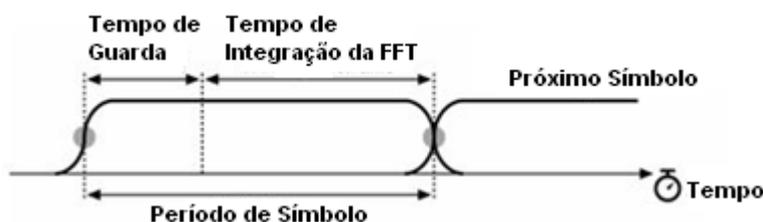


Figura 3.8. Composição do Símbolo OFDM do padrão IEE 802.11a. Adaptada de [8].

A introdução do tempo de guarda, apesar de reduzir a interferência, reduz o *throughput* do sistema, pois aumenta o tempo necessário para a transmissão do símbolo. No padrão IEEE 802.11a o tempo de

guarda é implementado por prefixo cíclico. Esta técnica consiste em copiar o final do símbolo OFDM para o início do mesmo, evitando discontinuidades temporais[11]. O padrão IEEE 802.11a estabelece um período de símbolo de 4  $\mu$ s, sendo 0,8  $\mu$ s de prefixo cíclico e 3,2  $\mu$ s de período de integração da FFT [8].

Na Figura 3.9 pode-se observar a estrutura de um canal OFDM de 20 MHz em que as subportadoras são numeradas de -26 a 26 em torno da frequência central, as subportadoras -21, -7, 7 e 21 são utilizadas como piloto:

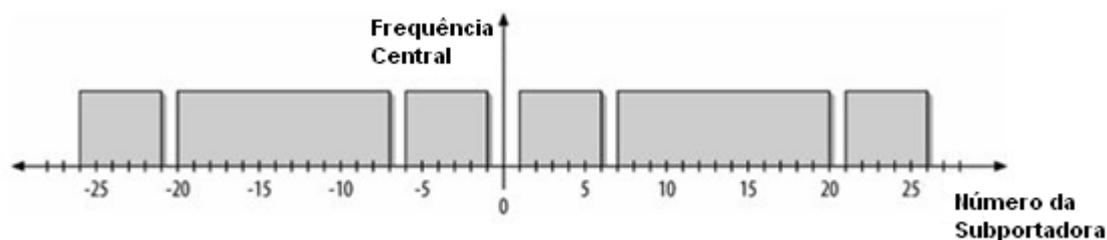


Figura 3.9. Subportadoras OFDM utilizadas pelo padrão IEEE 802.11a. Adaptada de [8].

Apesar do padrão IEEE 802.11a utilizar uma taxa de transmissão de símbolo constante e igual a 250 mil símbolos por segundo através das 48 subportadoras, ele oferece várias taxas de transmissão de *bits*, baseadas na técnica de modulação e na taxa de codificação. São elas: 6, 9, 12, 18, 24, 36, 48 e 54 Mbps. A Tabela 3.1 mostra a relação entre o esquema de modulação, taxa de codificação de erro e a taxa de transmissão. A codificação utilizada pelo 802.11a é do tipo convolucional [8]. Foram realizados estudos para determinar quais as taxas de transmissão adequadas para o sistema proposto.

Tabela 3.1. Taxas de transmissão utilizadas pelo padrão IEEE 802.11a

Taxa (Mbps)	Modulação	Taxa de Codificação	Bits por subportadora	Bits de dados transmitidos nas 48 subportadoras	Total de bits transmitidos nas 48 subportadoras
6	BPSK	1/2	1	24	48
9	BPSK	3/4	1	36	48
12	QPSK	1/2	2	48	96
18	QPSK	3/4	2	72	96
24	16-QAM	1/2	4	96	192
36	16-QAM	3/4	4	144	192
48	64-QAM	2/3	6	192	288
54	64-QAM	3/4	6	216	288

A camada física OFDM adiciona ao quadro vindo da subcamada MAC um preâmbulo. Este é necessário para sincronizar vários temporizadores entre transmissor e receptor. É constituído de 12 símbolos OFDM, sendo que os dez primeiros são uma sequência treinamento curta, com duração de 8  $\mu$ s (0,8  $\mu$ s por símbolo), transmitida sem tempo de guarda. Os outros dois símbolos compõem uma sequência de treinamento longa, com duração de 8  $\mu$ s (4  $\mu$ s por símbolo), transmitida com tempo de guarda. Depois do preâmbulo, um símbolo OFDM transmite o campo do Sinal, que contém parte do

cabeçalho PLCP. Em seguida é utilizado um número variável de símbolos para transmitir os dados e finalmente encerra-se o quadro com o *trailer* [8]. Na Figura 3.10 pode-se ver o formato do preâmbulo seguido do campo de sinal e do primeiro símbolo de dados:

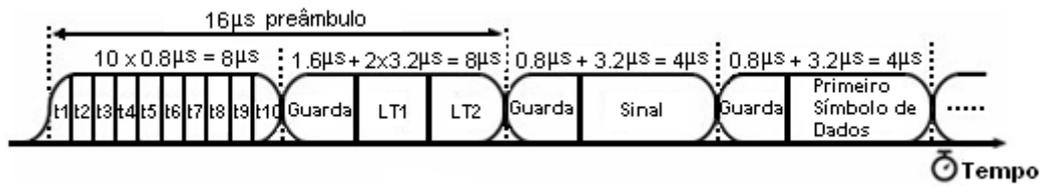


Figura 3.10. Formato do preâmbulo do 802.11a. Adaptada de [8].

Tanto o preâmbulo, quanto o campo do sinal são transmitidos a uma taxa de 6 Mbps utilizando BPSK, com taxa de codificação 1/2, independentemente da taxa de transmissão que os dados serão transmitidos. A Figura 3.11 mostra o formato do quadro 802.11a.

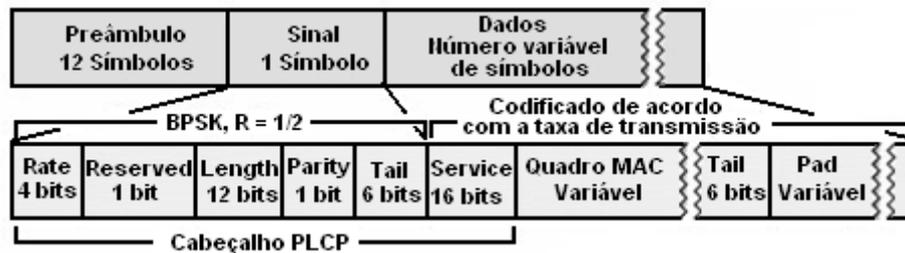


Figura 3.11. Formato do quadro 802.11a. Adaptada de [8].

O cabeçalho PLCP é transmitido no campo do sinal, com exceção do campo *Service* que é transmitido juntamente com os dados. O cabeçalho é dividido em [8]:

- *Rate* (4 bits): Informa qual é a taxa de transmissão utilizada para o quadro MAC.
- *Length* (12 bits): Especifica o número de *bytes* do quadro MAC. Sendo que o quadro MAC deve possuir um tamanho máximo de 4095 *bytes*.
- *Reserved* (1 bit): *Bit* reservado para uso futuro, deve ser setado para zero.
- *Parity* (1 bit): *Bit* de paridade contra corrupção dos dados.
- *Tail* (6 bits): O campo do sinal termina com 6 *bits* zeros que são usados para liberar a codificação. Os *bit* são processados pelo código convolucional.

*Service* (16 bits): Diferente dos outros componentes do cabeçalho PLCP o *service* é transmitido no campo dos dados na mesma taxa do quadro MAC. Os primeiros 6 *bits* são setados para zero para inicializar o *scrambler* do receptor, e os outros 10 *bits* restantes são reservados para uso futuro e são setados para zero.

Os dados são embaralhados antes da transmissão e o campo de dados termina com um *trailer* composto de dois campos [8]:

- *Tail* (6 bits): Assim como o *Tail* do cabeçalho PLCP, os *bits* adicionados ao final do quadro MAC são utilizados para tornar o final da codificação convolucional mais suave.

- *Pad* (Tamanho variável): A quantidade de *bits* transmitidos pelas 48 subportadoras OFDM depende do esquema de modulação e codificação, no entanto é fixo para uma dada modulação e codificação, como pode ser visto na Tabela 3.1. Dessa forma é utilizado um campo de *Pad* no final do quadro MAC para fixar esse valor caso o número total de *bits* de dados a serem transmitidos não atinja a quantidade necessária.

A camada física do 802.11a especifica requerimentos de desempenho mínimo para os receptores, como mostrado na Tabela 3.2 [8].

Tabela 3.2. Requerimentos mínimos de sensibilidade

<b>Taxa (Mbps)</b>	<b>Sensibilidade Mínima (dBm)</b>
6	-82
9	-81
12	-79
18	-77
24	-74
36	-70
48	-66
54	-65

### 3.1.6 IEEE 802.11p

Atualmente, um novo padrão 802.11 está sendo desenvolvido, a partir de alterações no 802.11a, para permitir seu uso em redes veiculares. A seguir serão descritas as alterações feitas no padrão 802.11a para transformá-lo no novo padrão, chamado 802.11p, assim como serão avaliados os impactos dessas alterações no desempenho do mesmo em redes veiculares.

Como a ferramenta de simulação utilizada não possui este padrão implementado, todas as simulações foram efetuadas utilizando-se o 802.11a. Logo, a análise da diferença de desempenho entre os dois padrões foi feita a partir da análise dos efeitos das alterações que serão descritas e a partir de simulações e medições encontradas em artigos.

#### 3.1.6.1 A SUBCAMADA MAC

Em ambientes veiculares, existem situações em que o tempo disponível para se estabelecer uma comunicação entre dois nós e efetivamente realizar a transmissão de dados é muito pequeno, fazendo com que as estratégias de autenticação e inicialização de comunicação adotadas pelo padrão 802.11a não sejam adequadas para essas redes. Em função disso, surgiu a necessidade de revisão dessas estratégias, de forma a se obter uma rede com baixíssimo *overhead*, para aproveitar ao máximo o período de comunicação, e com pouca ou nenhuma necessidade de autenticação e inicialização.

Em uma rede utilizando 802.11a, um IBSS é estabelecido quando o nó que inicia a rede gera aleatoriamente um IBSSID e envia pacotes sinalizando que este IBSS está disponível para que outros

usuários possam se conectar a essa rede. Para realizar essa conexão existem várias etapas de autenticação que são seguidas até que o novo usuário seja identificado como membro desse IBSS e, conseqüentemente, obtenha o IBSSID. A partir desse momento o usuário está apto a enviar e receber mensagens com esse IBSSID. O este identificador é único para cada IBSS e apenas mensagens com esse valor são enviadas e recebidas pelos membros dessa rede. Mensagens recebidas com IBSSIDs diferentes são simplesmente descartadas. Existe uma exceção a essa regra, a qual é chamada de IBSSID curinga (*wildcard*), sendo esse o identificador com todos os *bits* iguais a um. Mensagens com esse IBSSID são recebidas por todos os usuários; entretanto, o uso do mesmo é limitado para aplicações de controle de rede.

Analisando o procedimento descrito acima, pode-se perceber que essa estratégia demanda um tempo grande para iniciar a comunicação efetiva, adiciona um considerável *overhead* à comunicação e não permite que membros de IBSSs diferentes troquem pacotes, o que inviabiliza aplicações de segurança. Em função disso, está sendo desenvolvida uma nova metodologia de inicialização para o padrão 802.11p.

No novo padrão, como se deseja obter o máximo de comunicação efetiva durante o intervalo de tempo que os móveis estão dentro do alcance de comunicação, toda a parte de autenticação de usuário e segurança foi deslocada para camadas superiores. Ou seja, a subcamada MAC não é mais responsável por verificar se um usuário pode ou não fazer parte do IBSS. Com isso, é reduzido consideravelmente o tempo para iniciar a comunicação. Além disso, todos os rádios (nós) devem inicialmente operar no mesmo canal e com o mesmo IBSSID, permitindo que, a partir do momento que os nós entram no alcance de comunicação, já seja possível a troca de pacotes.

Outra alteração importante no padrão 802.11p é a criação do WAVE *mode*, no qual o uso do IBSSID curinga é permitido. Isso faz com que um nó possa enviar pacotes para todos os nós ao seu alcance sem que eles, necessariamente, pertençam a um mesmo IBSS. Isso torna possíveis aplicações de segurança, como a sinalização de um bloqueio ou obstáculo na pista para todos os móveis nas proximidades.

Foi criado também um novo tipo de BSS, denominado WAVE BSS (WBSS). Ao contrário dos BSS do 802.11a, esse BSS não possui uma sequência de passos a ser seguida para ser iniciado. O nó forma um WBSS simplesmente mandando um pacote em um canal de controle específico que sinaliza a existência do WBSS. Ao contrário do que acontece nos demais BSS, esse pacote possui todas as informações necessárias para que um nó que receba esse pacote passe a fazer parte da WBSS e comece a transmitir e receber pacotes de informação. Ou seja, para estabelecer a comunicação entre dois nós basta que seja enviado um único pacote. Esse fato torna o início da comunicação muito mais rápido que a metodologia adotada pelo 802.11a e com um *overhead* significativamente menor. Novamente, questões de segurança e autenticação devem ser tratadas por camadas superiores.

### 3.1.6.2 A CAMADA PHY

A camada física do 802.11p é baseada na do 802.11a, apenas com algumas mudanças para tornar o padrão adequado para aplicações veiculares, ou seja, torná-lo mais robusto aos problemas causados pelo deslocamento dos nós.

Para que um sistema OFDM (*orthogonal frequency division multiplex*) possua um desempenho satisfatório em um ambiente seletivo em frequência e variante no tempo, devem ser respeitadas algumas relações, como mostra a Tabela 3.3 [2].

Tabela 3.3. Relações entre parâmetros da camada física e parâmetros do canal a serem atendidas

Nº	Parâmetro da camada física	Parâmetro do Canal	Relação a ser atendida
1	Tempo de Guarda (TG)	Máximo Espalhamento Temporal (ET)	$TG > ET$
2	Espaçamento entre Subportadoras (ES)	Banda de Coerência (BC) Espalhamento Doppler (ED)	$BC > ES \gg ED$
3	Tempo de Transmissão do Pacote (TP)	Tempo de Coerência (TC)	$TP < TC$

O espalhamento temporal de um sinal aparece em função dos múltiplos caminhos que o mesmo percorre para se deslocar do transmissor para o receptor. Cada caminho diferente apresenta um tempo diferente de propagação, o que faz com que o sinal recebido seja composto por vários ecos do sinal, cada um chegando em intervalos de tempos diferentes e com potências diferentes. O máximo espalhamento temporal é a diferença entre o instante em que chega o primeiro sinal e o instante em que chega o último eco com potência acima de determinado limiar. Caso o tempo de guarda seja menor que o máximo espalhamento temporal, um novo símbolo começa a ser recebido enquanto ainda existem ecos do símbolo passado chegando ao receptor com potência suficiente para deteriorar o sinal, causando interferência inter-simbólica e perda da ortogonalidade entre as subportadoras. Portanto, o tempo de guarda deve ser dimensionado de modo a ser maior que o máximo espalhamento temporal. Entretanto, deve-se lembrar que um aumento no tempo de guarda gera uma diminuição na taxa máxima de transmissão.

A banda de coerência representa a banda na qual se pode considerar que o canal é não-seletivo em frequência. Ou seja, caso a largura de cada subportadora seja menor que a banda de coerência, admite-se que a resposta do canal é a mesma para toda a banda da subportadora. O sinal como um todo continua vendo o canal como seletivo em frequência, tendo suas várias subportadoras atenuadas diferentemente; entretanto, para cada subportadora o canal é não-seletivo em frequência. Isso permite que a distorção do sinal seja amenizada através da equalização do mesmo, corrigindo as atenuações causadas pelo canal em cada subportadora.

O espalhamento Doppler surge em função da velocidade relativa entre o transmissor e o receptor. Essa velocidade relativa desloca as componentes de frequência do sinal, fazendo com que as subportadoras OFDM percam parte de sua ortogonalidade, passando a interferir entre si. Essa interferência entre as

subportadoras altera também o tempo de coerência do canal. Com o aumento do efeito Doppler também ocorre diminuição do tempo de coerência do canal.

Em função desses dois fatores, o espaçamento entre as subportadoras deve ser menor que a banda de coerência do canal, de forma que possibilite considerar o canal como sendo não-seletivo em frequência para cada subportadora e deve ser muito maior que o máximo espalhamento Doppler, de forma a minimizar a interferência entre as subportadoras adjacentes.

Por fim, o tempo de coerência do canal é um intervalo de tempo no qual se admite que o canal não varie, ou seja, a sua resposta permanece constante ao longo deste intervalo. Este é um valor fundamental para determinar o valor máximo do tamanho do pacote a ser transmitido, pois a equalização do sinal (correção da distorção do sinal em função do comportamento seletivo em frequência do sinal) é feita tendo-se como base sequências de treinamento que são obtidas do cabeçalho de cada pacote. Caso a duração do pacote seja maior que o tempo de coerência do canal, a equalização não será feita de maneira correta, pois será baseada em uma amostra do canal que não mais representa o comportamento do mesmo, causando um aumento na taxa de erro de *bit*.

A diferença mais significativa existente entre o padrão 802.11a e o padrão 802.11p é a banda ocupada por cada canal. O canal do 802.11a ocupa 20 MHz, enquanto o canal do 802.11p ocupa 10 MHz. Essa mudança é feita mantendo-se o mesmo número de subportadoras dentro desse canal (52 subportadoras, das quais 48 são efetivamente para dados). Consequentemente, os parâmetros na frequência do sistema foram divididos por dois e no tempo os parâmetros foram dobrados.

O fato de dobrar os parâmetros temporais do sistema tem por finalidade aumentar a imunidade do sistema ao espalhamento Doppler e minimizar a interferência inter-simbólica. A necessidade dessa alteração vem do fato do intervalo de guarda do 802.11a não ser longo o suficiente para impedir interferência inter-simbólica em função de espalhamento temporal do sinal [2][12]. Ao diminuir a banda do canal pela metade e, consequentemente, dobrar o intervalo de guarda, este passa a ser suficiente para impedir a interferência inter-simbólica, melhorando o desempenho do sistema em ambientes veiculares.

Medições em [2] mostram que, no ambiente no qual o sistema proposto poderá ser implementado (ambiente suposto suburbano), a redução da banda para 10 MHz faz com que as relações 1 e 2 da Tabela 3.3 sejam atendidas, fazendo com que o sistema apresente um comportamento robusto em relação ao espalhamento temporal, ao espalhamento Doppler e à seletividade em frequência do meio. Apenas a terceira relação não é atendida. Entretanto, reduzindo-se o tamanho do pacote isso pode ser corrigido. Como os pacotes utilizados na transmissão de dados para monitoramento de rota possuem tamanho reduzido, a duração do pacote será menor que o tempo de coerência, atendendo à relação 3 e minimizando a distorção do sinal recebido.

Como são mantidas as mesmas modulações e codificações que o 802.11a no 802.11p, e a banda do sinal é dividida pela metade, as taxas de transmissão também são divididas por dois. Todas essas mudanças estão resumidas na Tabela 3.4.

Tabela 3.4. Comparação entre 802.11a e 802.11p

	<b>IEEE 802.11a</b>	<b>IEEE 802.11p</b>
<b>Taxa de Transmissão (Mbps)</b>	6, 9, 12, 24, 36, 48, 56	3, 4,5, 6, 9, 12, 18, 24, 27
<b>Modulação</b>	BPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM	BPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM
<b>Taxa de Codificação</b>	1/2, 2/3, 3/4	1/2, 2/3, 3/4
<b>Número de Subportadoras</b>	52	52
<b>Espaçamento Entre Subportadoras (kHz)</b>	312,5	156
<b>Duração do Símbolo OFDM (<math>\mu</math>s)</b>	4,0	8,0
<b>Intervalo de Guarda (<math>\mu</math>s)</b>	0,8	1,6
<b>Banda (MHz)</b>	20	10
<b>Frequência (GHz)</b>	5	5,850 – 5,925

Além das mudanças citadas, foram estabelecidos valores maiores de potência máxima permitida, chegando até a 44,8 dBm (30 W) EIRP. Este aumento possui consequências positivas e negativas, aumentando o alcance de comunicação ao mesmo tempo em que adiciona mais interferência. Em função disso, tanto o transmissor quanto o receptor devem atender a parâmetros mais rigorosos visando reduzir a interferência de canal adjacente. Para o transmissor são estabelecidos limites mais rigorosos em relação à emissão de potência fora do canal utilizado (máscara espectral) e para o receptor são estabelecidos limites mínimos de rejeição de canal adjacente e não adjacente. Essas alterações fazem com que a distância do enlace entre transmissor e receptor em um sistema que utiliza 802.11p pode ser maior que em um sistema que utiliza 802.11a.

Em relação ao alcance obtido pelo 802.11p, simulações apontam para um alcance inferior ao inicialmente estipulado como meta para o padrão, 1000 m. Apesar disso, há um grande ganho em relação ao 802.11a. Em [7] as simulações realizadas apontam para uma probabilidade de comunicação com sucesso de 90% a 750 m. Entretanto, para 900 m, esse índice cai para 1%.

### 3.2 ESTUDOS DE PROPAGAÇÃO

O canal rádio móvel exerce um papel fundamental no desempenho das comunicações móveis, exercendo uma influência direta sobre a qualidade do enlace entre o transmissor e o receptor. Muitas vezes, devido à sua imprevisibilidade e às suas variações tanto no domínio do tempo quanto no domínio da frequência e no domínio do espaço é necessário certo esforço para caracterizá-lo e modelá-lo de forma adequada e coerente. Diversos modelos de canal são utilizados em simulações computacionais na tentativa de obter a representação do canal de forma mais precisa possível.

A perda de potência na transmissão de um sinal é um processo inevitável. Apenas a separação física entre transmissor e receptor ocasiona, por exemplo, a difusão do sinal. A soma de todas as perdas que ocorrem até que o sinal de comunicação móvel chegue ao receptor é conhecida como perda de propagação. Matematicamente pode-se expressar a perda de propagação como sendo a razão entre a potência transmitida e a potência recebida. Considerando o ganho das antenas de transmissão e recepção tem-se:

$$L = \frac{P_{TX} G_{TX} G_{RX}}{P_{RX}} \quad (3.1)$$

Em que  $L$  representa as perdas de propagação  $P_{TX}$  é a potência transmitida,  $G_{TX}$  e  $G_{RX}$  são os ganhos das antenas de transmissão e recepção, respectivamente, e  $P_{RX}$  é a potência recebida.

Em sistemas de comunicações móveis o modelamento das perdas geralmente é dividida em duas partes, uma delas que modela os desvanecimentos de grande escala e outra que modela os desvanecimentos de pequena escala [13].

### 3.2.1 DESVANECIMENTO DE GRANDE ESCALA

Os modelos de grande escala tentam prever qual é a intensidade média do sinal recebido ao longo do tempo, bem como a sua variabilidade espacial. O desvanecimento de grande escala manifesta seus efeitos ao longo de médias e grandes distâncias, quando comparadas com o comprimento de onda do sinal. Logo, os modelos de grande escala são úteis, por exemplo, para se estimar a área de cobertura oferecida por um determinado transmissor ou a probabilidade de comunicação a determinadas distâncias entre transmissor e receptor. Pode-se dividir o desvanecimento de grande escala em: perdas de percurso e *shadowing*.

#### 3.2.1.1 PERDAS DE PERCURSOS

Esse tipo de perda ocorre em função da separação física entre transmissor e receptor, o que ocasiona uma redução na intensidade do sinal transmitido. Na tentativa de caracterizar corretamente essa perda, foram criados diversos modelos de propagação, separados em duas categorias principais de modelos: os empíricos e os teóricos [14].

Os modelos empíricos são basicamente regressões feitas a partir de dados obtidos em extensivas medições que aproximam o comportamento do canal. Em função disso, eles possuem ótima precisão, mas são modelos muito específicos para a situação da qual foram extraídos. Assim, para aplicá-los fora do cenário no qual foram obtidos, muitos ajustes devem ser utilizados, o que interfere negativamente na precisão do modelo.

Os modelos teóricos são modelos matemáticos obtidos a partir das teorias de propagação. Em função disso, são normalmente mais complexos e exigem uma capacidade computacional maior, além de

possuírem algumas simplificações que diminuem a precisão deles. Como característica positiva esses modelos são bastante genéricos, não vinculados a nenhuma situação específica [14].

O módulo *Wireless Lan* da ferramenta de simulação OPNET possui apenas o modelo de propagação no espaço livre, que é utilizado para prever a potência recebida para uma situação em que não há qualquer obstrução física entre transmissor e receptor. O modelo segue a equação descrita por Friss[14]:

$$P_{RX} = P_{TX} G_{TX} G_{RX} \left( \frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \quad (3.2)$$

Em que  $P_{RX}$  é a potência recebida,  $P_{TX}$  é a potência transmitida,  $G_{TX}$  e  $G_{RX}$  são os ganhos das antenas de transmissão e recepção, respectivamente,  $\lambda$  é o comprimento de onda do sinal e  $d$  é a distância entre transmissor e receptor.

Para o caso de simulações de redes veiculares em ambientes urbanos os modelos de propagação mais utilizados são o modelo de Terra Plana, o modelo *Ray-Tracing* e o modelo de Espaço Livre [15]. O modelo de Terra Plana é descrito pela Equação 3.3.

$$P_{RX} = P_{TX} G_{TX} G_{RX} \left( \frac{H_T \times H_R}{d^2} \right)^2 \quad (3.3)$$

Em que  $H_T$  é altura da antena transmissora,  $H_R$  a altura da antena receptora e  $d$  a distância entre o transmissor e receptor. No caso do sistema proposto a altura da antena de transmissão e da antena de recepção é aproximadamente 3,5 m que é igual à altura típica dos ônibus.

No entanto, esse modelo é adequado para o sistema em questão, com  $H_T = H_R = 3,5$  m, e  $\lambda = 0,06$  m apenas para distâncias maiores do que:

$$D_{cross} = \frac{4\pi \times H_T \times H_R}{\lambda} = \frac{4\pi \times 3,5 \times 3,5}{0,06} = 2,57 \text{ km} \quad (3.4)$$

Onde  $D_{cross}$  é a chamada distância de *crossover*, que corresponde à distância em que o modelo Terra Plana passa a ser mais pessimista que o modelo de Espaço Livre [14]. Para o caso do sistema proposto que opera na frequência de 5 GHz e possui antenas de transmissão e recepção com altura igual a 3,5 metros a distância de *crossover* é igual a: 2,57 km. Essa distância é maior do que o alcance obtido para o padrão 802.11a, como será demonstrado em seções seguintes. Já o *Ray-Tracing* tenta modelar uma propagação multipercurso em que cada caminho de propagação possível, até um número máximo de reflexões, é calculado. Infelizmente esse modelo necessita de um grande esforço computacional, já que os cálculos devem ser repetidos a cada movimento do transmissor ou do receptor. A grande quantidade de cálculos geralmente faz do *Ray-Tracing* inviável para simulações estocásticas [15].

Dessa forma, apesar de ser um modelo mais simples, o modelo de Espaço Livre é o mais adequado à simulação do sistema. Além disso, em ambientes veiculares urbanos os principais responsáveis pela atenuação do sinal são o *shadowing* e o desvanecimento de pequena escala [15].

### 3.2.1.2 SHADOWING

O *shadowing* é um desvanecimento de grande escala que tenta modelar a variabilidade espacial do ambiente em que o sinal se propaga, devido à presença de objetos no meio físico, como relevo, vegetação, casas, edifícios, etc. Dessa forma dois receptores equidistantes do transmissor não recebem necessariamente sinal com a mesma intensidade.

O *shadowing* pode ser modelado como uma variável aleatória que é somada à perda de propagação, em decibéis (dB). Segundo alguns resultados experimentais [14] essa variável aleatória segue uma função de densidade de probabilidade log-normal de média zero e desvio padrão  $\sigma$ , que representa a variabilidade do ambiente. Dessa forma as perdas por desvanecimento de larga escala podem ser escritas como:

$$L_s(d) = P_L(d) + X(\sigma) \quad [dB] \quad (3.5)$$

Em que  $L_s(d)$  é a perda devido ao desvanecimento de larga escala,  $P_L(d)$  é a perda de percurso calculada para uma distância  $d$ , e  $X(\sigma)$  é a variável aleatória descrita anteriormente, utilizada para modelar o *shadowing*.

### 3.2.2 DESVANECIMENTO DE PEQUENA ESCALA

O desvanecimento de pequena escala representa flutuações no sinal recebido e é verificado a curtas distâncias, da ordem do comprimento de onda do sinal. Isso ocorre, por exemplo, devido à sobreposição de diversas versões do sinal transmitido que chegam com amplitudes e fases diferentes no receptor, em diferentes instantes de tempo, já que o sinal transmitido pode percorrer múltiplos percursos até chegar ao receptor.

Outros fatores também influenciam no desvanecimento de pequena escala, como, por exemplo, a velocidade dos terminais móveis, a velocidade dos objetos que se encontram entre o transmissor e o receptor, a banda do sinal transmitido, etc [14].

Os múltiplos percursos são observados principalmente em ambientes urbanos, em que casas, prédios, carros, etc, atuam como objetos refletores ou difratores, proporcionando diversos caminhos físicos pelos quais o sinal transmitido pode chegar ao receptor. Nesses casos a unidade móvel recebe a cada instante uma soma de várias versões do sinal transmitido que percorreram diferentes caminhos. Essas versões possuem amplitudes, fases e ângulos de chegada diferentes e se interferem podendo ocasionar uma interferência construtiva ou destrutiva.

Tanto terminais móveis em movimento quanto terminais em repouso podem sofrer a influência de multipercursos, já que o desvanecimento de pequena escala pode ocorrer devido a alterações no ambiente ao redor do móvel, como movimentação de outros veículos, por exemplo. No entanto, a taxa de variação desse tipo de desvanecimento será maior quanto maior for a velocidade de movimentação do transmissor e receptor ou dos objetos vizinhos.

Outra consequência do movimento relativo entre transmissor e receptor é o chamado espalhamento *Doppler*. Este espalhamento provoca em cada versão do sinal recebido um desvio na frequência central da subportadora OFDM, gerando uma perda da ortogonalidade entre as subportadoras, ocasionando degradação no sinal recebido [14].

### 3.2.2.1 PARÂMETROS QUE DESCREVEM UM CANAL MULTIPERCURSO

O canal multipercurso pode ser modelado como um filtro linear variante no tempo [14]. Por meio de sua resposta impulsiva é possível caracterizá-lo completamente, uma vez que é possível a partir dela determinar qual é a resposta do canal para qualquer sinal de entrada.

Um canal multipercurso variante no tempo pode ser escrito como um trem de impulsos defasados temporalmente, com diferentes amplitudes e fases [14]. As variações temporais do canal são devidas ao movimento relativo entre transmissor e receptor e ao movimento dos objetos circunvizinhos.

Primeiramente é necessário ressaltar a diferença entre o domínio do tempo ( $t$ ) e o domínio da dispersão ( $\tau$ ). O domínio do tempo caracteriza a variação temporal da resposta impulsiva do canal. O domínio da dispersão caracteriza a resposta impulsiva do canal quanto a sua dispersão temporal, em um dado instante de tempo. A resposta impulsional de um canal multipercurso variante no tempo pode ser escrita como mostrado na equação (3.6).

$$h(t, \tau) = \sum_{i=0}^N a_i(t, \tau) e^{j(2\pi f_c \tau_i(t) + \phi_i(t, \tau))} \delta(t - \tau_i(t)) \quad (3.6)$$

Em que  $h(t, \tau)$  é a resposta impulsional do canal, o índice  $i$  representa cada multipercurso,  $a_i(t, \tau)$  é a amplitude do impulso correspondente ao percurso  $i$ ,  $\tau_i(t)$  é o atraso do impulso no instante  $t$ ,  $f_c$  é a frequência central da portadora,  $\phi_i(t, \tau)$  é a defasagem na fase devido ao canal correspondente ao percurso  $i$  no instante de tempo  $t$ , e  $\delta(t)$  é o impulso delta de *Dirac*.

Esse tipo de canal, por ser variante no tempo, apresenta uma resposta impulsional para cada instante de tempo  $t$ , além disso, devido aos multipercursos apresenta também um perfil de dispersão temporal para cada instante de tempo, ou seja, o impulso sofre um “espalhamento” temporal. Na Figura 3.12 pode-se observar o comportamento de um canal tanto no domínio do tempo, como no domínio da dispersão.

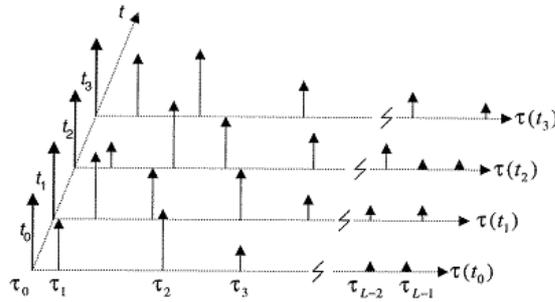


Figura 3.12. Comportamento do canal multipercursos. Adaptada de [14].

Muitos dos parâmetros utilizados para descrever um canal multipercursos com desvanecimento de pequena escala são baseados no perfil de espalhamento temporal do sinal. Esse perfil mostra como a potência é distribuída entre os diversos multipercursos. Alguns desses parâmetros são: *mean excess delay*, *excess RMS delay* e *excess delay spread* [14]. Esses parâmetros dizem respeito à natureza dispersiva do canal. No entanto, não caracterizam a sua natureza variante no tempo, para isso são utilizados o espalhamento Doppler e o tempo de coerência. Outro parâmetro utilizado para caracterizar um canal é a sua largura de banda de coerência [14].

O espalhamento Doppler mensura o espalhamento espectral do sinal devido à taxa de mudança do canal rádio móvel, ocasionado pelo movimento relativo entre transmissor e receptor. A banda de coerência é uma medida estatística, que mede a faixa de frequências na qual o canal apresenta resposta em amplitude constante e resposta em fase linear. Enquanto que o tempo de coerência é também uma medida estatística, mas que mede o intervalo de tempo sobre o qual a resposta impulsional do canal é essencialmente invariante, ou seja, possui forte correlação de amplitude. Assim, dois sinais transmitidos com um espaçamento de tempo maior do que o tempo de coerência do canal serão afetados de formas diferentes, já que a resposta do canal não será mais a mesma.

Um canal com desvanecimento de pequena escala pode ser classificado em quatro subtipos dependendo da natureza do sinal transmitido, das características do canal e do movimento relativo entre transmissor e receptor. De acordo com a relação entre os parâmetros de dispersão temporal, ou de variação em frequência pode-se classificar o desvanecimento em [14]:

1. Desvanecimento plano: Ocorre quando a largura de banda do sinal transmitido é menor do que a banda de coerência do canal, ou de forma análoga quando o espalhamento temporal do sinal é menor do que o período de um símbolo transmitido.
2. Desvanecimento seletivo em frequência: Ocorre quando a largura de banda do sinal transmitido é maior do que a banda de coerência do canal, ou de forma análoga quando o espalhamento temporal do sinal é maior do que o período de um símbolo transmitido.

De acordo com a relação entre os parâmetros de dispersão em frequência, ou de variação temporal pode-se classificar o desvanecimento em [14]:

3. Desvanecimento rápido: Ocorre quando o tempo de coerência do canal é menor que o período de transmissão de um símbolo, causando dispersão em frequência, ou seletividade no tempo.
4. Desvanecimento lento: Ocorre quando o tempo de coerência do canal é maior que o período de transmissão de um símbolo.

### 3.3 PROTOCOLOS DE ROTEAMENTO

Desenvolver um protocolo de roteamento para redes *ad hoc* móveis que possua simultaneamente confiabilidade e eficiência pode ser uma tarefa difícil. A dificuldade em se obter confiabilidade está associada principalmente ao fato de que, em geral, tais redes apresentam topologias extremamente dinâmicas, com nós mudando de posição rapidamente. Em relação à eficiência, existem ainda mais fatores a se considerar, como a escassez de banda do espectro eletromagnético, a variação do canal experimentado pelos enlaces e a pouca quantidade de energia disponível nos dispositivos móveis de comunicação – já que estes são usualmente alimentados por baterias – o que exige que o processamento seja o mínimo possível. Em resumo, qualquer estratégia de roteamento deve levar em conta a disponibilidade e a eficiência do uso dos recursos disponíveis aos nós de uma MANET.

As inúmeras aplicações possíveis para as MANETs motivaram estudos de diferentes estratégias de roteamento que contornassem esses problemas. Desde então, vários algoritmos têm sido propostos, estudados e analisados em simulações, cujos resultados mostram que o desempenho de cada protocolo depende particularmente dos ajustes de seus parâmetros configuráveis, além de características da rede como a mobilidade e a quantidade de nós.

#### 3.3.1 TIPOS DE PROTOCOLO DE ROTEAMENTO PARA REDES *AD HOC* MÓVEIS

De forma geral, os protocolos de roteamento de MANETs podem ser classificados em três tipos: proativos, reativos e híbridos. A diferença entre os dois primeiros reside basicamente na existência ou não de um mecanismo de atualização constante das tabelas de roteamento. Em outras palavras, usando um protocolo proativo, um nó saberá a qualquer instante quais são as rotas válidas na rede, mantendo as entradas de sua tabela de roteamento constantemente atualizadas. No caso dos protocolos reativos, o processo de descoberta de rota é ativado somente quando houver necessidade, isto é, sob demanda.

Naturalmente, protocolos proativos funcionam a partir de monitoramento constante da topologia da rede, o que só pode ser feito com a repetição contínua da transmissão de mensagens de sinalização. Por este motivo, quando comparados aos protocolos reativos, os protocolos proativos em geral apresentam menor escalabilidade, pois inserem grande quantidade de *overhead* em redes com muitos nós. Por outro lado, o atraso tende a ser maior para os protocolos reativos, já que o envio de pacotes para um nó somente acontece depois de finalizado o mecanismo de descoberta da rota. Protocolos

híbridos tentam, com seus algoritmos diferenciados, aproveitar as vantagens de protocolos proativos e reativos.

Dentre os protocolos de roteamento proativos existem aqueles classificados como geográficos, que utilizam o geoposicionamento como ferramenta na estratégia de roteamento. Estes protocolos tem se tornado cada vez mais importantes em ambientes sem fio, principalmente por dois motivos. O primeiro é que atualmente a tecnologia GPS (*global positioning system*) é facilmente encontrada nos dispositivos móveis de comunicação. O segundo é a rapidez com que este tipo de protocolo responde às mudanças na topologia da rede, o que representa uma vantagem em relação a outros algoritmos e sugere a viabilidade para uso em redes *ad hoc* móveis. Outra vantagem do roteamento geográfico é o fato de que os nós devem armazenar apenas estados referentes aos seus vizinhos, aumentando bastante a escalabilidade, que neste caso fica dependente não do tamanho, mas sim da densidade da rede (número de nós por unidade de área) [16]. A grande limitação da abordagem geográfica de roteamento é como lidar com situações de *dead-ends* e presença de obstáculos [17].

Sendo o protocolo de roteamento determinante no desempenho de redes *ad hoc*, neste trabalho são estudadas três estratégias de roteamento distintas: uma reativa e duas proativas, sendo uma destas assistida por posicionamento geográfico. Os protocolos escolhidos para ilustrar essas estratégias foram o AODV (*ad hoc on-demand distance vector*), o OLSR (*optimized link state routing*) e o GRP (*geographic routing protocol*).

A escolha desses protocolos se justifica pelo fato de estarem implementados no *software* OPNET Modeler®. O AODV e o OLSR são, também, bastante citados na literatura.

O próximo item traz uma lista de definições de termos relativos ao roteamento em redes *ad hoc*. Em seguida, é apresentada breve descrição dos três protocolos citados.

### 3.3.2 TERMINOLOGIA

Para compreender o roteamento em redes *ad hoc*, primeiramente é necessário definir alguns termos frequentes, como discriminado a seguir.

- Algoritmo de roteamento: sequência de operações realizadas por cada nó para gerenciar sua tabela de roteamento.
- Destino: nó cujo endereço IP (*internet protocol*) corresponde ao do receptor final do pacote a ser transmitido.
- *Flood* (ou inundação): sequência encadeada de transmissões *broadcast*, na qual a mensagem é retransmitida por todos os nós que a recebem, alcançando toda a extensão da rede. Na inundação, os nós descartam e não reenviam duplicatas de mensagens.
- Mensagem *hello*: mensagem de sinalização de um protocolo de roteamento. Serve para um nó indicar aos seus vizinhos que está acessível.

- Nó: elemento da rede capaz de executar o protocolo de roteamento.
- Nó intermediário: nó posicionado entre a origem e o destino, que realiza o roteamento para encaminhar pacotes entre um e outro.
- Origem: nó que deseja transmitir pacote a um destino.
- Período de sinalização: tempo decorrido entre a geração de duas mensagens *hello* consecutivas.
- Rota: endereço IP do próximo salto, armazenado numa tabela de roteamento. Cada rota é associada a um endereço IP de destino.
- Rota ativa (ou válida): rota utilizável na tabela de roteamento. Apenas rotas ativas podem ser usadas no encaminhamento das mensagens numa rede *ad hoc*.
- Rota inválida: rota que expirou por algum motivo, não podendo ser utilizada para roteamento.
- Salto: encaminhamento de um pacote, a partir de um nó para um de seus vizinhos, escolhido na tabela de roteamento.
- Tabela de roteamento: conjunto de rotas armazenadas em um nó, estabelecida com a execução do algoritmo de roteamento.
- Transmissão *broadcast* ou transmissão por difusão: Neste tipo de transmissão, todos os nós pertencentes à rede e que estiverem dentro da área de cobertura do transmissor recebem a mensagem transmitida.
- Vizinho: nó que está dentro da área de cobertura de outro.

### 3.3.3 PROTOCOLO AODV – AD HOC ON-DEMAND DISTANCE VECTOR

O AODV (*ad hoc on-demand distance vector*) é um protocolo de roteamento reativo, desenvolvido para determinar rotas *unicast* em uma rede *ad hoc* móvel. O algoritmo foi desenvolvido para permitir rápida adaptação às variações dos enlaces, fazendo isso com mínimo uso de banda, energia, processamento e memória, suportando escalabilidade e mobilidade relativamente alta [18].

O protocolo é detalhado pela IETF (*internet engineering task force*) na RFC (*request for comments*) de número 3561, na qual são apresentadas uma visão geral do protocolo e seu algoritmo, além dos formatos das mensagens de roteamento utilizadas em suas operações.

O protocolo AODV define três tipos de mensagens. São elas: RREQs (*route requests*), RREPs (*route replies*) e RERRs (*route errors*). RREQs são mensagens de requisição de rotas, enviadas em *broadcast* pelo nó de origem quando este desejar transmitir e não possuir rota válida para o destino em sua tabela. Os nós ao redor da origem continuam com o procedimento até a requisição chegar ao destino ou a um nó que possua rota válida para a requisição. Neste processo de inundação, as duplicatas de

RREQs que porventura chegarem a algum nó são descartadas e não retransmitidas. Uma RREP é uma mensagem que contém a resposta a uma RREQ, informando a rota válida ao nó que iniciou a requisição (origem). RREPs podem ser geradas pelo próprio destino solicitado na RREQ ou por qualquer nó intermediário que possuir rota válida para a rota solicitada em uma RREQ. As mensagens RREPs fazem o caminho de retorno até a origem através de saltos em *unicast*. O caminho em *unicast* é possível porque os nós vão armazenando o endereço dos nós intermediários durante o envio das RREQs. Esse percurso define a rota válida solicitada pela origem.

Ao se estabelecer uma rota válida, os nós passam a enviar mensagens *hello*. A interrupção no recebimento dessas mensagens caracteriza a quebra de um enlace e a rota passa a ser inválida.

As mensagens de erro, (RERRs) são geradas em três situações:

- Detecção da queda de um enlace de uma rota válida;
- Recebimento de um pacote cujo destino não possuir rota válida na tabela de roteamento atual do nó; e
- Recebimento de uma RERR.

O envio de RERRs pode ser em *unicast* ou *broadcast*, dependendo do que for mais conveniente no caso.

Cada linha da tabela de roteamento de um nó utilizando o protocolo AODV contém as seguintes informações:

- Endereço IP do destino;
- Número de sequência do destino;
- *Flag* de validade do número de sequência do destino;
- *Flags* do estado da rota;
- Interface de rede;
- Contador de saltos;
- Próximo salto;
- Lista de predecessores; e
- Tempo de vida (*time to live*) da rota.

O número de sequência do destino é um campo de 32 *bits*, inserido em todas as mensagens de controle do AODV. É um importante indicador, que informa aos nós participantes da rede se uma rota é suficientemente nova para ser usada. Além disso, serve para evitar *loops*, número de saltos tendendo ao infinito, problema recorrente em algoritmos de roteamento do tipo vetor distância [18].

### 3.3.4 PROTOCOLO OLSR – OPTIMIZED LINK STATE ROUTING

O protocolo de roteamento OLSR (*optimized link state routing*) resulta da otimização do algoritmo de roteamento por estado de enlace, levando em conta as dificuldades impostas pelas características de uma rede *ad hoc* móvel. O conceito fundamental para compreender o OLSR é o de MPR (*multipoint relay*). MPRs são nós selecionados pelos seus vizinhos para transmitir em *broadcast* as mensagens de controle do protocolo, contendo informação sobre os estados de enlace. Os MPRs atuando em conjunto inundam a rede com as informações de roteamento, fazendo-as chegar a todos os nós. Essa inundação, contudo, é substancialmente mais eficiente do que nos protocolos de roteamento por estado de enlace não otimizados, já que no OLSR apenas os MPRs retransmitem as mensagens de controle, chamadas de TC (*topology control*). Esta técnica de selecionar MPRs torna o protocolo particularmente adequado para redes grandes e densas [19]. O OLSR é descrito pela IETF, na RFC 3626.

A seleção de um MPR é feita a partir da troca de mensagens *hello* em enlaces bidirecionais entre os nós. Cada nó seleciona o seu conjunto de MPRs dentre os seus vizinhos a um salto de distância. O MPR é aquele que possui maior número de vizinhos a dois saltos, medidos em relação ao nó que está selecionando o MPR.

No protocolo OLSR existe um parâmetro denominado *willingness*, usado para indicar a intensidade ou frequência que um nó funciona como nó intermediário no encaminhamento das mensagens. Dessa forma, um nó com pouca energia disponível em sua bateria pode ser configurado para nunca atuar como nó intermediário, economizando seus recursos.

A tabela de roteamento em cada nó é computada a partir das informações de roteamento periodicamente recebidas. Uma atualização na tabela de roteamento não gera nenhuma mensagem de roteamento adicional a ser transmitida.

A ocorrência de perdas de algumas mensagens de controle não é tão problemática para a operação do OLSR, já que há uma periodicidade regular no envio dessas informações. Por este motivo, o protocolo não exige transmissão confiável, podendo utilizar o protocolo de transporte o UDP (*user datagram protocol*).

O OLSR suporta extensões, incluindo para roteamento *multicast*, sem que haja perda de compatibilidade com versões anteriores do protocolo.

### 3.3.5 PROTOCOLO GRP – GEOGRAPHIC ROUTING PROTOCOL

O GRP (*geographic routing protocol*) é um protocolo de roteamento proativo assistido por posicionamento geográfico. Foi desenvolvido pela OPNET Technologies®. Neste protocolo, assume-se que todos os nós participantes da rede possuem um receptor GPS fornecendo a posição atual (latitude e longitude).

No roteamento geográfico, os nós intermediários decidem o próximo salto a partir da posição de seus vizinhos em relação ao destino. O próximo salto é o nó vizinho que estiver mais próximo ao destino. Este procedimento demanda duas operações de controle distintas.

A primeira delas é uma operação de monitoramento local, em que cada nó atualiza na sua tabela informações acerca de sua vizinhança. Isso é feito com a troca de mensagens *hello*, nas quais cada nó informa aos vizinhos o seu endereço IP e a sua posição atual. O período de sinalização deve ser definido de acordo com o grau de mobilidade da rede. Graus de mobilidade elevados requerem períodos de sinalização reduzidos. Neste monitoramento local, um vizinho passa a ser considerado inalcançável quando transcorrer determinado intervalo de tempo sem o recebimento de nenhuma mensagem *hello* do mesmo. Logicamente, este tempo é proporcional ao período de sinalização.

A outra operação serve para que cada nó tenha uma noção da topologia da rede completa. Para isso, o GRP divide a rede em quadrantes, cujas dimensões devem ser definidas de acordo com as características da distribuição e mobilidade dos nós. Feita essa divisão, cada nó deverá reportar a sua nova posição a todos os outros (através de inundação), sempre que atravessar de um quadrante a outro ou sempre que percorrer determinada distância. Isto permite que um nó de origem tenha certa noção da localização do destino quando for realizar o primeiro salto na transmissão da mensagem.

É importante destacar que escolher o próximo salto de acordo com a distância dos vizinhos ao destino pode resultar em uma situação problemática, conhecida como *dead-end*. Isso acontece quando não houver um nó mais próximo ao destino do que o próprio nó intermediário roteando a mensagem. Esta situação é ilustrada na Figura 3.13, na qual o nó intermediário “x” deve encaminhar uma mensagem cujo destino é “D”. O nó “x” não é vizinho de “v” nem “z”, pois estes estão fora de sua área de cobertura. Para resolver o problema, o salto ocorre de “x” para “w”, que pode então transmitir para “v”, que, por sua vez, faz a mensagem chegar a “D”. Este outro modo de operação de protocolos geográficos, em que a mensagem deve ir do nó intermediário para um nó mais distante, é conhecido como modo perímetro, implementado no GRP e em outros protocolos geográficos, como o GPSR (*greedy perimeter stateless routing*).

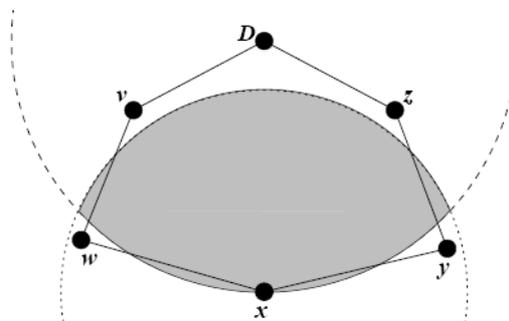


Figura 3.13. *Dead-end* no roteamento geográfico. Adaptada de [16].

### 3.4 CONCLUSÃO

Neste capítulo foram abordados aspectos da rede veicular do sistema proposto. Foram descritas características da operação e do gerenciamento de redes 802.11, e detalhadas a técnica OFDM e as especificações da camada física das extensões 802.11a e 802.11p desse padrão. Este detalhamento possibilita um estudo de propagação voltado ao contexto do sistema proposto, no qual devem ser considerados diversos efeitos atuando em conjunto no desvanecimento do sinal. Por último, foram descritos três protocolos de roteamento para redes *ad hoc*, que representam estratégias diferentes para o encaminhamento de pacotes na rede. Todo este conteúdo serve de base para modelamento do sistema, interpretação de simulações e validação do sistema, assuntos abordados no capítulo 5.

## 4 UMTS

*Para maior confiabilidade do sistema proposto, foi estudado um modelo híbrido, no qual a rede celular 3G entraria de forma secundária, sendo utilizada nos pontos onde a comunicação pela rede ad hoc não fosse possível ou fosse não satisfatória. Sendo assim, apresenta-se uma descrição sobre a tecnologia 3G UMTS (universal mobile telecommunication system). São descritos sua arquitetura e características principais.*

### 4.1 INTRODUÇÃO

A rede UMTS (*universal mobile telecommunication system*) é um dos sistemas tecnológicos utilizados pela terceira geração (3G) de telefones celulares. Suporta serviços multimídia e acesso à *internet* com alto desempenho e provisionamento de qualidade de serviço (*quality of service – QoS*).

O processo de padronização dos sistemas 3G iniciou-se com o *International Telecommunication Union* (ITU) através do *International Mobile Telecommunication 2000* (IMT-2000). Atualmente o órgão responsável pela especificação técnica do UMTS é o *Third Generation Partnership Project* (3GPP). O UMTS possui cinco áreas de padronização: rede de acesso, núcleo da rede, terminais, GERAN (*generic radio access network*) e serviços[20].

Um dos pontos chave para a implantação dos sistemas celulares de terceira geração é o WCDMA (*wideband code division multiple access*). O sistema é baseado em tecnologia de acesso via rádio e consiste em uma evolução das tecnologias GSM/GPRS (*global system for mobile communication/ general packet radio service*) utilizando estrutura de rede e protocolos compatíveis com os destas redes, o que facilita a migração e a interoperabilidade entre os sistemas, embora empregue a técnica de acesso CDMA na interface rádio.

O sistema WCDMA suporta tanto comunicações por comutação de pacotes, como em uma rede *internet*, quanto comutação de circuitos, como em uma rede telefônica convencional.

### 4.2 ARQUITETURA DE REDES UMTS

A arquitetura de rede pode ser dividida em subsistemas baseados na natureza do tráfego, estruturas de protocolo e elementos físicos. Devido ao primeiro, a rede 3G pode ser dividida em dois domínios principais, *packet-switched* (PS) e *circuit-switched* (CS). As interfaces e suas definições descrevem como os domínios se comunicam. Devido à estrutura dos protocolos, uma rede 3G pode ser dividida em duas camadas: a camada de acesso, que contém os protocolos referentes às atividades entre o equipamento do usuário (UE) e a rede de acesso, e a camada de não acesso, que tem os protocolos

referentes às atividades entre o UE e o *core network* (CN). Os elementos físicos dessa rede são os equipamentos de usuários (UEs), as *Node-Bs* (estações base), as RNCs (*radio network controller*), os SGSNs (*serving GPRS support node*) e o GGSN (*gateway GPRS support node*), que serão detalhados a seguir. A Figura 4.1 mostra o modelo conceitual da arquitetura da rede UMTS. A principal função do *core network* é fazer comutação, roteamento e trânsito para tráfego de usuários. O *core network* também contém o banco de dados e as funções de gerenciamento da rede.



Figura 4.1. Arquitetura UMTS – Modelo Conceitual. Modificada de [21].

A figura mostra os domínios do usuário, de acesso à rede e do núcleo da rede. Pode-se observar que o domínio do usuário é composto pelo cartão USIM (*UMTS subscriber identity module*), o equipamento móvel (ME) e suas interfaces. O Domínio de núcleo da rede é composto pelo domínio de comutação a pacotes e o domínio de comutação a circuitos, além da rede de serviços. O extrato de acesso contém os protocolos que manejam as atividades entre o equipamento do usuário e a rede de acesso. O extrato de não acesso contém os protocolos que manejam as atividades entre o UE e o Núcleo da rede (domínios PS/CS). A Rede Doméstica (*home network*) mantém dados estáticos das contas nos usuários e informação de segurança. A rede de serviço é a parte que provê ao núcleo da rede funções locais dos usuários. A rede de trânsito é a parte do núcleo da rede localizada no caminho de comunicação entre a rede de serviços e a parte remota.

O sistema UMTS utiliza o mesmo *core network* do GPRS para o domínio de pacotes e utiliza o mesmo CN do GSM na comutação por circuitos, no entanto utiliza uma nova interface de acesso de rádio, a UTRAN (*UMTS terrestrial radio access network*), a qual é conectada ao CN via interface “Iu”. Na Figura 4.2, temos uma visão geral da arquitetura das redes UMTS com seus componentes e interfaces.

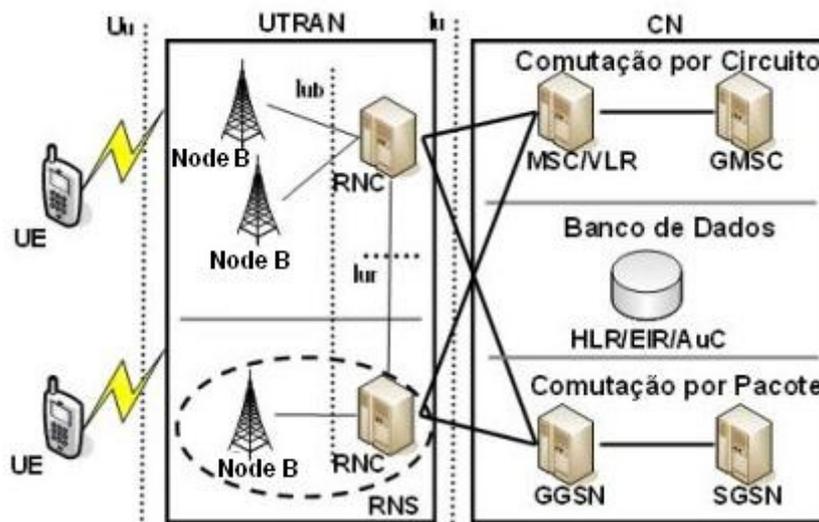


Figura 4.2. Arquitetura da rede UMTS. Adaptada de [22].

O UE utiliza a interface aérea “Uu” e o cartão USIM, o qual contém a identidade do assinante. A UTRAN consiste de RNSs (*radio network subsystems*). Já um RNS é composto por um *Node-B* e um RNC (*radio network controller*). O *Node-B* é responsável pela codificação das informações, ou seja, pelo espalhamento/despalhamento, modulação/demodulação e geração dos códigos do CDMA, além de medir a qualidade dos sinais recebidos e realizar o controle de potência. A RNC controla os recursos de rádio, e é também a responsável pelo *handover*, ou seja, a mudança de um usuário de uma célula para outra sem a perda de conectividade com a rede. O CN contém o domínio de comutação por circuito (*circuit switched – CS*) e o domínio da comutação por pacote (*packet switched – PS*). Os principais elementos de rede do CN são o HLR (*home location register*), que é o banco de dados que guarda as informações dos usuários daquele sistema, o MSC/VLR (*mobile switching centre/ visitor location register*) e o GMSC (*gateway mobile switching centre*), que prestam serviços de comutação por circuitos, e o SGSN (*serving GPRS support node*) e o GGSN (*gateway GPRS support node*), que prestam serviços de comutação por pacotes. O SGSN é o nó de controle principal da rede, ele é responsável pela segurança, pelo controle de sessões, QoS, mobilidade, carregamento, transporte, roteamento, entre outras funcionalidades. O GGSN é o *gateway* para outras redes comutadas a pacotes, como internet ou IMS (*IP multimedia subsystem*).

### 4.3 INTERFACE AÉREA

O meio para transmitir informações por uma interface de rádio é através de ondas eletromagnéticas [23], assim a informação deve ser codificada nessas ondas através de uma modulação que pode ser em amplitude, fase ou frequência, tais como QPSK (*quadrature phase shift keying*), 16QAM (*16-quadrature amplitude modulation*) ou várias outras. A modulação utilizada no sistema UMTS é a QPSK, onde quatro diferentes defasagens relativas a uma onda de referência são definidas.

Para permitir o compartilhamento do espectro entre os vários usuários da rede, as redes celulares utilizam diversas técnicas de múltiplo acesso, tais como: TDMA (*time division multiple acess*), OFDMA (*orthogonal frequency division multiple acess*) e CDMA (*code division multiple acess*). A principal técnica de múltiplo acesso utilizada em sistemas UMTS é o WCDMA, que, assim como o CDMA, baseia-se no espalhamento espectral do sinal através da multiplicação do sinal por um código. As diferenças entre WCDMA e CDMA residem, basicamente, na largura da banda do sinal espalhado e nos controles de canal e de sinalização. Neste contexto, é chamada de “canal” a banda de frequências alocada para o usuário e as funções de controle do sistema.

Além disso, no UMTS é utilizado o FDD (*frequency division duplex*), onde são separadas faixas de frequência para a subida (*uplink*) e a descida (*downlink*), com o objetivo de aumentar as taxas de transferência.

Para que as funcionalidades e características de um sistema WCDMA sejam garantidas, deverão existir três camadas de canalização, cada uma delas composta por um tipo de canal. Tais canais são classificados como físicos, lógicos ou de transporte. Os canais lógicos tratam do tipo de informação a ser transmitida e os canais de transporte se encarregam de indicar como deve ser feita a transmissão desta informação. Já os canais físicos correspondem ao meio de transmissão. A Figura 4.3 mostra esses canais e com que elementos físicos da rede eles se relacionam.



Figura 4.3. Canais lógicos, físicos e de transporte para o WCDMA. Adaptada de [21].

## 4.4 CANAIS

Como já mencionado na seção anterior, os canais do UMTS são divididos em três tipos básicos: lógicos, de transporte e físicos. Na Figura 4.4, tem-se a distribuição desses canais e como eles se associam. Os canais físicos formam a existência física da interface “Uu” (entre UE e UTRAN). A RNC enxerga os canais de transporte, pois eles carregam diferentes fluxos de informação pela interface “Uu”. O elemento físico mapeando esses fluxos para os canais físicos é a *Node-B*. Os canais lógicos não são exatamente canais de comunicação, eles funcionam como meio para diferentes tarefas que a rede e o terminal precisam realizar em diferentes instantes.

Essas estruturas são então mapeadas em canais de transporte que desempenham a transferência de informação entre o domínio do UE e o domínio de acesso.

A seguir, é detalhado cada tipo de canal.

#### 4.4.1 CANAIS LÓGICOS

Eles representam uma forma de organização do fluxo de informação, não sendo implementados fisicamente. São divididos em canais de controle e canais de tráfego. Definem “o que é” transportado, além disso, define os serviços disponibilizados pela camada MAC para a camada superior.

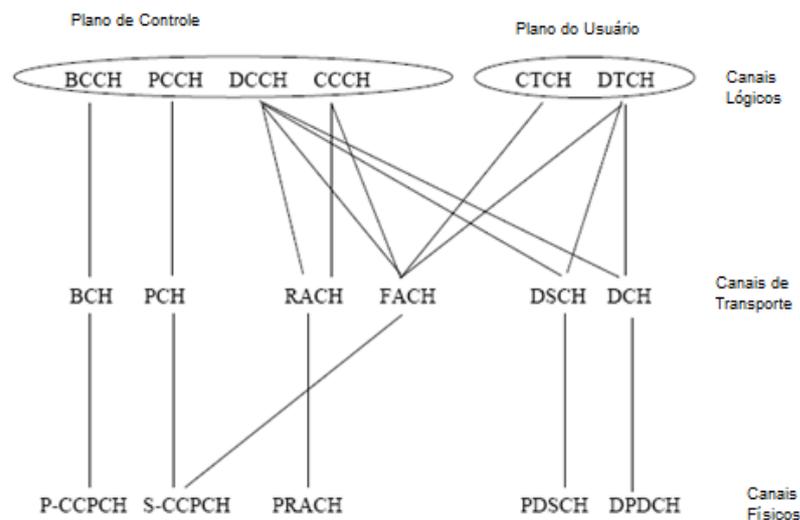


Figura 4.4. Canais UMTS. Adaptada de [24].

##### 4.4.1.1 CANAIS DE CONTROLE

Esses canais fazem o controle do sistema, alguns deles são:

- **BCCH – Broadcast Control Channel:** informa ao UE acerca dos níveis de potência e dos códigos utilizados na célula e nas células vizinhas.
- **PCCH – Paging Control Channel:** é neste canal que se dá a comunicação a respeito do posicionamento do UE, ou seja, quando for necessário, a rede envia um sinal ao UE para conhecer a sua localização.
- **CCCH – Common Control Channel:** nele são realizadas tarefas específicas e gerais para todos os UEs que se encontram na célula.
- **DCCH – Dedicated Control Channel:** necessário se houver uma conexão ativa e dedicada entre a rede e o usuário.

##### 4.4.1.2 CANAIS DE TRÁFEGO

São canais de tráfego de informações. São eles:

- DTCH – *Dedicated Traffic Channel*: canal ponto a ponto, dedicado a uma estação móvel para transferência de informações de um usuário. Pode ser usado tanto na descida como na subida.
- CTCH – *Common Traffic Channel*: unidirecional, ou seja, presente apenas na descida, para transmitir informações para uma parcela dos usuários de uma célula, ou para todos eles.

#### 4.4.2 CANAIS DE TRANSPORTE

Um canal de transporte é definido pela forma e pelas características com que os dados são transferidos sobre a interface aérea. Os canais de transporte representam a interface entre a camada de enlace e a camada física, não tendo implementação física. Os canais de transporte são divididos em comuns e dedicados. Definem “como” é transportada a informação pela interface rádio e também os serviços disponibilizados pela camada física para as camadas superiores. Alguns deles são:

- *Broadcast Channel* (BCH): O BCH é o canal de transporte destinado à transmissão de informações específicas e essenciais à comunicação. Sem decodificá-lo, um móvel não pode se registrar no sistema. Para facilitar a sua recepção, este canal é transmitido com potência relativamente elevada a uma taxa de transmissão baixa e fixa.
- *Paging Channel* (PCH): Canal de transporte utilizado na descida. O PCH é sempre transmitido para toda a célula. Transporta informações de controle para os móveis cuja respectiva localização é desconhecida.
- *Forward Access Channel* (FACH): É um canal que transporta informações de controle para os móveis cuja localização é conhecida em uma célula. Pode ser utilizado para a transmissão de dados por pacotes; trata-se, entretanto, de um canal de baixo desempenho (baixa taxa de transmissão, que não suporta *handover*, não suporta controle rápido de potência e requer identificação de destinatários de mensagens dentro da banda).
- *Dedicated Channel* (DCH): É um canal de transporte usado tanto na descida como na subida. Ele conduz toda informação proveniente das camadas superiores para a camada física. O DCH é caracterizado pela possibilidade de mudar de taxa de transmissão rapidamente (a cada 10 ms), pelo controle rápido de potência e por estar envolvido no endereçamento de estações móveis. Além disso, pode ser mapeado para vários canais físicos.
- *Downlink Shared Channel* (DSCH): O DSCH é um canal utilizado quando há conexão em andamento, sendo destinado à transmissão de dados (dados do usuário ou de dados de controle) em modo compartilhado. Apresenta bom desempenho, na medida em que opera associado ao DCH e compartilha seus parâmetros de transmissão. Usado na descida.
- *Random Access Channel* (RACH): Este canal destina-se ao transporte de informações de controle do móvel para a rede em modo não conectado, logo é utilizado apenas na subida. Um exemplo de utilização é a emissão, por um móvel, de mensagem de pedido de conexão (acesso

inicial ao sistema). Este canal pode ser utilizado para a transmissão de pequenos volumes de dados em comunicação por pacotes. Devido à sua importância, a *Node-B* deve ser capaz de recebê-lo independentemente da localização do móvel dentro da área de cobertura da célula – apresenta baixas taxas de transmissão, tratando-se, portanto de um canal de baixo desempenho.

- *Common Packet Channel (CPCH)*: O CPCH é uma extensão do RACH destinado à transmissão de dados de controle ou do usuário em modo pacote a partir do terminal, utilizado também apenas na subida. É um canal que, embora utilize procedimentos de acesso aleatório, tem mecanismo de controle rápido de potência, o que melhora seu desempenho. Apresenta um mecanismo de acesso que implica no uso de canais e procedimentos físicos particulares.

### 4.4.3 CANAIS FÍSICOS

Os canais de transporte são codificados e combinados na taxa de transmissão oferecida pelos canais físicos e a seguir mapeados nos mesmos. Esses canais são constituídos de *frames* de 10 ms com 15 *slots* cada. Sendo que o número de *bits* por *slot* depende do canal físico. Abaixo têm-se os tipos e as estruturas desses canais:

#### 4.4.3.1 CANAIS FÍSICOS DO UPLINK

Existem dois canais físicos de subida dedicados e dois canais comuns, são eles:

- *Uplink Dedicated Physical Data Channel (Uplink DPDCH)*;
- *Uplink Dedicated Physical Control Channel (Uplink DPCCH)*;
- *Physical Random Access Channel (PRACH)*;
- *Physical Common Packet Channel (PCPCH)*.

O *Uplink DPDCH* é utilizado para transportar dados dedicados do usuário. Pode haver nenhum, um ou vários DPDCHs em cada conexão da camada Física. O *Uplink DPCCH* é utilizado para levar informações de controle geradas nesta camada. Essas informações de controle consistem em reconhecimento dos *bits* de controle para estimação do canal em detecção coerente, transmissão de comandos de controle de potência (TPC), informações de *feedback* (FBI), etc. O PRACH é utilizado para transportar o RACH e o PCPCH é utilizado para transportar o canal de transporte CPCH.

#### 4.4.3.2 CANAIS FÍSICOS DO DOWNLINK

Existem, na descida, um canal físico dedicado, um canal físico compartilhado e cinco canais de controle comuns, são eles:

- *Downlink Dedicated Physical Data Channel (Downlink DPDCH)*;

- *Downlink Dedicated Physical Control Channel (Downlink DPCCH);*
- *Physical Downlink Shared Channel (PDSCH);*
- *Common Pilot Channels (CPICH);*
- *Common Control Physical Channels (CCPCH);*
- *Synchronization Channel (SCH).*

O *Downlink DPDCH* e o *Downlink DPCCH* têm a mesma função dos correspondentes de subida, mas são multiplexados no tempo. Transportam o conteúdo do canal DCH. O PDSCH transporta o canal DSCH. O CPICH é usado para a estimação do canal dedicado (pelo terminal) e para fornecer referências da estimação do canal quando os canais comuns são envolvidos. Normalmente, uma célula tem somente um CPICH, mas pode haver dois dele. Neste caso, estes canais são chamados de CPICH primário e CPICH secundário. Assim, uma área dedicada usa o CPICH secundário e o CPICH primário oferece um piloto para toda a área de cobertura da célula. Os terminais escutam o sinal piloto continuamente, pois ele é usado para algumas finalidades vitais do sistema, por exemplo, medidas de *handover*. O CCPCH é dividido em primário (P-CCPCH) e secundário (S-CCPCH). O P-CCPCH transporta o BCH na descida. O P-CCPCH está disponível de tal maneira que todos os terminais localizados dentro da cobertura de uma célula podem demodular seu conteúdo. O S-PCCPCH transporta os canais PCH e FACH. Esses canais de transporte podem usar o mesmo ou diferentes S-PCCPCH, assim uma célula possui pelo menos um S-PCCCH. A taxa de transmissão desse canal é e fixa e relativamente baixa assim como no P-PCCPCH. Finalmente o SCH fornece a informação de busca da célula para o *user equipment* (UE) que se localiza na área de cobertura da célula. Na verdade, o SCH é uma combinação de dois canais, o canal primário de sincronização (P-SCH) e o canal secundário de sincronização (S-SCH).

Outros canais físicos são:

- *CPCH Status Indication Channel (CSICH);*
- *CPCH Collision Detection Indicator Channel (CD-ICH);*
- *CPCH Channel Assignment Indicator Channel (CA-ICH);*
- *Acquisition Indication Channel (AICH).*

O CSICH usa o espaço livre que ocorre no AICH, e é usado para informar o UE sobre a existência e configuração do CPCH. Para evitar colisões (isto é, dois UE usando os mesmos padrões de identidade), um CD-ICH e um CA-ICH são usados. Esses canais físicos transferem a informação da detecção de colisão para o UE.

## 4.5 MODULAÇÃO WCDMA E APLICAÇÕES SISTÊMICAS

O WCDMA (*wide band code division multiple access*) pode ser resumido como sendo um CDMA com uma banda maior. Isso porque o sistema WCDMA utiliza 5 MHz de banda, sendo 3.84MHz de banda útil e 1.16MHz de banda de guarda, enquanto o sistema CDMA aloca apenas 1.23MHz de banda útil.

Existem duas opções para a multiplexação WCDMA, o FDD e o TDD. O FDD (*frequency duplexing division*) é a forma mais utilizada, na qual os enlaces de subida e descida alocam faixas de frequência separadas, o que o torna melhor para grandes coberturas, banda larga e serviços como telefonia móvel ou vídeo. Já o TDD (*time duplexing division*) é o esquema em que os enlaces de subida e descida alocam a mesma faixa de frequência, sendo diferenciados apenas pelo tempo em que são utilizados, ou seja, diferenciados apenas pelos seus *time slots* (o sistema WCDMA é composto por *frames*, cada um com duração de 10 ms e composto por 15 *time slots*). Esse esquema é mais aconselhável quando o serviço desejado requer alta taxa de dados com aplicações assimétricas e o usuário não necessita de grande mobilidade. A Figura 4.5 mostra a estrutura de um quadro de WCDMA.

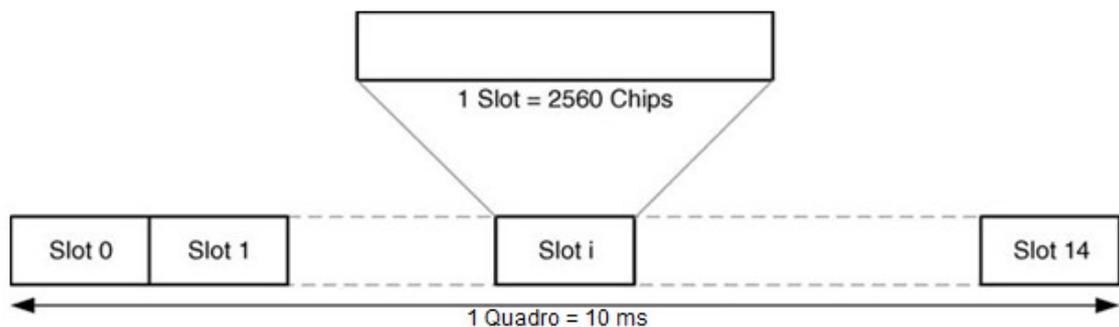


Figura 4.5. Estrutura de um quadro de WCDMA [25].

Assim como no sistema CDMA, a modulação WCDMA também utiliza fator de reuso igual à unidade, uma vez que cada sinal enviado é espalhado por toda a banda útil do sistema e células vizinhas operam na mesma frequência, com interferência interbase bastante baixa. Esse espalhamento se dá pela multiplicação do sinal por um código na unidade transmissora, chamado de código de espalhamento. Dessa forma, o sinal é transmitido em uma banda muito maior do que a sua banda original e, ao chegar à unidade receptora, é multiplicado novamente pelo mesmo código de espalhamento, recuperando-se a mensagem original, conforme mostra a Figura 4.6.

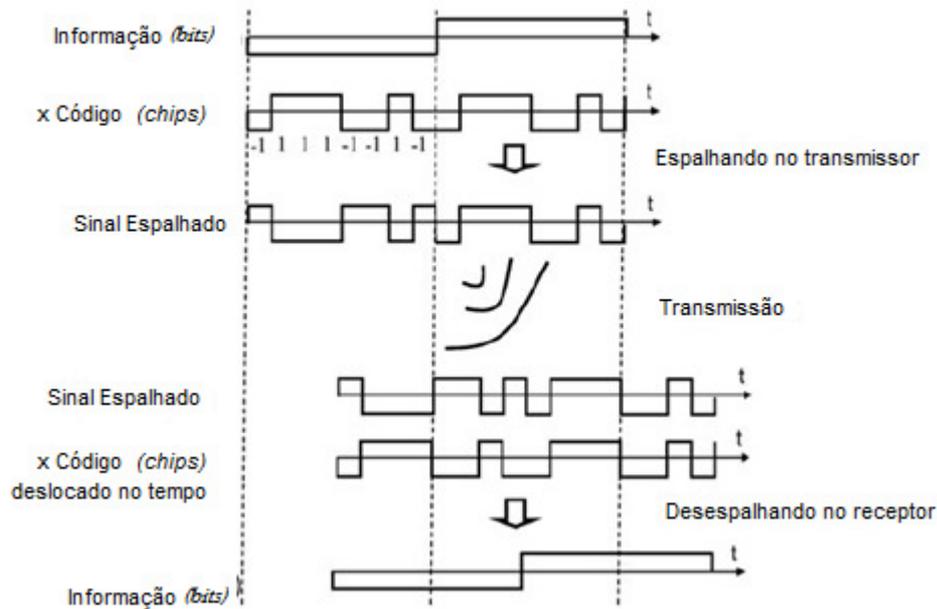


Figura 4.6. Sinal antes e depois do espalhamento. Modificada de [24].

A grande vantagem do sistema WCDMA em relação aos outros é a sua robustez, sua eficiência na utilização do espectro, a segurança (maior dificuldade em rastrear sinais por eles estarem todos misturados) e a possibilidade de enviar o sinal com menos potência, uma vez que ele foi espalhado ao longo da banda útil do sistema. O sistema, porém, também tem suas desvantagens: cada usuário sofre mais com interferência de outros sinais e, por não ter a divisão de bandas alocadas por usuários, a medida que cresce o número de usuários do sistema, diminui a taxa de subida e descida para cada um deles.

Para mandar mais de um sinal na mesma banda de frequência, o WCDMA trabalha com a ortogonalidade dos códigos de espalhamento. Assim, seria possível enviar uma infinidade de sinais na mesma banda se não fossem limitações como ruído e limites na taxa de transmissão.

Justamente pela existência dessas limitações, é necessário que o sistema seja dividido em células, cada uma coberta por uma ou mais estações. O número de usuários utilizando os serviços dentro de uma mesma célula dependerá do fator de espalhamento, determinado pelo serviço que cada usuário está utilizando.

Além do código de espalhamento, também são usados os códigos de embaralhamento e canalização na transmissão WCDMA.

Por meio do código de embaralhamento, é possível identificar diferentes usuários no *uplink* e diferentes células na descida, ou seja, é o código de embaralhamento que define de “quem” vem e para onde vai a mensagem. Na subida, teremos milhares de códigos de embaralhamento (correspondentes a milhares de usuários) que poderão ser do tipo longo ou curto, de acordo com a tecnologia utilizada na

base receptora. Já na descida, só é utilizado o código longo (truncado em 10 ms), e o número de códigos de embaralhamento primários está limitado a 512, já que esses representam as células utilizadas no sistema. Se necessário, é possível utilizar códigos de embaralhamento secundários para canais dedicados utilizando técnicas de antenas adaptadas, mas isso aumentaria a interferência dentro da célula, fazendo cair a qualidade de serviço.

Assim como o código de embaralhamento, o código de canalização também é diferente se compararmos suas ações na subida e na descida. Na subida, após o usuário ser identificado, o canal usado por ele, que ficará com seus dados de controle, será determinado pelo código de canalização. Já na descida, após a célula ser identificada, o código de canalização especifica o canal dela que será utilizado, sendo que cada usuário terá o seu código para determinado canal.

A rede UMTS será utilizada no sistema proposto como forma de garantir uma maior fiabilidade ao mesmo. Essa rede, já com infraestrutura nos centros urbanos, tem cobertura na maioria das localidades onde o transporte coletivo circula. Dessa forma, a rede UMTS pode ser aliada a VANET para serviços de maiores taxas, ou até mesmo, substituir a rede *ad hoc* quando essa não tiver um rendimento satisfatório. Para verificar a aplicabilidade dessa rede ao sistema idealizado, várias simulações são realizadas através do OPNET *Modeler*. No próximo capítulo simulações da rede UMTS, assim como as do sistema VANET, são apresentadas, além de suas respectivas análises e conclusões.

## 5 MODELAMENTO E SIMULAÇÕES DO SISTEMA PROPOSTO

*Este capítulo apresenta o modelamento do sistema e os resultados de simulação.*

### 5.1 MODELAMENTO DO SISTEMA

O modelamento consiste na construção de modelos computacionais que descrevam, da forma mais completa e precisa possível, as características e o comportamento reais dos componentes de um sistema. A tarefa de modelamento requer a observância de aspectos complexos e necessita de uma análise minuciosa quanto à sua verificação e validação. Através de um modelo adequado é possível obter resultados confiáveis que permitam levar a conclusões apropriadas sobre o desempenho de um sistema.

Para o modelamento da rede proposta, foi escolhido como base um cenário real, onde o sistema poderia vir a ser implantado. Este cenário base é a avenida W3, que fica na cidade de Brasília-DF. Um grande número de ônibus trafega diariamente por esta avenida, que é constituída por duas vias de mão única, separadas por um canteiro central. Cada uma das vias possui três pistas, e a velocidade máxima permitida é de 60 km/h. No canteiro central, não existem grandes obstáculos, apenas vegetação esparsa e estacionamentos. Margeando as pistas, existem prédios comerciais pequenos, variando de um a três andares em média. O percurso completo de ida e volta por esta avenida é de aproximadamente 25,7 quilômetros. A Figura 5.1, extraída do *software* Google Earth, mostra a foto da vista superior de um trecho da avenida W3.



Figura 5.1 . Foto da vista superior de trecho da avenida W3

As próximas seções descrevem como foram modelados os principais aspectos do sistema, que em conjunto com os modelos do *software* OPNET, foram utilizados para simular o desempenho da rede.

### 5.1.1 MOBILIDADE

O modelo de mobilidade criado busca representar a movimentação dos ônibus sobre a avenida W3. A abordagem adotada procura tornar esta movimentação mais realística que os modelos adotados por abordagens comuns de movimento aleatório.

O modelo de mobilidade criado é uma adaptação do modelo denominado “modelo de mobilidade com aleatoriedade suave” (*smooth random mobility model*) [26].

Primeiramente foi necessário estabelecer a trajetória dos ônibus, a partir de pontos escolhidos ao longo da avenida W3. Para isso, foi criada uma matriz contendo latitude, longitude e altitude desses pontos, procedimento realizado com o auxílio do *software* Google Earth. Em seguida, usou-se o *software* MATLAB para definir os pontos do percurso com espaçamentos iguais, formando segmentos tridimensionais de comprimento fixo, configurados para o valor de 5 metros, que é inferior ao comprimento de um ônibus.

Como é descrito no Anexo I, o OPNET possibilita a criação de trajetórias específicas através de dois métodos principais: por segmentos e por vetores. Como se trata de um percurso que deve passar por pontos fixos, o método de trajetória por segmentos foi considerado mais adequado e utilizado para o modelo.

A trajetória deve ser especificada para cada um dos ônibus, com informações das coordenadas dos pontos de origem e destino e o tempo de percurso entre esses pontos. Para a criação da trajetória de cada ônibus, foi criado um algoritmo em MATLAB que gera automaticamente uma trajetória em formato texto, pronto para ser importado pelo OPNET. A posição inicial de cada ônibus é escolhida aleatoriamente.

O número total de ônibus e de paradas foi estimado através da imagem de satélite fornecida pelo *software* Google Earth. Entretanto esse número pode ser ajustado à intensidade de tráfego rodoviário que se deseja simular. Foi verificado um total de 100 ônibus e 64 paradas. A Figura 5.2 mostra uma visão geral das trajetórias no OPNET com os nós posicionados no instante inicial. Uma imagem com o mapa rodoviário obtido através do *software* Google Maps foi adicionada como plano de fundo para facilitar a visualização da trajetória.

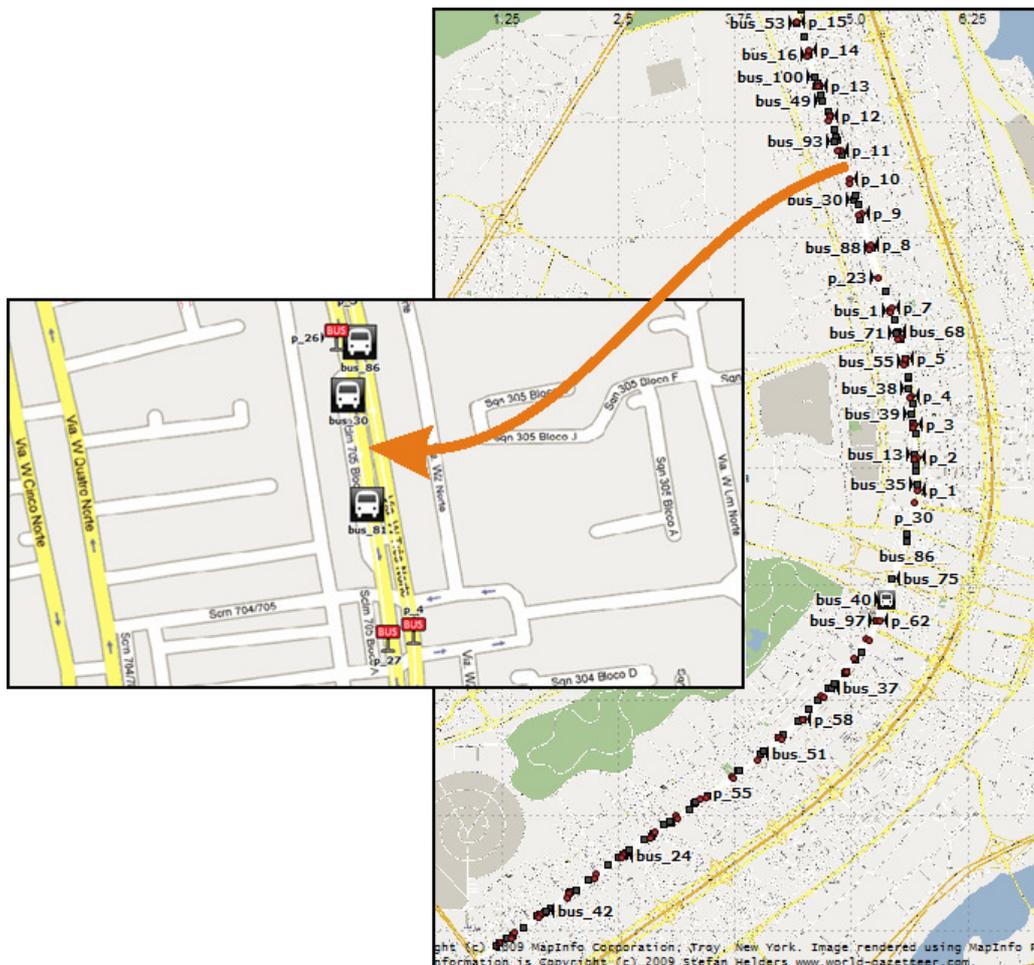


Figura 5.2. Visão geral das trajetórias sobre avenida W3.

No modelo base, a mudança de direção e de velocidade são ambos processos estocásticos. Na adaptação criada, os móveis devem seguir uma trajetória predeterminada, a avenida W3, e por isso, apenas a mudança de velocidade é aleatória.

O comportamento da velocidade é baseado na utilização de velocidades alvo e aceleração constante. A velocidade alvo é aquela que um móvel, em determinado instante de tempo, tem por objetivo alcançar.

No início do trajeto, o móvel inicia o movimento com uma velocidade predeterminada. Uma velocidade alvo e uma aceleração são determinadas, segundo uma distribuição normal. O móvel então acelera uniformemente até alcançar a velocidade alvo estipulada, e então permanece nesta velocidade por um tempo aleatório, que segue uma distribuição exponencial. Quando o tempo estipulado for alcançado, outra velocidade alvo e aceleração são determinadas e o processo é reiniciado [26].

A utilização de velocidades alvo modela o comportamento de frenagem e aceleração de veículos em movimento. Se nenhum evento ocorrer, um móvel tende a permanecer em uma velocidade constante. Mas frequentemente, eventos distintos fazem com que os veículos acelerem ou desacelerem, alterando para uma nova velocidade.

A média da velocidade e aceleração de cada ônibus, na prática, é muito dependente do motorista que está dirigindo o veículo, do modelo, do estado de conservação, além de outros fatores. Para modelar

esse comportamento, a média da distribuição normal das velocidades alvo e acelerações de cada ônibus são determinadas seguindo um outro processo aleatório. Ou seja, outra distribuição normal é utilizada para gerar essas médias. Assim, cada ônibus terá uma média de velocidade e aceleração diferente. Os desvios-padrão das distribuições normais foram mantidos iguais aos globais.

Dada a máxima velocidade da via de 60 km/h, e separando da análise o tempo que os ônibus permanecem parados, supôs-se a velocidade média global desses veículos igual a 50 km/h. O desvio-padrão das velocidades foi suposto igual a 10 km/h. Valores negativos de velocidade são desconsiderados.

As velocidades alvo são variáveis aleatórias, porém, para refletir melhor o comportamento dos veículos, foi criada uma correlação no tempo entre essas velocidades alvo. O modelo de previsão de séries temporais por médias móveis, descrito em [27], foi utilizado para correlacionar estes valores.

O valor da aceleração média de um veículo é geralmente menor que o valor de sua desaceleração, ou seja, frear é mais “rápido” que acelerar. Levando em consideração que ônibus são veículos com aceleração lenta em comparação com veículos comuns, e baseando-se nos valores utilizados por [26], supôs-se a aceleração média dos ônibus igual a  $1,0 \text{ m/s}^2$ , e o desvio-padrão da aceleração igual a  $0,3 \text{ m/s}^2$ . Para a desaceleração, foi utilizada média igual a  $-1,5 \text{ m/s}^2$  e o mesmo desvio padrão da aceleração.

A parada dos ônibus nos pontos de ônibus foi modelada atribuindo a cada ônibus uma probabilidade de parar ao passar por aquele ponto, e atribuindo a velocidade alvo zero para este ônibus. Como pela avenida W3 passam linhas de ônibus distintas, a probabilidade de parada poderá variar significativamente. Ônibus com destino a localidades de movimento intenso tem a probabilidade de parar em cada estação maior que ônibus com destino a locais remotos. Portanto, a probabilidade de parada de cada móvel foi calculada baseada em uma distribuição uniforme, com valor mínimo igual a 0,2 e máximo igual a 0,8.

O tempo de permanência de um ônibus em uma parada é outro fator a ser modelado. Testes empíricos levaram a adotar este valor como uma variável gaussiana com média igual a 10 segundos e desvio-padrão igual a 5 segundos.

Um exemplo do resultado do modelamento da velocidade pode ser observado na Figura 5.3, que mostra o gráfico da velocidade de um móvel em função do tempo durante sete minutos de percurso.

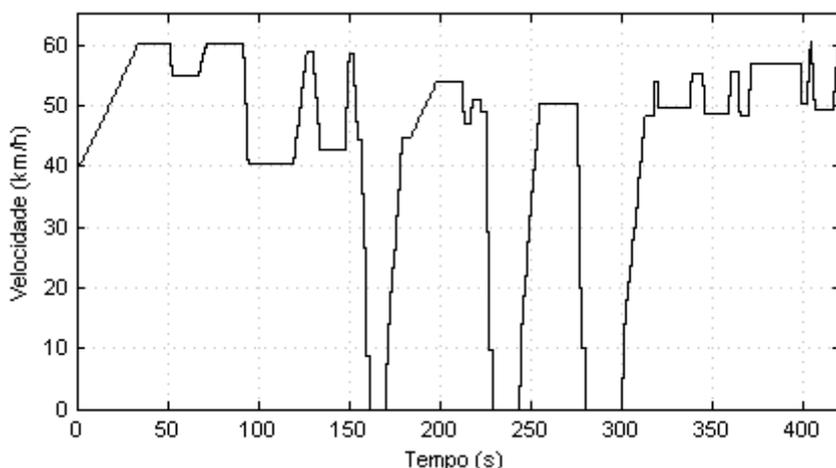


Figura 5.3. Exemplo de modelo de velocidade de um móvel ao longo do tempo

O tempo total de percurso de um ônibus, que compreende o tempo que este veículo leva para percorrer toda a trajetória modelada, é de, em média, 45 minutos. Entretanto, o tempo total de simulação adotado foi de quinze minutos, tempo suficiente para os ônibus percorrerem cerca de um terço da trajetória e gerarem dados suficientes para obter médias estatísticas confiáveis. Para desconsiderar o tráfego de inicialização e o tempo de convergência dos protocolos de roteamento, são descartados os resultados de simulação dos cinco primeiros minutos.

### 5.1.2 TRÁFEGO

O modelo de tráfego de dados está diretamente relacionado com a definição da topologia de processamento adotada no projeto. No capítulo 2, foram definidos dois tipos de processamento a serem avaliados, um tipo centralizado e um tipo centralizado com pontos e acesso. Cada tipo de processamento exige um modelamento diferente de tráfego, portanto foram criados dois modelos distintos.

Além dos modelos de tráfego específicos para os serviços oferecidos pelo sistema proposto, a utilização de outros serviços, típicos de Internet, também foi analisada. Para isso, foram utilizados os modelos de tráfego do OPNET.

O tráfego de cada ônibus é gerado através do *software* MATLAB e então importado pelo OPNET.

No tráfego para processamento do tipo centralizado, todos os ônibus enviam pacotes para o mesmo nó de destino, que é a Central de Processamento, a uma taxa constante. E a central envia pacotes para todas as paradas de ônibus, à mesma taxa.

No caso com pontos de acesso à Central, em vez de os ônibus enviarem pacotes sempre para a Central, eles escolherão um ponto de acesso mais próximo, de acordo com a posição geográfica dos mesmos. Os pontos de acesso encaminham então a mensagem para a central, utilizando um *link* direto. De forma similar, as paradas receberão pacotes dos pontos de acesso mais próximos.

Cada nó no OPNET é um modelo MANET *Station*. Independente da topologia, para modelar as informações que devem ser transmitidas por cada estação da rede, os nós são configurados para transmitir tráfego CBR (*constant bit rate*), a partir da geração, na sua camada de aplicação, de pacotes de tamanho fixo, a intervalos de tempo também fixos.

O tamanho de cada pacote é de 320 *bits*. Este tamanho é justificável pela quantidade de informações que são necessárias para os serviços desejados no sistema, conforme visto no capítulo 2 e mostrado na Tabela 5.1. O campo “Usos Diversos” é um espaço reservado para outras aplicações e serviços.

Tabela 5.1. Campos contidos no pacote do tráfego CBR

<b>Informação</b>	<b>Quantidade/Tipo</b>	<b>Quantidade de Bits</b>
Latitude	1/ <i>double</i>	64
Longitude	1/ <i>double</i>	64
Velocidade	1/ <i>double</i>	64
Identificação do Ônibus	2/ <i>int</i>	16
Data	3/ <i>int</i>	24
Hora	3/ <i>int</i>	24
Usos Diversos	-	64
Total	-	320

Já o intervalo de tempo entre a geração de pacotes consecutivos é de um segundo. Como foi suposto que a velocidade média dos ônibus é de 13,89 m/s (50 km/h), a cada segundo movimentando-se a esta velocidade um ônibus percorre distância ligeiramente superior ao seu comprimento (cerca de 13 metros). Este intervalo de tempo é, então, suficientemente pequeno para que o sistema opere sem grandes problemas com a ocorrência de perda de pacotes, atualizando as informações para o usuário sem diminuição significativa de precisão.

Para o tráfego do tipo Internet foi utilizado o modelo de tráfego do *software* OPNET. Considerou-se a aplicação HTTP (*hypertext transfer protocol*) versão 1.1. Neste modelo, cada página gerada é constituída de um objeto representando o hipertexto e mais um número aleatório de objetos representando as imagens. O tamanho do hipertexto é modelado de acordo com uma distribuição normal de média 800 *bytes* e variância 400 *bytes*. Já o número de imagens segue uma distribuição exponencial com média 5, e o tamanho das mesmas varia, segundo uma distribuição uniforme, de 500 a 2000 *bytes*. Configuram-se ônibus e paradas para gerar requisições de páginas da Internet a partir de uma distribuição de probabilidade exponencial com média de 10 segundos.

### 5.1.3 CANAL RÁDIO-MÓVEL

Apesar de ser um ferramenta de simulação poderosa o módulo *Wireless Lan* do OPNET não possui um modelo de propagação realista, não implementando, por exemplo, um modelo de *shadowing*, nem de desvanecimento de pequena escala. Por isso, para obter-se resultados mais condizentes com a realidade foi necessário incluir tal modelamento.

O modelo de canal utilizado no simulador é uma composição de modelos com desvanecimento de grande e de pequena escala. Para se observar o comportamento da rede, que utiliza a técnica OFDM, foi modelado um desvanecimento de pequena escala seletivo em frequência e variante no tempo conforme a velocidade do móvel. Mais detalhes serão dados nas próximas seções. Por sua vez, o desvanecimento de larga escala é dado por:

$$L_s(d) = P_L(d) \times X(\sigma) \quad (5.1)$$

Em que  $L_s(d)$  é a perda devido ao desvanecimento de larga escala,  $P_L(d)$  é a perda de percurso para uma distância  $d$ , e  $X(\sigma)$  é perda associada ao *shadowing* para um dado desvio padrão  $\sigma$ , que corresponde à variabilidade do ambiente, ou seja, da W3.

### 5.1.3.1 DESVANECIMENTO DE LARGA ESCALA

O modelamento de larga escala consiste no cálculo da perda de percurso de acordo com a separação entre os nós e a geração de um valor aleatório associado ao *shadowing*, que varia com posição do nó, como será explicado adiante.

O modelo de propagação utilizado no simulador é o modelo de Espaço Livre. Foi implementado um modelo de Terra Plana, entretanto, ele não chega a ser utilizado, já que a distância de *crossover* é maior do que o alcance obtido pelo padrão 802.11a, como será mostrado posteriormente.

Para modelar o *shadowing*, foi gerado, utilizando-se o *software* MATLAB, uma sequência de números aleatórios seguindo uma distribuição log-normal. No entanto, como o *shadowing* é um desvanecimento lento, foi inserida uma forte correlação entre os elementos da sequência, como descrito em [28] de modo que o comportamento da curva gerada se aproximasse de resultados descritos em [14]. Foram geradas várias curvas com média zero e diferentes valores de desvio padrão  $\sigma$  (4, 6, 8 e 10 dB), parâmetro que representa a variabilidade do meio. A Figura 5.4. Curva de *shadowing* com média zero e desvio padrão de 10 dB. mostra uma dessas curvas, bem como a sua função densidade de probabilidades comparada com uma distribuição normal.

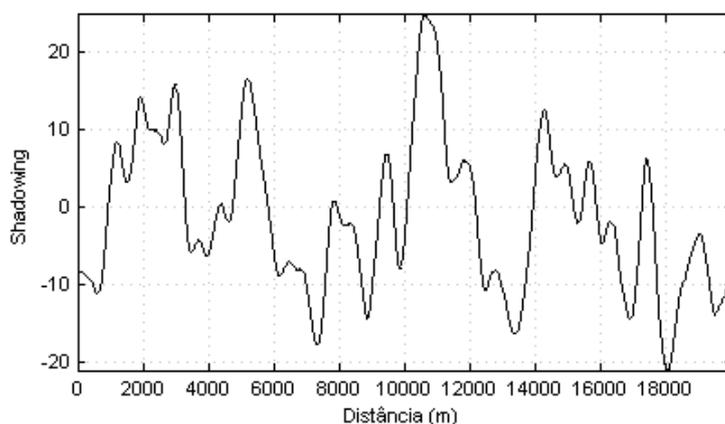


Figura 5.4. Curva de *shadowing* com média zero e desvio padrão de 10 dB.

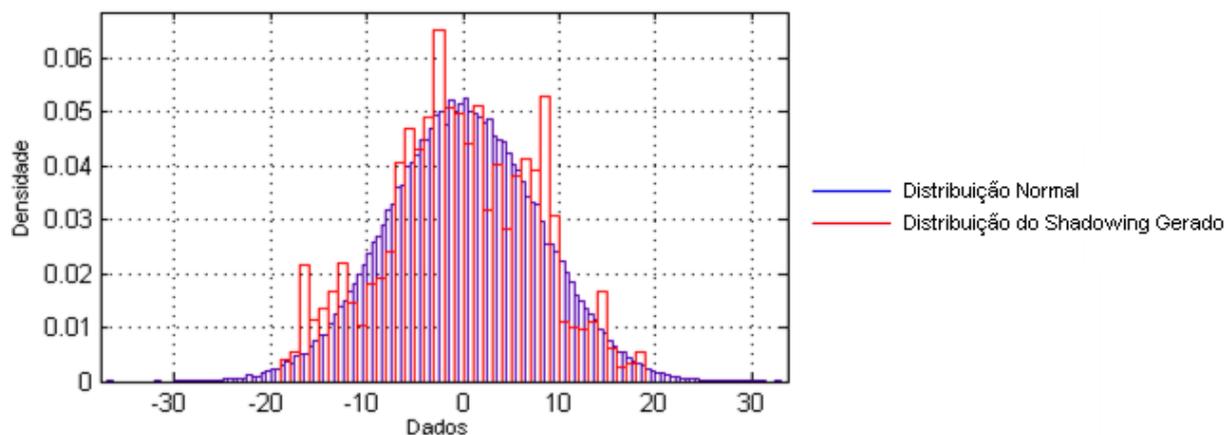


Figura 5.5. Função Densidade de Probabilidades da curva mostrada na Figura 5.4 comparada com uma Função Densidade de Probabilidades de uma distribuição normal.

Nota-se que a função densidade de probabilidades da sequência em dB aproxima-se de uma distribuição normal.

Após terem sido geradas as curvas de *shadowing*, foi necessário adicionar este comportamento à simulação do OPNET.

Como o *shadowing* é um desvanecimento de grande escala, sua influência é percebida na potência do sinal recebido. Portanto, foram feitas alterações no estágio sete do *radio transceiver pipeline* (a descrição completa dos estágios se encontra no Anexo I), o qual é responsável pelo cálculo da potência recebida.

Primeiramente, foi adicionado um atributo aos modelos dos nós para permitir escolher se a simulação será efetuada com ou sem o *shadowing*. Caso seja escolhido efetuar a simulação com o *shadowing*, no início da simulação (assim que o estágio sete é chamado pela primeira vez) é feito o carregamento da curva de *shadowing* desejada e o armazenamento da mesma em um vetor. Esta curva é a mesma para todos os nós, dado que o cenário em que eles se deslocam é o mesmo.

Após ocorrer o carregamento dos dados, foi necessário estabelecer qual critério determinaria o índice do vetor que seria utilizado a cada momento para o cálculo da potência recebida. Como o *shadowing* representa uma variação da potência média recebida do sinal em função de alterações do meio, seja por mudanças de topologia, seja por obstáculos, entre outros fatores, e devido ao fato que a trajetória variar predominantemente ao longo do eixo y, foi decidido utilizar o valor da coordenada y do nó como índice do vetor.

Caso fosse adotada apenas a metodologia descrita, o valor do *shadowing* seria constante para todas as simulações fazendo com que uma certa posição na trajetória sempre possua a mesma atenuação de sinal em função do *shadowing*. Isso faria com que o comportamento do mesmo perdesse sua característica aleatória, distorcendo os resultados obtidos. Um nó fixo, por exemplo, poderia sempre ter ganho ou perda consideráveis, fazendo com que o seu alcance de comunicação seja sempre um valor associado a esse valor de *shadowing*.

Para resolver o problema descrito, foi utilizado um *offset* para cada nó, de forma que cada um deles, apesar de utilizarem a mesma curva, experimente meios físicos diferentes a cada simulação e diferentes para cada nó. O valor deste *offset* é obtido gerando um número aleatório ao início de cada simulação, a partir do qual são gerados diferentes *offsets* aleatórios para cada nó, os quais são constantes ao longo de toda simulação. Com este valor aleatório atribuído para todos os nós, durante a simulação ele é somado ao valor obtido a partir da coordenada  $y$ , fazendo com que seja feito um deslocamento aleatório na posição inicial de cada nó na curva de *shadowing*. A Figura 5.6 ilustra o efeito desse *offset*.

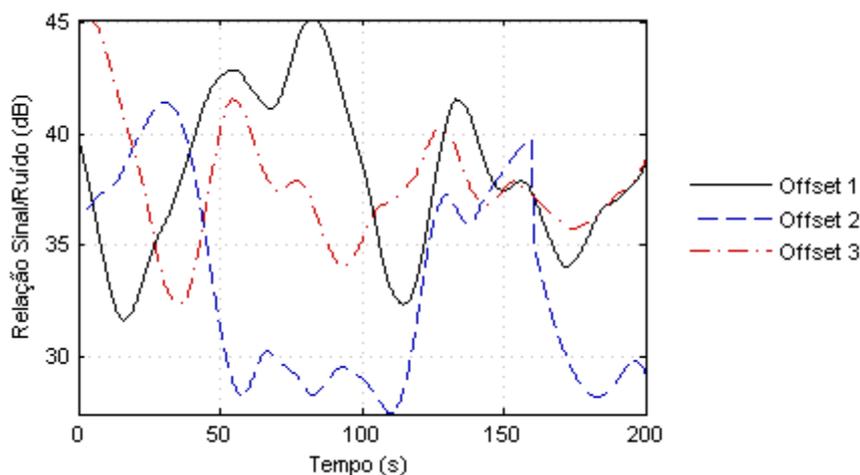


Figura 5.6. Comportamento da relação sinal/ruído em um mesmo cenário com três valores de *offset*

A Figura 5.6 foi obtida simulando um mesmo cenário com três sementes diferentes. Pode-se perceber que, apesar da curva de *shadowing* utilizada ser a mesma, as três simulações apresentam resultados diferentes, de forma que não há correlação entre as curvas resultantes de Relação Sinal/Ruído. Esse resultado permite concluir que a adição deste deslocamento aleatório faz com que, mesmo utilizando apenas uma curva de *shadowing*, os resultados sejam obtidos como se tivesse sido utilizada uma curva diferente por simulação.

Analisando-se as curvas obtidas para os valores de *offset* 1 e 3, percebe-se claramente que se tratam da mesma curva deslocada. Como pode ser visto em destaque na Figura 5.7 e na Figura 5.8, o comportamento apresentado por elas se repete nos seguimentos destacados. Entretanto, essa repetição ocorre em momentos e posições diferentes em cada simulação, fazendo com que não haja correlação entre as duas.

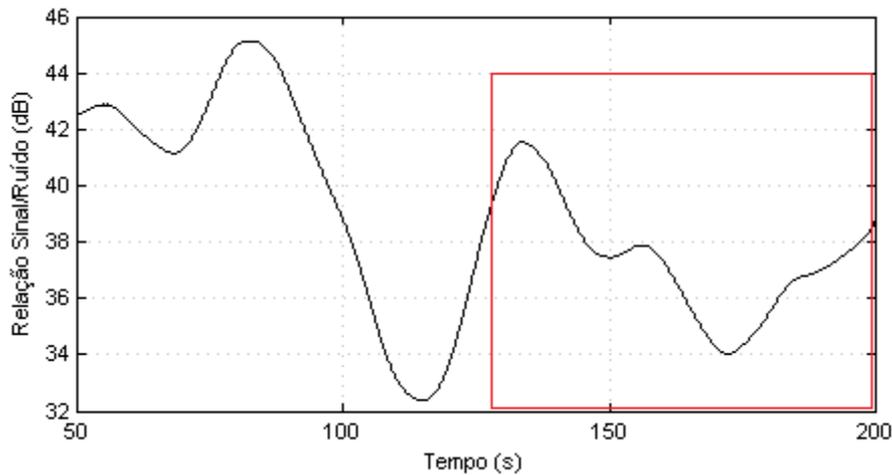


Figura 5.7. Destaque da curva de relação Sinal/Ruído com o valor de offset 1

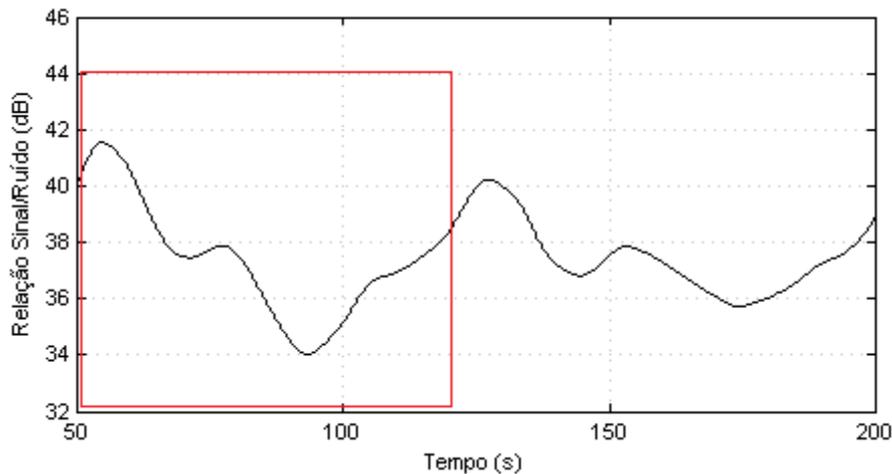


Figura 5.8. Curva de relação Sinal/Ruído com o valor de offset 3

Uma limitação da metodologia criada é o fato de poder ocorrer momentos em que o valor do índice ser maior que o número de elementos do vetor de dados. Isto ocorre em função do valor de *offset* que é somado à posição do móvel. Para contornar esta situação, ao se verificar que o índice chegou ao seu valor máximo (momento em que é utilizado o último valor do vetor de dados), ele é zerado. Consequentemente, o próximo valor que será extraído do vetor de dados será o primeiro. Esta estratégia possui o problema de gerar uma descontinuidade na curva, dado que o primeiro e o último valor do vetor de dados não são necessariamente correlacionados. Esta descontinuidade pode ser verificada na Figura 5.6, mais especificamente na curva obtida com o offset 2, entre 150 e 200 segundos.

Para evitar o comportamento descrito acima, existem basicamente duas estratégias. Uma possibilidade é gerar um vetor de dados maior que a variação da coordenada y dos móveis e limitar o valor máximo que o *offset* pode assumir, de modo que nunca se chegue ao final do vetor de dados. Uma segunda opção seria gerar uma curva de *shadowing* que possua seu começo correlacionado com o final. Foi decidido utilizar a primeira estratégia, gerando-se uma curva com o dobro do tamanho da trajetória

simulada, pois dessa forma a natureza aleatória dos dados é melhor preservada que correlacionar o início com o fim da curva.

### 5.1.3.2 DESVANECIMENTO DE PEQUENA ESCALA

Como já foi dito o módulo *Wireless Lan* do OPNET não possui nenhum modelo de desvanecimento de pequena escala implementado e este efeito é determinante no desempenho da comunicação em sistemas veiculares urbanos. Logo, para tornar os resultados das simulações mais coerentes foi necessário incluir este modelamento.

O procedimento para geração do desvanecimento de pequena escala consiste em primeiramente prever o desempenho do enlace de comunicação 802.11a em um canal variante no tempo e seletivo em frequência. Como esse padrão utiliza a tecnologia OFDM o canal atua de forma diferente em cada uma das subportadoras. É computacionalmente inviável realizar essa previsão utilizando o próprio OPNET, já que ele é um simulador sistêmico e muitos cálculos seriam necessários para realizar esse tipo de simulação, o que seria algo computacionalmente dispendioso [29] [30].

Para resolver esse problema foi utilizado um simulador de enlace adequadamente ajustado para o padrão 802.11a. Com isso foi possível obter, de uma forma computacionalmente mais simples e rápida, o desempenho do enlace para diferentes comportamentos de um canal do tipo seletivo em frequência e variante no tempo.

Com o quadro do 802.11a devidamente formatado e utilizando na transmissão pacotes de tamanho fixo igual a 320 bits, já que grande parte dos testes serão feitos com esse tamanho de pacote, modulados em BPSK com taxa de codificação 1/2, por motivos que serão explicados posteriormente, rodou-se várias vezes o simulador de enlace e obteve-se vários valores de BER, para diferentes valores de  $E_b/N_0$  e para diferentes comportamentos de canal, como mostrado na Figura 5.9. Foram utilizados valores de  $E_b/N_0$  que variam de -10 dB a 20 dB em passos de 1 dB. Como o padrão 802.11a utiliza a tecnologia OFDM, esse valor representa o  $E_b/N_0$  de cada subportadora OFDM antes de passar pelo canal, como mostrado na Figura 5.10 para um caso específico de  $E_b/N_0$  igual a 10 dB. No caso do 802.11a são utilizadas 48 subportadoras para a transmissão da informação.

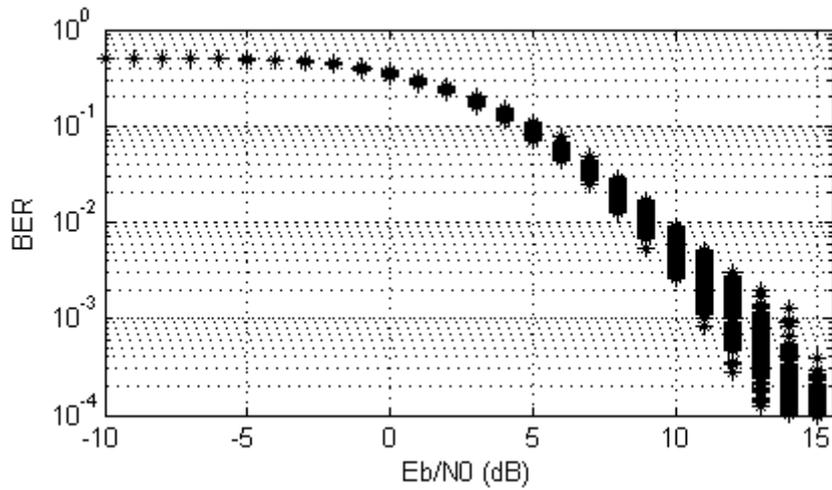


Figura 5.9. BER vs  $E_b/N_0$  para diferentes comportamentos de canal

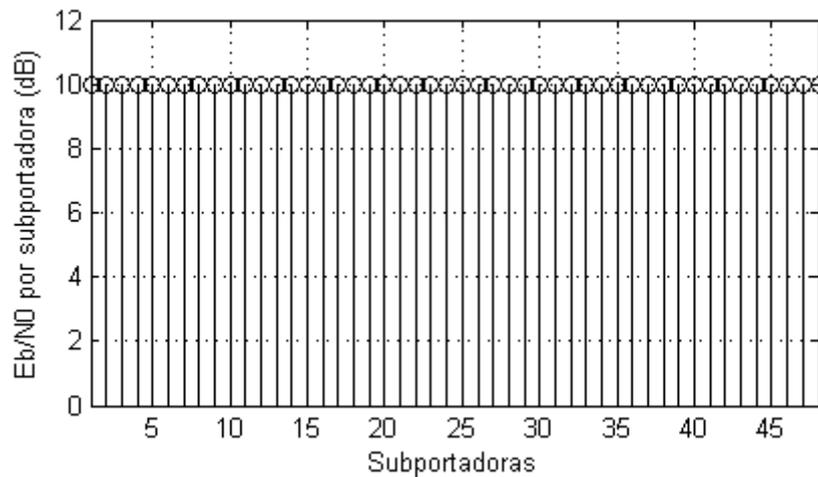


Figura 5.10. Perfil de  $E_b/N_0$  das 48 subportadoras OFDM antes de passar pelo canal

Como o modelo de canal utilizado pelo simulador de enlace é variante no tempo, a cada vez que o simulador é rodado, um comportamento diferente é atribuído ao canal. Isso faz com que para um mesmo valor de  $E_b/N_0$  seja possível obter diferentes valores de BER, já que o perfil de relação sinal/ruído das 48 subportadoras OFDM muda de acordo com as condições do canal, a Figura 5.11 mostra o perfil de relação sinal/ruído da Figura 5.10 após passar por um dado canal seletivo em frequência. Pode haver momentos em que o canal está favorável ou não, o que faz com que a BER para um dado  $E_b/N_0$  seja maior ou menor.

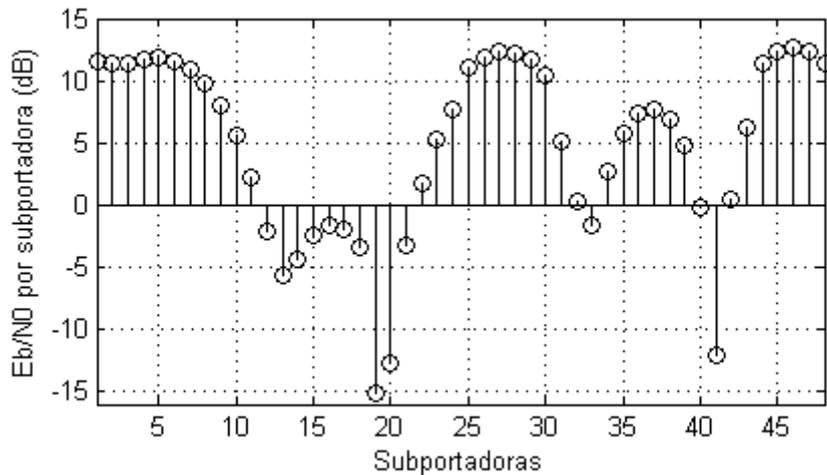


Figura 5.11. Perfil de  $E_b/N_0$  das 48 subportadoras OFDM depois de passar pelo canal

A partir dos pontos mostrados na Figura 5.9 é necessário extrair uma curva que modele de forma adequada o comportamento do sistema 802.11a para um canal multipercurso e utilizar essa informação no simulador OPNET, ou seja, é necessário estabelecer uma interface *link-to-system* [29] [30].

Para isso é utilizado algum método de compressão que mapeie os pontos mostrados na Figura 5.9 em uma única curva de BER. Vários estudos apontam para o método *Mutual Information Based Effective SINR Mapping* (MIESM) como sendo o mais adequado para sistemas que utilizam a tecnologia OFDM [29][30].

Para realizar esse método é necessário conhecer qual é a relação sinal-ruído de cada subportadora utilizada para a transmissão do pacote dado um determinado comportamento de canal para aquele instante de transmissão.

Conhecendo a relação sinal/ruído de cada subportadora é necessário mapear esse valor em outro parâmetro que fornece, de certa forma, uma medida de quantidade de informação carregada pela subportadora, esse parâmetro é chamado de RBIR (*received bit mutual information rate*). Esse mapeamento é feito utilizando funções adequadas para cada tipo de modulação [29][30].

Obtido a RBIR de cada subportadora é feita uma média entre os valores de RBIR das 48 subportadoras, para um determinado comportamento de canal, a esse valor é associado um valor de BER calculado anteriormente. Feito o mapeamento obtém-se vários valores de BER associados a vários valores de RBIR. Posteriormente é realizado um processo de fitagem do qual se obtém uma curva única que relaciona valores de RBIR com valores de BER. Essa curva passa então a ser utilizada pelo simulador sistêmico. A Figura 5.12 mostra a nuvem de pontos de BER e RBIR após o mapeamento e a curva obtida pelo processo de fitagem. Mais detalhes sobre esse e outros métodos de mapeamento podem ser obtidos em [29] e [30], já que a descrição detalhada dos mesmos foge do escopo deste trabalho.

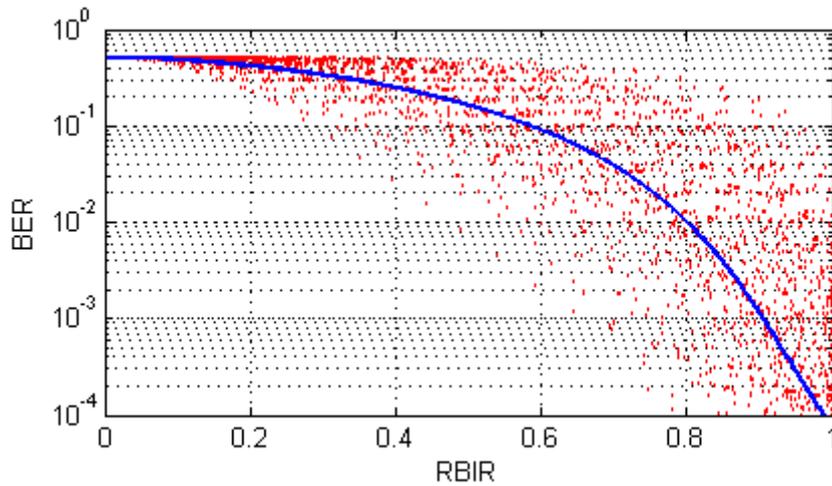


Figura 5.12. Nuvem de pontos de RBIR versus BER após o mapeamento e curva obtida por processo de fitagem

Feito isso é necessário utilizar também um simulador de modelo espacial de canal capaz de gerar um canal multipercurso seletivo em frequência e variante no tempo que será utilizado pelo simulador sistêmico OPNET para determinar qual é o perfil de relação sinal/ruído das 48 subportadoras em um determinado instante de transmissão de um pacote. Para isso foi utilizado o simulador *Winner* [31].

Foram gerados canais para diferentes velocidades dos móveis, basicamente para as velocidades de 0,5, 5, 10, 15 e 20 m/s. A Figura 5.13 mostra um exemplo da resposta em frequência de canal seletivo em frequência para determinado instante, gerado pelo *Winner*. Como esse canal é variante no tempo, a sua resposta impulsiva varia, fazendo com que a resposta em frequência também varie com o tempo.

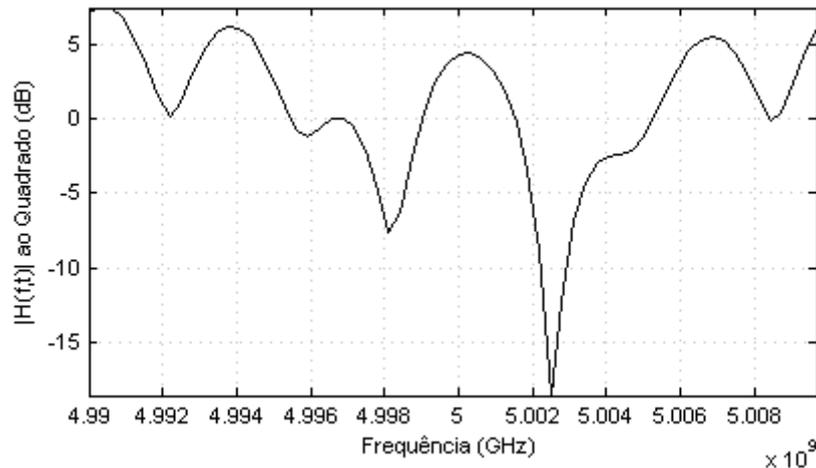


Figura 5.13. Exemplo de canal seletivo em frequência para determinado instante de tempo

Pode-se calcular o tempo de coerência do canal para as diferentes velocidades para se ter uma idéia de quão rapidamente varia essa resposta em frequência. O tempo de coerência é uma medida estatística que quantifica o período em que o canal apresenta forte correlação de amplitude. Supondo uma correlação maior do que 0,5 entre duas amostras temporais consecutivas o tempo de coerência ( $T_c$ ) será [14]:

$$T_c \approx \frac{9}{16\pi \times f_m} \quad (5.2)$$

Em que  $f_m$  é o máximo desvio Doppler dado por  $v/\lambda$ , em que  $v$  é velocidade do terminal móvel e  $\lambda$  é o comprimento de onda do sinal transmitido. Realizando os cálculos têm-se os seguintes resultados, mostrados na Tabela 5.2, para as diferentes velocidades:

Tabela 5.2. Tempo de coerência para diferentes velocidades do móvel

<b>Velocidade</b>	<b>0,5 m/s</b>	<b>5 m/s</b>	<b>10 m/s</b>	<b>15 m/s</b>	<b>20 m/s</b>
<b>Tempo de Coerência (ms)</b>	21,5	2,15	1,07	0,72	0,54

Pode-se observar que o menor tempo de coerência ocorre para o canal de 20 m/s, como o período de símbolo do padrão IEEE 802.11a é de 4  $\mu$ s, o tempo de coerência é de aproximadamente 135 símbolos OFDM.

Com o canal gerado é possível determinar qual a resposta em frequência do mesmo para diferentes instantes de tempo. Dessa forma é possível determinar qual a relação sinal/ruído de cada uma das 48 subportadoras para cada comportamento em frequência do canal. Para isso, primeiramente atribui-se um valor médio de relação sinal/ruído fornecido pelo OPNET para cada uma das subportadoras. Posteriormente multiplica-se o módulo da função transferência do canal ao quadrado  $|H(f,t)|^2$ , que representa a energia do canal, pela relação sinal/ruído média das 48 subportadoras. Posteriormente é feito o mapeamento e compressão dessas relações sinal/ruído para um valor de RBIR que será utilizada pelo simulador de rede para estimar qual será a BER para aquele enlace, naquele instante de tempo.

Com o valor da BER para aquela transmissão o OPNET realiza alguns cálculos no estágio 12 do *Transceiver Pipeline*, mais detalhes podem ser vistos no Anexo I, e com isso estima a quantidade de bits errados para o pacote transmitido.

Com as curvas de BER obtidas através do método descrito acima, novamente foi necessário inserir o efeito dessas curvas na simulação do OPNET.

A grande quantidade de dados necessária para representar fielmente os efeitos de pequena escala é um fator limitante para diversos parâmetros da simulação. Como o tempo de coerência do canal é muito pequeno, chegando a 0,5 ms, caso fosse necessário gerar dados para um tempo grande de simulação, o tamanho dos vetores de dados tornariam o carregamento e inicialização da simulação muito lentos. Portanto, foi estipulado que seriam utilizados 150 mil valores de respostas de canal para cada velocidade e relação sinal/ruído, sendo que, em simulações de duração superior a esse valor, o mesmo canal seria utilizado repetidamente. Como o *fading* é um fator de pequena escala que varia rapidamente e para pequenas distâncias, essa simplificação não gera uma perda de precisão considerável.

Assim como foi feito para o *shadowing*, foi gerado um valor aleatório de offset para obter o efeito de várias curvas a partir de apenas uma gerada.

Como o desvanecimento de pequena escala varia em distâncias muito pequenas, da ordem de comprimento de onda, a velocidade dos móveis possui uma grande influência na resposta do canal. Deve-se então gerar diferentes curvas para diferentes velocidades de modo a representar fielmente o efeito do deslocamento dos móveis. Entretanto, caso sejam geradas curvas para muitas velocidades diferentes, ou seja, curvas com um espaçamento de velocidade pequeno entre elas, acontecerão muitas mudanças de curvas, dado que a velocidade dos móveis varia. Essa mudança de curvas faz com que, nos momentos de transição, não haja correlação entre um ponto utilizado e o anterior. Portanto, deve ser estipulada a quantidade de curvas, em outras palavras, o distanciamento entre cada curva, de modo que se obtenha uma boa precisão na simulação sem tornar a inicialização muito lenta em função da grande quantidade de dados a ser carregada e sem causar uma grande quantidade de descontinuidades ao longo da simulação. Foi escolhido um intervalo de 5 m/s para cada curva, gerando-se dados para 0,5, 5, 10, 15 e 20 m/s. Para definir qual curva será utilizada, utilizou-se um intervalo de mais ou menos 2,5 m/s. Ou seja, caso a velocidade do móvel seja menor que 2,49 m/s, é utilizada a curva de 0 m/s. Caso a velocidade do móvel esteja entre 2,50 m/s e 7,5 m/s, é utilizada a curva de 5 m/s e assim por diante.

Definida a quantidade de dados a serem utilizados, novamente foi criado um atributo para selecionar se a simulação seria efetuada com ou sem o efeito do desvanecimento de pequena escala. Caso seja selecionada a opção com *fading*, no início da simulação, os dados anteriormente gerados são carregados em matrizes que armazenam para cada velocidade, tempo de simulação e relação sinal/ruído um valor resultante de BER. Portanto, para cada pacote recebido é verificado qual o tempo de simulação em que esse evento ocorreu, qual a velocidade do móvel e qual a relação sinal/ruído do pacote recebido.

Com esses parâmetros determinados, atribui-se uma probabilidade de erro de *bit* para cada pacote, a qual será utilizado por um outro estágio do *radio transceiver pipeline* para determinar se ocorrerá ou não um erro na recepção dos pacotes. Como o padrão 802.11 não estipula que exista correção de erros (apesar de fabricantes terem a liberdade de implementar essa funcionalidade), caso ocorra erro em pelo menos um *bit*, o pacote inteiro é descartado. O efeito destes descartes é a queda do *throughput*, como pode ser verificado na Figura 5.14.

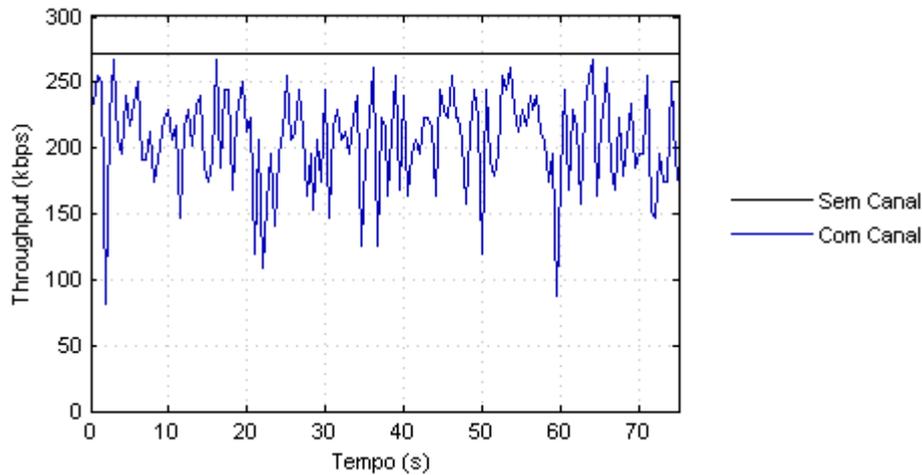


Figura 5.14. Efeito do *fading* no desempenho da comunicação

A Figura 5.14 ilustra o comportamento do *throughput* instantâneo de dois móveis se comunicando a uma distância constante igual a 400 m e ambos se deslocando a 15 m/s. Nota-se que o *throughput* observado no caso com canal é sempre menor que no caso sem canal. Isso ocorre porque na simulação com canal são atribuídos valores de BER sempre diferentes de zero. Já na sem canal, a BER é sempre igual a zero, fazendo com que esta simulação sempre apresente um desempenho maior.

Um fator determinante para o comportamento do *throughput* é a relação sinal/ruído. Como ela está diretamente relacionada à potência de sinal recebida, a distância entre os nós possui uma grande influência em seu valor. A seguir são apresentadas duas figuras que ilustram esta influência.

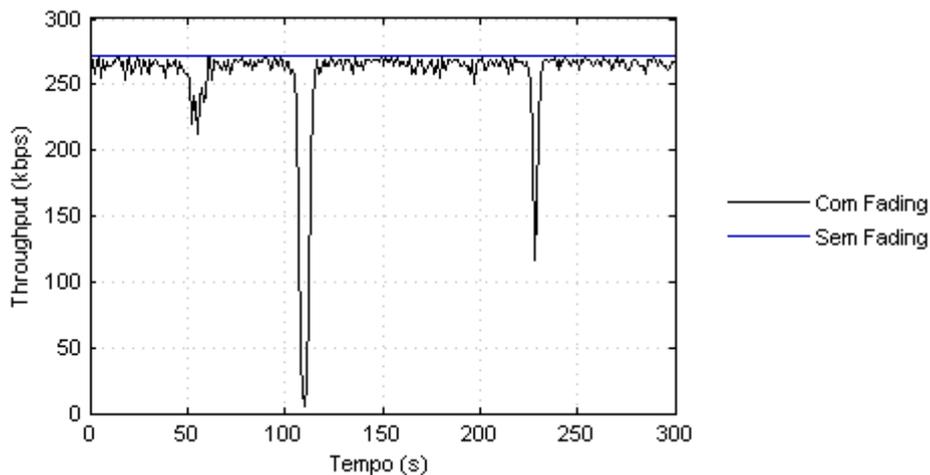


Figura 5.15. *Throughput* obtido com os móveis a 200 m de distância

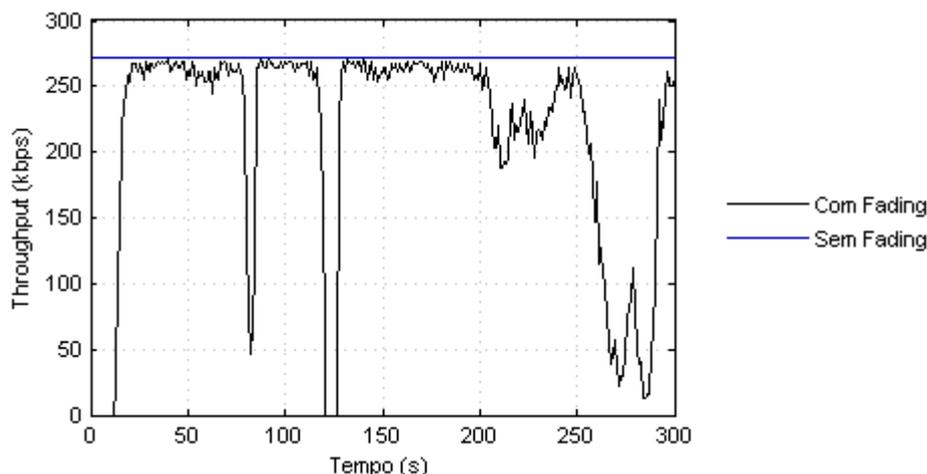


Figura 5.16. *Throughput* obtido com os móveis a 500 m de distância

Na Figura 5.15 a distância entre os móveis é igual a 200 m e na Figura 5.16 a distância é de 500 m. Essa diferença na distância faz com que a relação sinal/ruído seja menor no segundo caso, o que aumenta a probabilidade de erro de *bit*, degradando o desempenho. Outra comparação que pode ser feita é entre a Figura 5.14 e essas duas, dado que estas foram simuladas para a velocidade de 2 m/s. Percebe-se que a taxa de variação do *throughput* no caso com velocidade igual a 15 m/s é maior que nos outros, pois o tempo de coerência do canal é menor quanto maior a velocidade. Logo, a resposta em frequência do canal varia mais rapidamente, fazendo com que a BER também varia de forma mais rápida.

#### 5.1.4 OUTRAS CONFIGURAÇÕES DO SISTEMA VANET

A rede que utiliza pontos de acesso é na verdade um modo de operação híbrido, mesclando o modo Infraestrutura e o modo *ad hoc*. Nessa situação os pontos de acesso não executam as mesmas funções que executariam no modo Infraestrutura. A estação de origem, ao transmitir para a central, determina qual o ponto de acesso mais próximo da sua posição, escolhendo-o como destino de suas mensagens. A mensagem chega até o ponto de acesso através do roteamento, realizado entre as estações em modo *ad hoc* posicionadas entre a origem e o ponto de acesso. A central, sabendo da localização das paradas, determina a qual ponto de acesso enviar cada mensagem.

Para aplicações de Internet, a central deve ser capaz de armazenar o ponto de acesso que recebeu a requisição do ônibus e retornar a resposta pelo mesmo caminho.

Foi considerada potência de transmissão dos nós igual a 71 mW e ganhos das antenas transmissora e receptora de 2 dBi. Tais valores foram extraídos de especificações de equipamentos encontrados no mercado, mais especificamente do ponto de acesso Krazer WAP 354H. O Anexo II apresenta as especificações técnicas deste equipamento.

Para o sistema proposto, a taxa de transmissão requerida por cada estação é muito reduzida, conforme avaliado na Seção 5.1.2. Além disso, a sensibilidade dos receptores deve ser a menor possível de

forma a maximizar o alcance de cada nó e reduzir as áreas sem cobertura da rede. Os valores da taxa de transmissão e da sensibilidade dos receptores dependem da técnica de modulação empregada. Para atender aos requisitos do sistema, a técnica de modulação adotada foi a BPSK, que, para o padrão IEEE 802.11a, permite uma taxa de transmissão de 6 Mbps e uma sensibilidade do receptor de -82 dBm, conforme Tabela 3.2 e Tabela 3.3. Um estudo da distância máxima de comunicação para cada taxa de transmissão é realizado através de simulações e seu resultado será apresentado neste capítulo.

Na configuração da rede utilizando pontos de acesso, o número de pontos de acesso pode ser determinante para o desempenho do sistema. Quanto maior o número de pontos de acesso, menor o número de saltos que cada pacote deve percorrer, facilitando o processo de roteamento. Entretanto, maior será a infraestrutura necessária para o *backbone* da rede. Para o modelamento do sistema, adotou-se o uso de seis paradas como pontos de acesso. A escolha levou em conta o posicionamento geográfico, fazendo com que cada ponto de acesso fosse responsável pela cobertura de uma área com aproximadamente 2 km de raio. Contudo, um maior ou menor número de pontos de acesso pode ser escolhido. Os resultados das simulações apontarão a necessidade de aumentar ou diminuir este número.

O período de sinalização, que é o intervalo entre duas mensagens de *hello* consecutivas, é um importante parâmetro dos protocolos de roteamento e deve ser ajustado de acordo com o grau de mobilidade da rede. Foi adotado o tempo de 1 segundo para este período. Entretanto, após a escolha da topologia e do protocolo de roteamento com melhor desempenho, este valor será redimensionado para melhor se ajustar ao sistema.

Demais atributos foram mantidos conforme padrão ou recomendações dos protocolos e tecnologias utilizados.

### 5.1.5 SISTEMA CELULAR UMTS

O sistema foi também implementado na topologia celular utilizando-se o 3G UMTS. Em centros urbanos, é usual, pela quantidade de informação entre os usuários, que cada *Node-B* sirva centenas de usuário, cada RNC atenda a aproximadamente 25 *Node-Bs*, uma SGSN chega a atender cerca de 20 RNCs e um GGSN é suficiente para servir de gateway para outras redes. Sendo assim, a topologia criada para o sistema proposto consiste em UEs, (ônibus e paradas de ônibus), 52 *Node-Bs*, duas RNCs, uma SGSN e uma GGSN. O sistema celular é tipicamente centralizado, no qual um servidor é responsável por receber os dados dos ônibus, analisá-los e encaminhá-los para os terminais devidos. Para ambas as topologias, foram dispostos os nós da rede conforme descrito a seguir.

Os ônibus (UEs móveis) possuem trajetórias conforme descritas na Seção 5.1.1. O modelo de tráfego utiliza o processamento centralizado, conforme explicado na Seção 5.1.2. Esses UEs são vinculados a uma SGSN que fará o controle do seu tráfego. Os principais atributos desses usuários que devem ser configurados são:

- ID da SGSN que o serve;
- UE IMSI (*international mobile subscriber identity*). Esse valor é gerado automaticamente para cada usuário da rede no início da simulação;
- UMTS GMM Timers. Esses tempos são os valores padrão da *Release 5*;
- Configuração do canal lógico: Utilizados os canais padrão da *Release 5*.

O ID da SGSN que o serve deve ser configurado para que cada usuário esteja vinculado a uma SGSN, que fará o controle de sessões, estabelecerá os valores QoS para ele, entre outras funcionalidades já mencionadas. O UE deve portanto ter um número de IMSI a ele associado.

Para localização dos *Node-Bs*, foi consultada a Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL) [32] e foi utilizado o mesmo posicionamento das *Node-Bs* de uma das empresas de telefonia celular de Brasília. Para descrição desses elementos da rede, ver Seção 4.2. Nem todas as *Node-Bs* colocadas no sistema serão de fato utilizadas pela rede, pois algumas das *Node-Bs* não se encontram perto da avenida W3, não afetando na cobertura nessa área. Ao todo, são 52 *Node-Bs* vinculadas às RNCs, as quais, cerca de 30 foram efetivamente utilizadas. A partir de simulações foi possível verificar que as *Node-Bs* utilizadas permitem a cobertura total da área simulada. A simulação feita consistia em um único móvel se movimentando pela via, percorrendo ela na sua totalidade. O UE conseguiu transmitir informações a um servidor a todo instante, mostrando que a disposição das *Node-Bs* oferece cobertura em toda a área estudada. As *Node-Bs*, além de outras funções, medem a qualidade dos sinais recebidos e realizam o controle de potência. O raio médio de uma célula em grandes centros é de cerca de 0,5 km para o 3G, sendo, portanto estabelecido que cada *Node-B* tem uma área de cobertura com esse raio, de forma que a potencia de transmissão é ajustada para permitir essa cobertura. Os principais parâmetros configurados são:

- ID da RNC que está servindo a *Node-B*;
- Potência de transmissão do canal comum piloto: 0,5 W;
- Parâmetros de Perdas de percurso (*pathloss*): *shadowing* (10 dB), valor padrão para esse tipo de ambiente; e Modelo de perdas para ambientes veiculares;
- Potencia de Transmissão do FACH: Calculado para a área de cobertura pedida (500 m).

Foi necessária a utilização de duas RNCs para o sistema proposto. A RNC controla os recursos de rádio, e é também a responsável pelo *handover*. Cada uma com 26 *Node-Bs* a ela conectadas. De acordo com dados do atual sistema utilizado no DF, cada RNC cobre cerca de 25 *Node-Bs*, por isso foram utilizadas 2 RNCs. Essas RNCs são vinculadas a uma SGSN. Os principais atributos desse nó:

- ID, para que uma determinada *Node-B* possa se comunicar com essa RNC;
- Parâmetros de *handover*: Habilita e desabilita *soft* e *hard handovers*. Na simulação o *soft handover* é habilitado.

- Parâmetros de controle de admissão – fatores de carga de *Uplink* e *downlink*, máxima potencia disponível: valores da *Release 5*;
- *Timers* da RNC: tempo de processamento, de inatividade, de atividade e de fila. Usados valores padrão.

Por fim, o sistema conta com uma SGSN e uma GGSN. Cada SGSN poderia ter a si conectadas até 20 RNCs. A SGSN é responsável pelo controle principal da rede. O GGSN é o *gateway* para outras redes comutadas a pacotes, como internet.

Para o caso de um tráfego centralizado, o servidor utilizado pelo sistema será conectado ao GGSN, através da rede IP.

Os principais atributos a serem configurados para o CN são:

- ID;
- *Timers*.

Além dos elementos necessários para o funcionamento do sistema, foram modelados usuários externos ao sistema, que poderiam influenciar o funcionamento do mesmo. Esses UEs são usuários móveis que possuem trajetórias aleatórias pela avenida W3 e áreas próximas. O modelo de mobilidade *Random Waypoint*, disponível no OPNET, foi utilizado para simular o comportamento desses nós. Eles utilizam serviços multimídia como VoIP e Vídeo Conferências. Cada um dos UEs transmite cerca de 10 kbps para outros UEs de forma, também, aleatória, utilizando uma distribuição normal. Eles também são vinculados à SGSN através do ID.

## 5.2 RESULTADOS E ANÁLISE DO SISTEMA VANET

Nesta seção são apresentados os resultados e as análises das simulações da rede VANET. Inicialmente são descritas as estatísticas utilizadas. As análises abordam aspectos do padrão IEEE 802.11a e do canal rádio-móvel modelado. Em seguida, os resultados de simulações do sistema proposto são utilizados para a comparação do seu desempenho em relação às duas topologias e aos três protocolos de roteamento. O melhor desempenho atingido é utilizado como base para o dimensionamento final dos parâmetros dos protocolos analisados. Finalmente, testa-se a possibilidade de utilização do sistema para fornecer outros serviços aos usuários, como acesso à Internet.

### 5.2.1 ESTATÍSTICAS DE SIMULAÇÃO

A fim de simplificar o entendimento dos resultados de simulação da rede *ad hoc*, nesta seção serão listados os significados de cada uma das estatísticas a serem apresentadas.

Atraso: tempo decorrido entre a geração da informação na camada de aplicação de um nó de origem até o seu recebimento na camada de aplicação do nó de destino. No cômputo da média do atraso são

desconsiderados os valores tendendo ao infinito, situação que ocorre quando o pacote é descartado e não chega ao destino.

BER (*bit error rate*): Taxa de erro de *bit*.

Carga: tráfego transferido de camadas superiores para a subcamada MAC, em *bits* por segundo. Nesta estatística são contabilizados tanto os *bytes* de informação (*payload*) quanto os *bytes* do *overhead* de encapsulamento.

Eficiência: razão entre o tráfego recebido na camada de aplicação dos nós de destino e o tráfego gerado na camada de aplicação dos nós de origem.

*Throughput*: Taxa de dados, em bps, transferida da subcamada MAC para as camadas superiores.

Perdas por Ultrapassagem do Limite de Retransmissões: Taxa, em bps, de informação descartada por motivo de não recebimento de ACK em nenhuma (re) transmissão, atingindo-se o número limite de retransmissões. O número máximo de retransmissões é um parâmetro ajustável do padrão IEEE 802.11.

SNR (*signal-to-noise ratio*): Razão entre a potência do sinal recebido e a potência de ruído.

### 5.2.2 SIMULAÇÕES DEMONSTRATIVAS DE ASPECTOS DO PADRÃO IEEE 802.11a

Nesta seção são realizadas simulações com a finalidade de validar o modelamento do *software* OPNET para o padrão IEEE 802.11a e verificar a influência de parâmetros ajustáveis desse padrão. São apresentados gráficos comparativos de desempenho, relacionando o *throughput* efetivo com a taxa de transmissão, a fim de analisar a variação do tamanho dos pacotes e a utilização ou não dos mecanismos de RTS/CTS e de fragmentação. Em seguida demonstra-se o impacto da utilização de RTS/CTS na SNR do receptor.

A partir da análise dos tempos gastos durante o envio de um pacote de dados na operação atômica, é possível sintetizar uma fórmula que calcule a taxa de transmissão efetiva de um enlace 802.11. Ou seja, é possível calcular a quantidade de dados transmitida por segundo, descontados os *overheads*, encapsulamento e atrasos, considerando um enlace sem retransmissões. O cálculo desenvolvido é expresso pelas Equações 5.3 e 5.4. Esta fórmula pode ser usada como forma de validar os resultados obtidos pelas simulações desta seção.

$$B_{total} = B_{dados} + B_{MAC} + B_{encap} + N_{ACK} B_{ACK} + B_{RTS} + B_{CTS} \quad (5.3)$$

$$R_{ef} = \frac{B_{dados} + B_{encap}}{B_{total} T_{bit} + T_{CW} + N_{SIFS} T_{SIFS} + T_{DIFS} + T_{pre} + T_{PLCP}} \quad (5.4)$$

Os significados dos termos dessa equação estão relacionados na Tabela 5.3.

Tabela 5.3. Parâmetros das Equações 5.3 e 5.4

Parâmetro	Descrição	Valor Padrão 802.11a
$B_{total}$	Número de <i>bits</i> total em uma operação atômica	-
$T_{bit}$	Duração de um <i>bit</i> , em $\mu$ s.	-
$R_{ef}$	<i>Throughput</i> Efetivo, em Mbps.	-
$B_{dados}$	Número de <i>bits</i> de informação por pacote.	-
$B_{MAC}$	Número de <i>bits</i> de <i>overhead</i> MAC.	288
$B_{encap}$	Número de <i>bits</i> do <i>overhead</i> de encapsulamento. Foram considerados os protocolos IP e UDP.	224
$N_{ACK}$	Número de quadros ACK.	-
$B_{ACK}$	Número de <i>bits</i> de um quadro ACK.	144
$B_{RTS}$	Número de <i>bits</i> de um quadro RTS.	160
$B_{CTS}$	Número de <i>bits</i> de um quadro CTS.	144
$T_{CW}$	Média da duração da janela de contenção, em $\mu$ s. Obtida pela multiplicação do <i>time slot</i> pela média de $CW_{MIN}$ .	72
$N_{SIFS}$	Número de SIFS na operação atômica.	-
$T_{SIFS}$	Duração de um SIFS, em $\mu$ s.	16
$T_{DIFS}$	Duração de um DIFS, em $\mu$ s.	34
$T_{pre}$	Duração do preâmbulo, em $\mu$ s.	20
$T_{PLCP}$	Duração do PLCP, em $\mu$ s.	4

### 5.2.2.1 INFLUÊNCIA DO TAMANHO DOS PACOTES

Para verificar a influência do tamanho dos pacotes no *throughput* da rede, foi realizada uma simulação variando, para cada taxa de transmissão disponível no padrão 802.11a, o tamanho do pacote de dados enviado.

A Figura 5.17 apresenta o resultado da simulação com dois nós parados que se comunicam usando o padrão IEEE 802.11a. O cenário é constituído de apenas dois nós. O nó transmissor gera tráfego CBR (*constant bit rate*) a taxas muito maiores que 54 Mbps (a máxima taxa de transmissão suportada pelo padrão 802.11a), enviando pacotes de tamanho fixo ao outro nó. O nó receptor não gera tráfego de informação, apenas recebe os dados gerados pelo nó transmissor. O gráfico mostra o *throughput* no receptor em função da taxa de transmissão, para três tamanhos de pacotes.

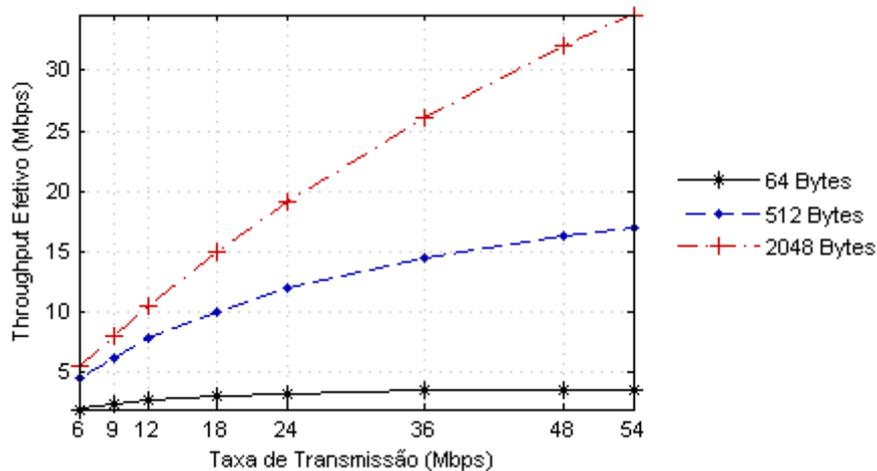


Figura 5.17. *Throughput* Efetivo em função da Taxa de Transmissão para diferentes tamanhos de pacotes

Observa-se que o sistema apresenta limitação do *throughput* quando se usa pacotes pequenos, mesmo utilizando altas taxas de transmissão. A explicação para este fato encontra-se no mecanismo da operação atômica que ocorre no envio de cada quadro, como mostrado na Seção 3.1.4.1.

Para a validação do resultado obtido no gráfico mostrado na Figura 5.17, utilizamos as Equações 5.3 e 5.4. Neste caso, configuramos o valor de  $B_{dados}$  de acordo com o tamanho do pacote, que pode ser de 64, 512 ou 2048 bytes. Como não é usada a fragmentação em nenhum dos casos, nem o mecanismo de RTS/CTS,  $N_{SIFS}$  e  $N_{ACK}$  são ambos iguais a 1, e  $B_{RTS}$  e  $B_{CTS}$  são iguais a 0. O valor de  $T_{bit}$  é o inverso da taxa de transmissão utilizada. Os demais parâmetros são utilizados conforme a Tabela 5.3. Os resultados obtidos com a fórmula são bem próximos aos valores mostrados no gráfico da Figura 5.17. Para exemplificar, os valores obtidos para a taxa de transmissão de 36 Mbps, foram de 4,2, 15,6 e 26,9 para os tamanhos de pacote de 64, 512 e 2048 bytes, respectivamente. As pequenas discrepâncias encontradas podem ser justificadas pelo fato da equação não levar em conta a diferença de tempo entre o término da transmissão de um quadro e o término do *slot* de tempo correspondente. Ou seja, é desprezado o fato de que a duração de um quadro deve ser um múltiplo da duração de um *slot*. Além disso, a equação utiliza a média para fatores aleatórios como o tempo da janela de contenção.

### 5.2.2.2 INFLUÊNCIA DO USO DE RTS/CTS E DE FRAGMENTAÇÃO

A utilização do mecanismo de RTS/CTS previne o problema da estação oculta, como descrito na Seção 3.1.4.1. Entretanto, de acordo com as Equações 5.3 e 5.4, este mecanismo diminuirá o *throughput* efetivo da rede. A fragmentação é útil em redes com muito ruído, melhorando o desempenho das mesmas, mas por outro lado, também pode reduzir o *throughput* efetivo. O mesmo cenário adotado na Seção 5.2.2.1 foi utilizado para a simulação do desempenho da rede com e sem a utilização do mecanismo de RTS/CTS e de fragmentação. O tamanho do pacote foi fixado em 1500

bytes e o limite de fragmentação escolhido foi de 1024 bytes. A Figura 5.18 mostra os resultados obtidos.

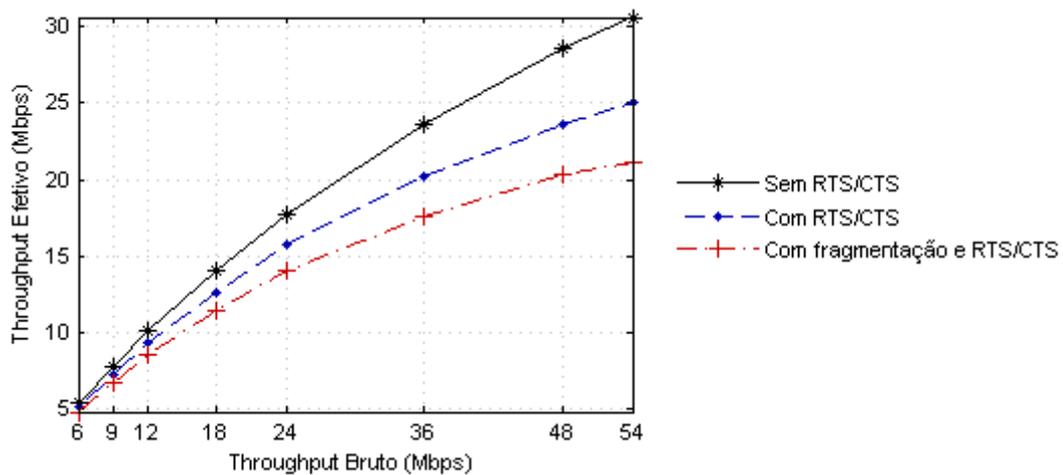


Figura 5.18. *Throughput* Efetivo em Função da Taxa de Transmissão com e sem uso de RTS/CTS e fragmentação

As curvas mostradas terão diferentes parâmetros devido à duração de cada etapa da operação atômica. Estes parâmetros são mostrados na Tabela 5.4. Com base nesses valores e de acordo como as Equações (5.3 e (5.4, é esperado que o *throughput* efetivo no cenário adotado diminua com a utilização de RTS/CTS. Quando adicionada a fragmentação, o desempenho deve ser ainda menor. Portanto, os resultados mostrados na Figura 5.18 estão de acordo com o esperado.

Tabela 5.4. Parâmetros utilizados com e sem RTS/CTS e fragmentação

Parâmetro	Sem RTS/CTS	Com RTS/CTS	Com fragmentação e RTS/CTS
$B_{dados}$	12000	12000	8192 + 3808
$N_{ACK}$	1	1	2
$B_{RTS}$	0	160	160
$B_{CTS}$	0	144	144
$N_{SIFS}$	1	3	5

Como os pacotes de dados utilizados na simulação do sistema serão pequenos, optou-se pela não utilização de fragmentação. Apesar dos resultados obtidos, nas simulações do sistema será utilizado o mecanismo de RTS/CTS para pacotes maiores que um determinado limiar (*RTS threshold*). O uso dessas mensagens se justifica pelo ganho na relação sinal-ruído, como pode ser visto na Figura 5.19.

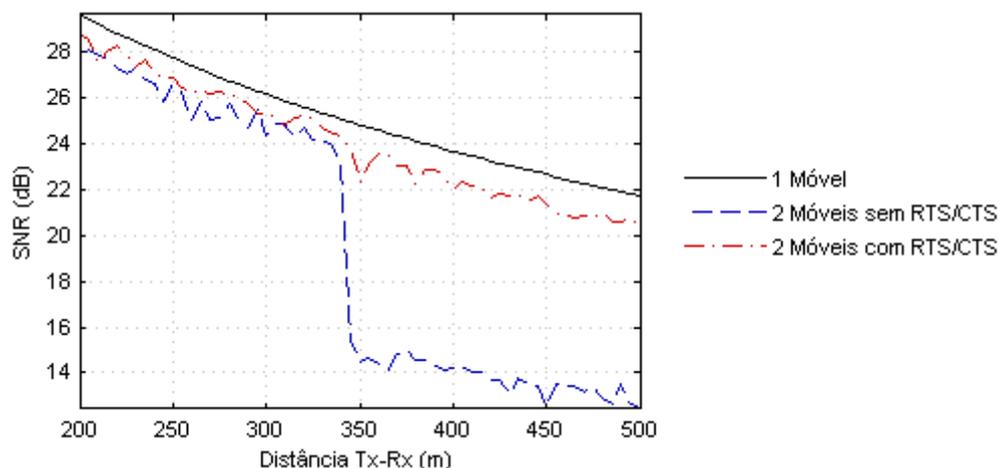


Figura 5.19. Relação sinal/ruído com e sem RTS/CTS

Esta figura apresenta o resultado de simulação da transmissão de dados entre nós móveis transmissores e um fixo receptor. Primeiramente se considera apenas um nó transmissor se afastando do receptor, situação em que a SNR reduz à medida que a distância aumenta, devido ao efeito do *path loss*. Em seguida, é inserido outro nó móvel se afastando do receptor no sentido contrário ao primeiro transmissor. No início do movimento, os transmissores podem “escutar” um ao outro, e devido ao mecanismo de CSMA/CA, eles disputarão o meio durante a janela de contenção, havendo colisão apenas quando escolherem um mesmo *slot* de tempo para transmitir. As colisões provocam uma pequena redução no valor da SNR. Quando a distância entre os transmissores e o receptor chega a cerca de 340 metros, os transmissores passam a não se “escutar” mais. Quando não é utilizado o mecanismo de RTS/CTS, os transmissores não detectam a presença um do outro e passam a transmitir o tempo todo. Isto aumenta significativamente o número de colisões, reduzindo a SNR em mais de 7 dB. Habilitando-se o uso de quadros RTS/CTS, o receptor se encarrega de avisar aos transmissores quando o meio está ocupado, prevenindo assim que transmitam ininterruptamente e reduzindo o número de colisões.

Na simulação do sistema haverá um elevado número de nós em movimento, o que torna a utilização de RTS/CTS importante para reduzir o número de colisões do sistema. Adicionalmente, será utilizado o modelo de canal rádio-móvel, que prejudica a recepção, tornando o uso de RTS/CTS necessário. Entretanto, a utilização desse recurso reduz o *throughput* efetivo da rede, como observado na Figura 5.18. Uma solução de compromisso é a utilização de um limiar, denominado *RTS threshold*, no qual o mecanismo será usado apenas para o envio de pacotes maiores que este limiar. Com base em [33], adotou-se para as simulações do sistema o valor do *RTS threshold* igual a 256 bytes.

### 5.2.3 SIMULAÇÕES DEMONSTRATIVAS DE ASPECTOS DO CANAL

Para determinar a influência do canal rádio móvel no desempenho do sistema e validar o modelo proposto, serão realizadas várias simulações de diversas situações diferentes, com diferentes

complexidades na análise do canal. Serão analisados aspectos como a cobertura do sistema, degradação do desempenho devido à influência do canal, dentre outros pontos.

Na primeira simulação é feito o estudo do alcance de comunicação para as diferentes taxas de transmissão oferecidas pelo padrão 802.11a, com a finalidade de determinar qual a taxa de transmissão mais adequada para o sistema.

Posteriormente será avaliada a probabilidade de comunicação a diferentes distâncias levando-se em consideração o *shadowing* e o modelo de propagação Espaço Livre. Esse estudo visa determinar a confiabilidade da comunicação para diferentes distâncias entre dois nós. Em seguida, neste mesmo cenário, serão realizadas várias simulações variando-se o ganho das antenas de transmissão e recepção para se avaliar a influência desse parâmetro na confiabilidade do sistema.

Na terceira simulação será analisada a influência do canal rádio móvel no desempenho da comunicação entre dois nós móveis para diferentes distâncias de separação entre eles e diferentes velocidades. Primeiramente será levado em consideração apenas as perdas de percurso e depois será adicionado o desvanecimento de pequena escala. Serão realizados comparativos entre o comportamento do *throughput* médio alcançado para esses dois casos.

Na quarta simulação será estudado um cenário em que um nó móvel passa por uma parada, deslocando-se em uma trajetória retilínea. Será avaliada a influência do desvanecimento de pequena escala no comportamento do *throughput*, atraso e BER para esse cenário e será feito um comparativo de desempenho entre os casos com e sem a presença do *fading*.

A quinta simulação é similar à quarta, com a adição do *shadowing*. Essa simulação avalia a influência do *shadowing* junto com o desvanecimento de pequena escala no desempenho da comunicação, observando, o atraso, *throughput*, relação sinal/ruído e BER.

A última simulação é similar à terceira, no entanto levando em consideração a influência do *shadowing*.

#### **5.2.3.1 DETERMINAÇÃO DA DISTÂNCIA DE COMUNICAÇÃO PARA DIFERENTES TAXAS**

Um fator determinante da viabilidade ou não do sistema proposto é a confiabilidade de haver comunicação a determinadas distâncias entre transmissor e receptor. Nas simulações feitas utilizando-se apenas o modelo padrão do OPNET, devido a este modelo ser muito simplificado, o alcance de comunicação é fixo, sendo que para distâncias menores que esse limite tem-se uma probabilidade de comunicação igual a 100% e para distâncias maiores que esse limite a probabilidade de comunicação é igual a zero. Isso ocorre porque, quando o nível de potência recebida no receptor é suficiente para sensibilizá-lo, a relação sinal/ruído é suficientemente alta para que a probabilidade de erro de *bit* seja igual a zero. Inicialmente foi feita a avaliação do alcance de comunicação utilizando-se essa análise simplificada. Os parâmetros como potência de transmissão (71 mW) e ganho de antena (2 dBi) foram extraídos de equipamentos encontrados no mercado, mais especificamente do ponto de acesso AP ROUTER WAP354H cujas especificações técnicas encontram-se no Anexo II.

A distância limite de comunicação varia de acordo com a taxa de transmissão escolhida, dado que a sensibilidade do receptor estabelecida no padrão 802.11 é diferente para cada uma delas. Mantendo-se todos os parâmetros de simulação constantes e variando apenas a sensibilidade do receptor e a taxa de transmissão correspondente, foram simuladas as diversas situações e obtidos os dados da Tabela 5.5.

Tabela 5.5. Distâncias máximas de comunicação para diferentes taxas de comunicação.

<b>Taxa de Transmissão (Mbps)</b>	<b>Distância máxima de comunicação (m)</b>
6	691,5
9	616,5
12	489
18	390
24	276
36	174
48	109,5
54	97,5

A partir dos dados obtidos, percebe-se que a utilização de taxas elevadas no sistema é inviável, dado que o alcance de comunicação obtido é insuficiente para garantir um bom desempenho e confiabilidade. Como estes dados foram obtidos de simulações utilizando apenas o modelo de Espaço Livre, os alcances reais serão inferiores aos da tabela. Portanto, levando em consideração que as distâncias entre as paradas de ônibus chegam a ser espaçadas de mais de 500 metros e que a aplicação básica para o qual o sistema está sendo proposto não necessita de altas taxas de transmissão, foi decidido utilizar a taxa de 6 Mbps em todas as simulações, de modo a buscar uma maior confiabilidade do sistema.

Além disso, essa simulação permitiu concluir que, em alguns pontos da trajetória, não há comunicação direta entre paradas, dado que existem distâncias de mais de 1000 metros entre elas. Nesses casos, devem ser utilizados repetidores.

Estes resultados foram obtidos a partir do modelo de Espaço Livre padrão do OPNET. Como este modelo apresenta resultados otimistas para o desempenho do sistema, é de se esperar que o desempenho real apresente distâncias ainda menores de comunicação, o que reforça a necessidade do uso de repetidores. A seguir serão apresentados os dados de simulações feitas com o modelo de canal que foi implementado que demonstram essa queda de desempenho.

### **5.2.3.2 CÁLCULO DA PROBABILIDADE DE COMUNICAÇÃO A DIFERENTES DISTÂNCIAS**

A análise acima descrita não leva em consideração os efeitos do desvanecimento, os quais afetam consideravelmente o alcance da comunicação. Para melhor estimar a probabilidade de comunicação a diferentes distâncias, foi feita uma análise de balanço de potência levando-se em consideração o *shadowing*. Como não foram realizadas medições para determinar o valor da variabilidade do meio, a análise foi repetida para quatro valores diferentes dessa variabilidade: 4 dB, 6 dB, 8 dB e 10 dB.

Para distâncias variando de 0 a 1.000 metros, foi calculada a probabilidade de a atenuação causada pelo *shadowing* ser maior que um determinado limite. Esse limite é calculado considerando-se a potência recebida sendo igual à sensibilidade do receptor. Caso a atenuação seja maior que este valor, não há comunicação, caso seja menor, há. Os resultados obtidos nessa análise estão resumidos na Figura 5.20.

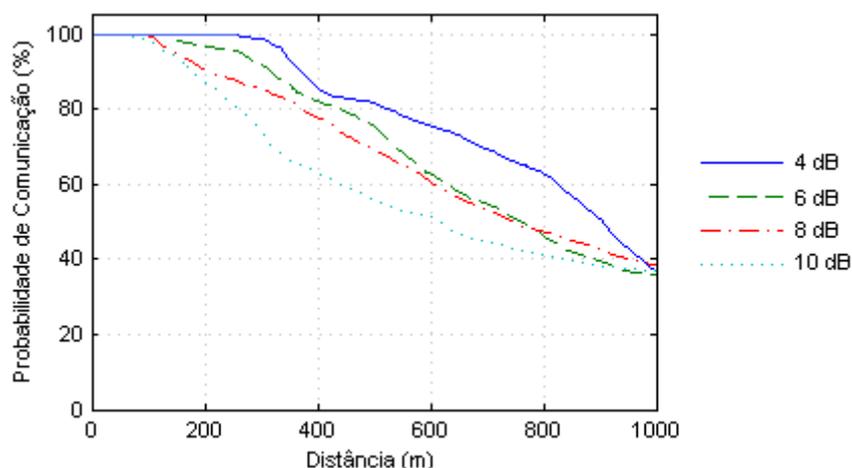


Figura 5.20. Probabilidade de comunicação para diferentes variabilidades de meio

Percebe-se que, para a distância de 340 metros, a probabilidade de comunicação varia de 67,98% até 95,37%. Esta distância foi selecionada para ser o foco da análise por ser a distância média entre as paradas de ônibus na situação em que não há móveis entre elas, ou seja, no pior caso, e com os repetidores. Dependendo da variabilidade real do meio, a probabilidade de comunicação nesta distância não é suficientemente grande para garantir uma boa confiabilidade para o sistema. Considerando-se uma confiabilidade desejada igual a 90%, obtém-se esse valor é a distâncias de 374 m no melhor caso e 178 m no pior caso. Logo, a implementação do sistema com os equipamentos com as características apresentadas não é adequada para todas as situações.

Para aumentar a confiabilidade do sistema, podem ser adotadas várias estratégias, como aumentar a potência de transmissão, aumentar a sensibilidade do receptor, colocar repetidores ou aumentar o ganho das antenas. Como as simulações foram efetuadas tendo como referência uma especificação de equipamento comercial, foi considerado que não se tem controle sobre fatores como potência de transmissão e sensibilidade de receptor. Portanto, foram utilizados repetidores nos casos citados acima, de modo a limitar a maior distância entre dois nós do sistema a valores menores que 400 m, e foi feito um estudo do efeito da variação do ganho de antena no alcance de comunicação. As simulações foram realizadas para ganhos de antena variando de 4 dBi a 8 dBi, valores encontrados em antenas omnidirecionais comerciais, e os resultados estão resumidos na Tabela 5.6. Nesta tabela, os valores mínimos referem-se aos resultados das simulações efetuadas com a curva de *shadowing* com desvio-padrão igual a 10 dB e os valores máximos aos com a curva com desvio-padrão igual a 4 dB.

Tabela 5.6. Estudo do alcance para diferentes valores de antena

Ganho da antena (dBi)	Probabilidade de comunicação a 340 metros (%)		Distância entre os nós para probabilidade de comunicação de 90% (m)	
	Mínima	Máxima	Mínima	Máxima
2	67,98	95,37	178	374
4	86,25	100	283	590
5	91,06	100	357	745
6	95,13	100	449	937
7	97,74	100	565	>1000
8	98,85	100	712	>1000

Dimensionando-se o sistema para obter mais de 90% de probabilidade de comunicação na distância média entre as paradas, no pior caso, deve-se utilizar antenas com ganho mínimo de 5 dBi, mantendo-se os demais parâmetros inalterados.

Neste contexto, o padrão 802.11p permite o uso de potências de transmissão maiores que o padrão 802.11a. Isso possibilita que sejam obtidas maiores distâncias de comunicação com um mesmo ganho de antena.

### 5.2.3.3 SIMULAÇÕES COM DOIS MÓVEIS, DIFERENTES VELOCIDADES E DIFERENTES DISTÂNCIAS SÓ COM *FADING*

Para verificar os efeitos do desvanecimento de pequena escala que foi adicionado ao modelo foram realizadas várias simulações. O cenário inicialmente utilizado é composto por apenas dois móveis, sendo que eles se deslocam ao longo de uma trajetória retilínea, com velocidades constantes e iguais. As trajetórias foram criadas de forma que, ao longo de toda simulação, os móveis permaneçam a uma mesma distância. Este cenário foi simulado diversas vezes, variando-se a distância entre os móveis e a velocidade de deslocamento, com o objetivo de verificar a influência da distância entre os nós e da velocidade de deslocamento no desempenho do sistema.

Na Figura 5.21 são apresentados os resultados obtidos em diversas simulações, efetuadas conforme o descrito acima, com um móvel enviando 256 kbps para o outro. Esta taxa foi escolhida arbitrariamente, dado que deseja-se apenas verificar as influências do canal no desempenho do sistema. Posteriormente serão realizadas simulações que abordam especificamente o cenário estudado, nas quais as taxas utilizadas serão as que se espera encontrar no mesmo. Percebe-se que o comportamento observado nas simulações com o canal é muito diferente do comportamento da simulação sem canal. À medida que o distanciamento entre os móveis aumenta o *throughput* médio diminui consideravelmente nos casos em que há o efeito do desvanecimento de pequena escala, enquanto sem o canal o *throughput* permanece constante. Isso ocorre porque a relação sinal/ruído diminui com o aumento da distância, fazendo com que, no caso das simulações com o modelamento do canal, a taxa de erros de *bit* aumente, causando maiores perdas. Percebe-se que mesmo a 100 metros de distância a taxa desejada não é atingida.

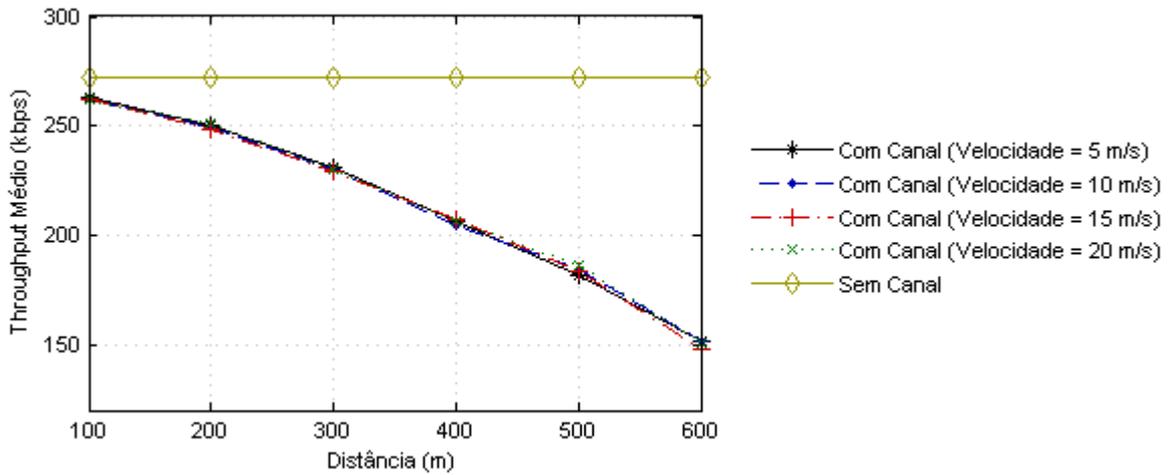


Figura 5.21. Comportamento do *throughput* médio em função da distância para diferentes velocidades

Em seguida, esta simulação foi repetida alterando-se a taxa de dados enviada. No caso, foram enviados dados a uma taxa de 10 Mbps. Os resultados estão representados na Figura 5.22.

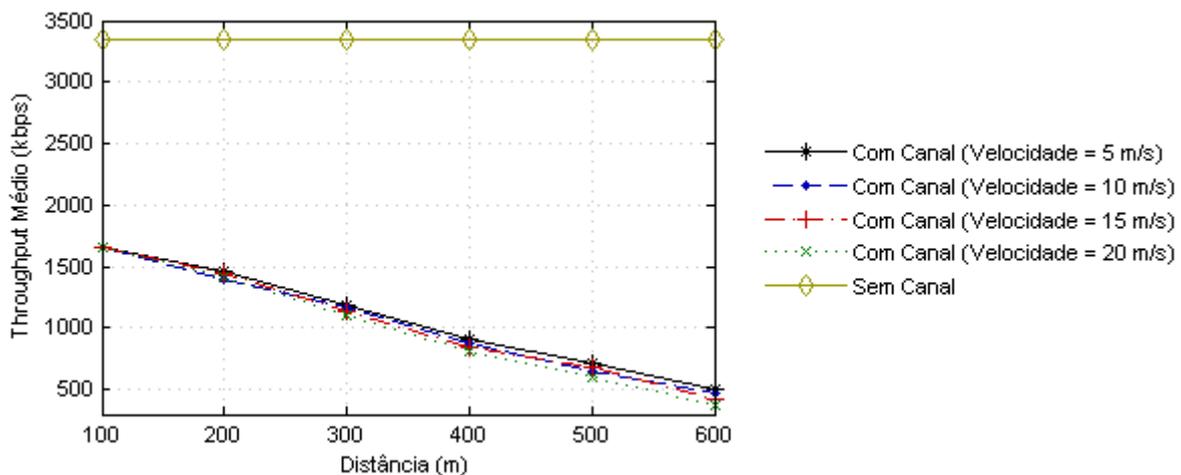


Figura 5.22. Comportamento do *throughput* médio em função da distância para diferentes velocidades com taxa de 10 Mbps

Analisando-se a Figura 5.21 e a Figura 5.22, pode-se observar que o *throughput* médio para as diferentes velocidades seguem aproximadamente o mesmo comportamento. Isso ocorre porque o *fading* é um desvanecimento de pequena escala, ou seja, ele altera rapidamente as características do sinal recebido. Entretanto, esta variação não altera o valor médio da potência recebida. Portanto, apesar do aumento da velocidade aumentar a taxa de variação da BER, na média as BERs são aproximadamente iguais para todas as velocidades, dado que as relações sinal/ruído são, também na média, iguais para todas as velocidades.

A partir das figuras observa-se a degradação de desempenho gerada pelo desvanecimento de pequena escala. Mesmo quando se envia dados a uma taxa pequena, mesmo para pequenas distâncias, o sistema não alcança o desempenho desejado. Essa diferença é mais perceptível na Figura 5.22, dado que as

taxas médias alcançadas nas simulações com *fading* a 100m de distância são iguais a aproximadamente 50% da taxa sem *fading*.

Como na segunda simulação foi enviada uma taxa acima da taxa nominal selecionada (as simulações foram feitas utilizando-se a taxa de transmissão de 6 Mbps), pode-se interpretar esses *throughputs* médios como sendo o limite de desempenho da comunicação entre dois móveis nas diversas situações simuladas. Percebe-se que, mesmo para distâncias pequenas, o desempenho obtido é muito inferior à taxa nominal e ao *throughput* médio obtido nas simulações sem canal.

Aumentando-se o espaçamento entre os nós observa-se uma queda ainda mais acentuada no desempenho, sendo que a 600 m de distância o *throughput* médio cai para menos de um terço do obtido a 100 m para uma mesma velocidade, o que corresponde a menos de 15% da taxa obtida sem canal.

Os resultados dessas duas simulações mostram que aplicações multimídia com demanda por altas taxas são inviáveis para o sistema proposto. A taxa observada em um ambiente com desvanecimento de pequena escala é muito inferior à taxa nominal do padrão.

No padrão 802.11p, espera-se obter resultados de desempenho melhores que os obtidos nesta simulação. A grande diferença de desempenho entre o caso sem canal e com canal se deve ao efeito do desvanecimento de pequena escala na recepção do sinal. Como foi explicado anteriormente, o padrão 802.11a apresenta um tempo de guarda inferior ao necessário para evitar interferência inter-simbólica em um cenário veicular urbano. Este fato faz com que a taxa de erro de *bits* seja elevada, gerando uma grande perda de pacotes e deteriorando o desempenho do sistema. No caso do 802.11p, o tempo de guarda foi dobrado, de modo que os níveis de interferência inter-simbólica são menores, fazendo com que a BER também seja menor, possibilitando uma maior taxa de recepção de pacotes com sucesso.

#### **5.2.3.4 SIMULAÇÃO DE UM MÓVEL PASSANDO POR UMA PARADA APENAS COM *FADING***

Nesta simulação foi elaborado um cenário composto por um móvel que se desloca em trajetória retilínea e com velocidade constante igual a 2 m/s, percorrendo ao todo 2 km, tendo uma parada localizada no meio da trajetória. O móvel tenta transmitir dados para a parada a uma taxa de 272 kbps durante toda a simulação e a simulação foi realizada com e sem o desvanecimento de pequena escala. Essa simulação tem como objetivo verificar o comportamento da comunicação entre os nós a medida que eles se aproximam e se afastam, em um ambiente variante no tempo e seletivo em frequência. São analisadas as curvas de *throughput*, BER e atraso.

A Figura 5.23 mostra o comportamento do *throughput* instantâneo obtido na simulação com e sem *fading*. Pode-se observar que o alcance da comunicação é o mesmo, dado que o *fading* altera o comportamento instantâneo das diversas subportadoras sem alterar o comportamento da potência média do sistema como um todo. Pode-se notar também que, à medida que a distância relativa entre o

móvel e a parada tende a zero, o *throughput* tende a se estabilizar próximo ao valor obtido sem canal, com pequenas variações em torno desse valor. Isso ocorre em função do aumento da relação sinal/ruído, que faz com que a BER diminua, reduzindo a quantidade de perdas de pacotes, o que aumenta o desempenho.

Para os momentos em que o móvel está mais afastado da parada, são observadas maiores variações do *throughput*, tendo inclusive momentos em que ele vale zero, ou seja, não há comunicação entre os nós. Isso ocorre porque a potência recebida diminui com o aumento da distância entre os nós, fazendo com que a relação sinal/ruído seja menor, o que causa um aumento considerável da BER como pode ser visto na Figura 5.24.

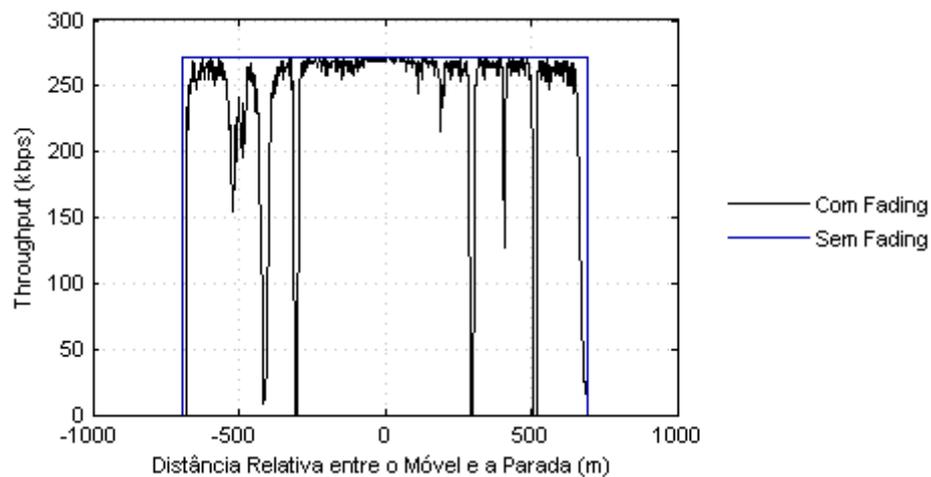


Figura 5.23. *Throughput* instantâneo apenas com *fading*

Comparando a Figura 5.23 com a Figura 5.24, percebe-se que, nos momentos em que o *throughput* cai consideravelmente, a BER aumenta, conforme era esperado. Além disso, nesses momentos, o atraso também aumenta como pode ser verificado na Figura 5.25. Isso acontece devido às condições severas de canal, que aumentam a quantidade de pacotes perdidos, fazendo com que o número de retransmissões aumente. Com esse aumento ocorre o acúmulo de pacotes no *buffer* de saída do transmissor, o que aumenta o atraso fim-a-fim. Deve ser notado que, quando o *throughput* é igual a zero, o OPNET não calcula o atraso.

Com relação ao comportamento sem canal, a partir do momento em que se inicia a comunicação a BER e o atraso são iguais a zero, ou seja, a comunicação ocorre sem perdas e permanece dessa forma até o momento em que a potência transmitida pelo móvel não é suficiente para sensibilizar o receptor da parada.

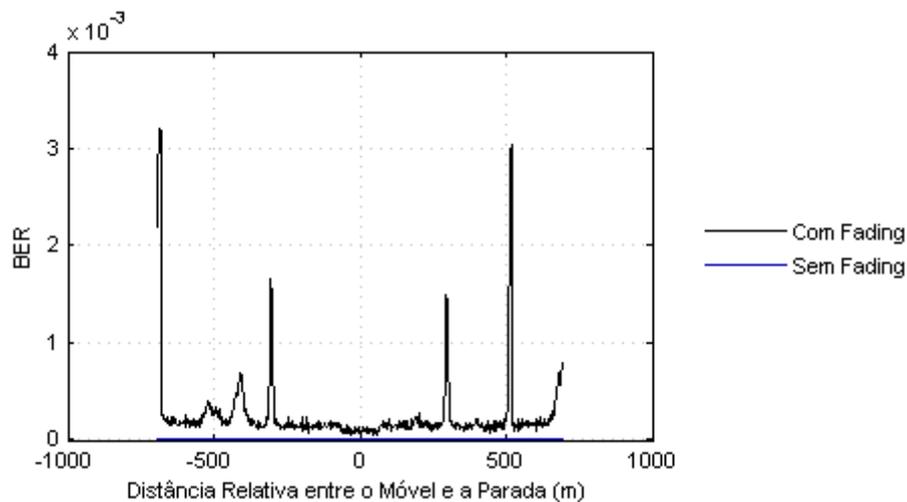


Figura 5.24. BER apenas com *fading*

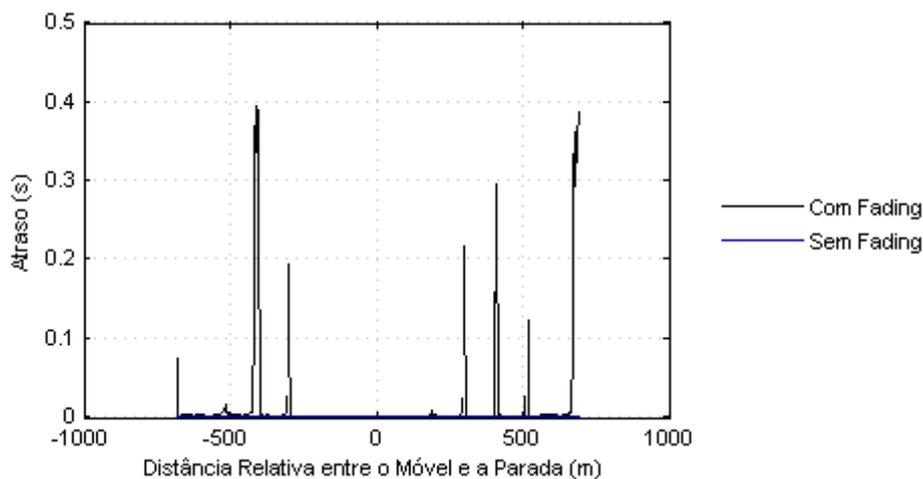


Figura 5.25. Atraso apenas com *fading*

Na Figura 5.25, os picos de atraso observados, que chegam a quase 400 ms, levam a concluir que aplicações sensíveis à atraso, como, por exemplo, voz, não são viáveis nesse tipo de rede.

No caso de uma implementação utilizando o padrão 802.11p, espera-se que as oscilações observadas no *throughput* e os picos de atraso sejam menores, dado que esse sistema é mais robusto à degradação causada por canais multipercursos. Isso faz com que a BER seja menor que no caso do 802.11a ocasionando menores perdas de pacotes e, conseqüentemente, menores atrasos.

### 5.2.3.5 SIMULAÇÃO DE UM MÓVEL PASSANDO POR UMA PARADA COM *FADING* E *SHADOWING*

Nesta simulação, novamente foi utilizado um cenário composto por um móvel que se desloca em trajetória retilínea e com velocidade constante igual a 2 m/s, percorrendo ao todo 2 km, tendo uma parada localizada no meio da trajetória. Essa simulação tem como objetivo verificar o comportamento da comunicação entre os nós a medida que eles se aproximam e se afastam, em um ambiente variante

no tempo e seletivo em frequência e com a presença de *shadowing*. São analisadas as curvas de *throughput*, relação sinal/ruído, BER e atraso.

Analisando a Figura 5.26 nota-se que o gráfico do *throughput* não é mais simétrico, como foi obtido na simulação anterior. Na primeira metade do gráfico da simulação com canal, quando o móvel está se aproximando da parada, o *throughput* começa a apresentar valores diferentes de zero a 530 m da parada, enquanto na segunda metade do gráfico, quando o móvel está se afastando da parada, há comunicação até 558 m. Logo, a distância de comunicação obtida na aproximação do móvel é diferente da distância obtida no afastamento do mesmo. Isso ocorre em função do comportamento da relação sinal/ruído, que é influenciada pelo *shadowing*. Este comportamento pode ser verificado na Figura 5.27.

Percebe-se na curva de *throughput* que o alcance da comunicação observado é menor no caso com canal que no caso sem canal. Isso ocorre porque nesta situação o meio está causando uma atenuação na potência do sinal recebido. Este resultado não representa a média ou o comportamento esperado do sistema, é apenas um resultado possível. Ou seja, caso esta simulação fosse efetuada com outro valor de semente, o resultado provavelmente seria diferente, inclusive com o alcance da simulação com canal podendo ser maior que da sem canal.

Observando-se a Figura 5.26 e a Figura 5.27, pode-se ver a relação entre o comportamento do *throughput* e a relação sinal/ruído. Na primeira metade da curva, o *throughput* apresenta variações maiores que na segunda metade. Isso ocorre porque a relação sinal/ruído desta primeira metade é menor que a da segunda, fazendo com que a taxa de erro de *bit* seja maior, como pode ser visto na Figura 5.28.

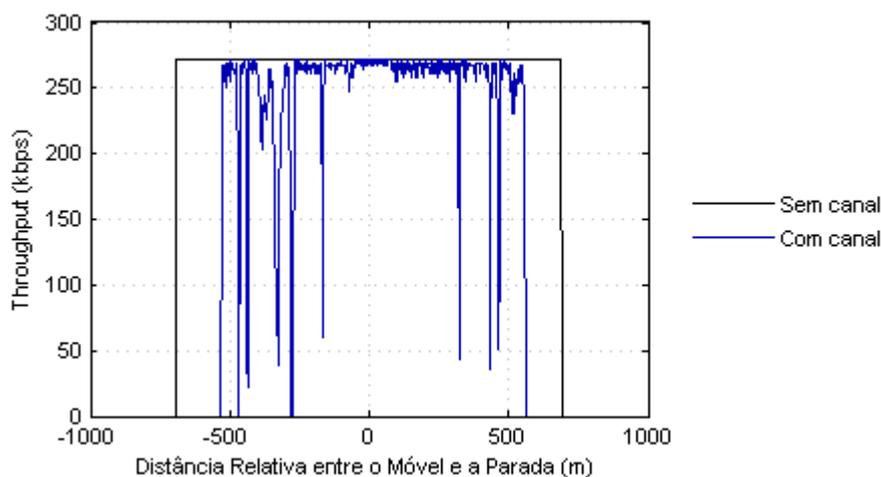


Figura 5.26. *Throughput* com *shadowing* e *fading*

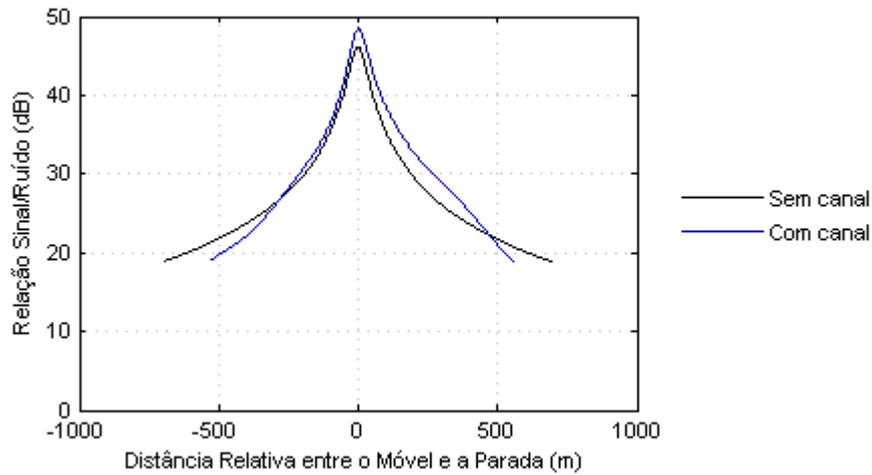


Figura 5.27. Relação Sinal/Ruído com *shadowing* e *fading*

A Figura 5.28 e a Figura 5.29 mostram o comportamento da BER e do atraso, respectivamente, ao longo da simulação. Conforme já analisado, pode-se perceber que os valores de BER são maiores na primeira metade da curva, em função da menor relação sinal/ruído. Além de interferir no comportamento do *throughput*, fazendo com que ele possua grandes oscilações e apresente momentos em que seu valor cai muito, estes valores altos de BER e as conseqüentes perdas de pacotes causam picos de atraso fim-a-fim na transmissão dos pacotes.

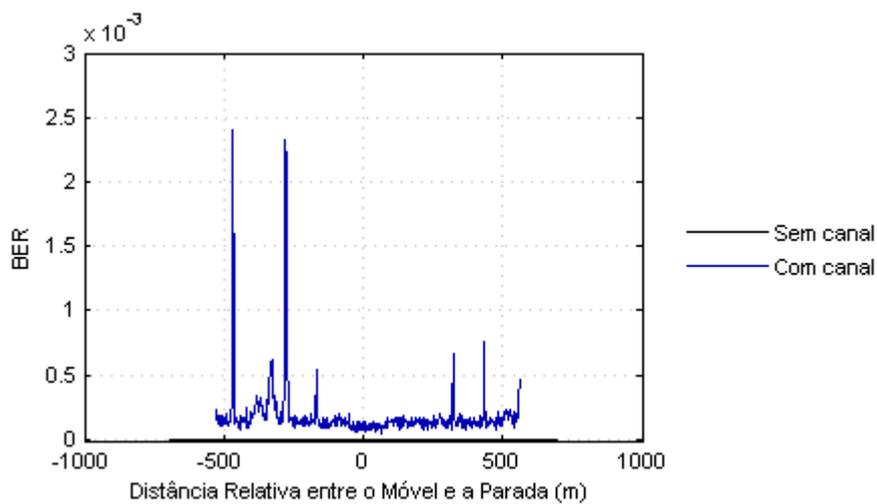


Figura 5.28. BER com *shadowing* e *fading*

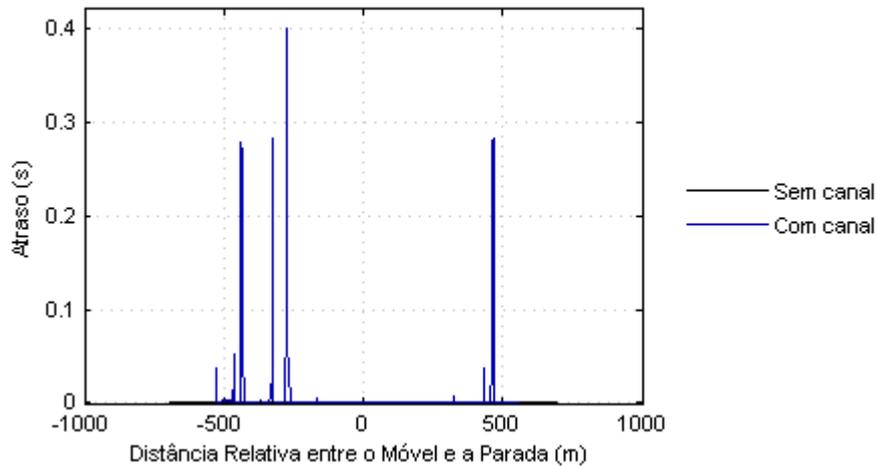


Figura 5.29. Atraso com *shadowing* e *fading*

Comparando-se esta simulação com a anterior, percebe-se que, para esse caso, o alcance de transmissão diminui em função da presença do *shadowing*, que provoca uma atenuação na potência do sinal. Novamente nota-se a presença de picos de atraso, que inviabilizam aplicações como VoIP.

Com relação ao padrão 802.11p, seus efeitos são análogos aos explicados na simulação anterior.

#### 5.2.3.6 SIMULAÇÕES COM DOIS MÓVEIS, DIFERENTES VELOCIDADES E DIFERENTES DISTÂNCIAS COM *SHADOWING* E *FADING*

Novamente o cenário utilizado é composto por apenas dois móveis, sendo que eles se deslocam ao longo de uma trajetória retilínea, com velocidades constantes e iguais. Esta simulação tem o objetivo de observar a influência do *shadowing* e *fading* no desempenho do sistema.

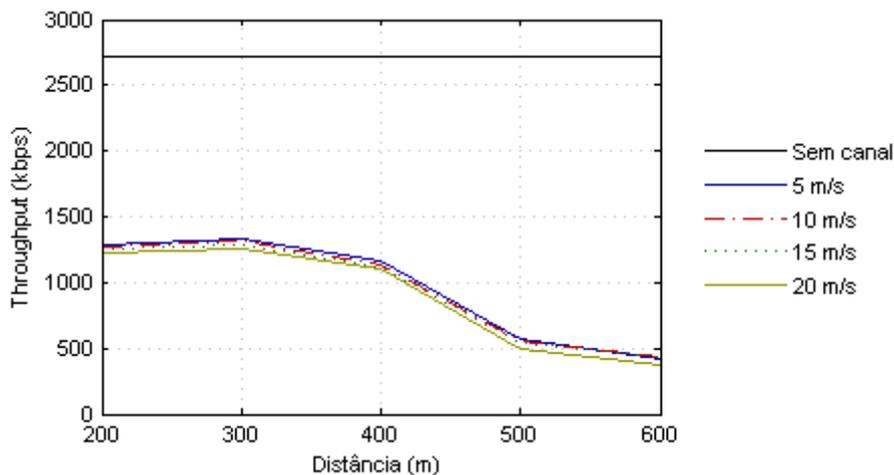


Figura 5.30. Comportamento do *throughput* médio em função da distância para diferentes velocidades com taxa de 10 Mbps

Observando a Figura 5.30, pode-se perceber que o desempenho apresentado pelo sistema para 300 m é superior ao desempenho apresentado para 200 m. Isso se deve à influência do *shadowing*, o qual afeta a potência média do sinal recebido. Neste caso, na simulação com 300 m de distância entre os móveis

o canal observado pelos móveis foi mais favorável que na simulação com 200 m de distância, de modo que a relação sinal/ruído é maior, fazendo com que a taxa de erro de *bit* seja menor e, conseqüentemente, o desempenho do sistema no caso de 300 m seja superior.

O resultado acima foi obtido simulando-se o cenário apenas uma vez para cada velocidade e distância. Logo, não representa o comportamento médio ou esperado do sistema, e sim apenas uma situação possível. Isto se deve ao fato do *shadowing* possuir um valor de *offset* a ele associado que determina qual trecho do vetor de dados será utilizado. Caso se queira determinar o comportamento médio do sistema, a mesma simulação deve ser realizada repetidamente por um número grande de vezes e o valor médio dos dados obtidos deve ser extraído. Este procedimento não foi realizado em função do grande tempo necessário para rodar cada simulação, o que torna inviável a realização de um número grande o suficiente de simulações. Este fato não prejudica o entendimento geral do sistema, dado que as outras simulações realizadas já permitem estimar o comportamento do mesmo para as diversas situações de operação.

Novamente, espera-se que os resultados obtidos em redes utilizando 802.11p sejam melhores, com valores de *throughput* mais próximos ao do caso sem canal, devido ao fato deste sistema ser mais imune às atenuações causadas por múltiplos percursos.

#### **5.2.4 SIMULAÇÕES DO SISTEMA VANET**

As simulações do sistema VANET englobam o modelamento completo da rede, conforme descrito na Seção 5.1. O objetivo destas simulações é comparar o desempenho das duas topologias, centralizada e centralizada com pontos de acesso, percebendo as diferenças introduzidas com os três protocolos de roteamento analisados (AODV, OLSR e GRP).

Primeiramente o modelo centralizado é avaliado a partir de comparativos entre os três protocolos de roteamento. São apresentados gráficos das médias de carga, perdas e eficiência em função do número de ônibus presentes na rede. Em seguida, uma análise similar é feita para o sistema centralizado com pontos de acesso. Neste caso, o atraso também é avaliado.

A escolha da topologia e protocolo de roteamento é feita com base nos melhores resultados de desempenho obtidos. A partir desta definição é realizado um ajuste fino nos parâmetros do protocolo de roteamento escolhido. São variados os principais atributos deste protocolo, observando-se os mesmos critérios de desempenho analisados anteriormente. Estas simulações permitem a escolha dos valores que melhor satisfaçam a operação do sistema.

Ajustados os parâmetros do protocolo de roteamento, realiza-se nova simulação com a finalidade de avaliar a viabilidade do provimento de uma aplicação de Internet pela rede. Neste caso, considerou-se a aplicação HTTP. O tempo máximo de resposta das páginas é utilizado como critério para esta verificação.

### 5.2.4.1 MODELO CENTRALIZADO

O modelo de processamento e tráfego centralizado exige que os pacotes percorram, em média, um caminho maior, efetuando um número maior de saltos para chegar ao destino.

Cada um dos protocolos de roteamento estudados adota uma estratégia distinta de descoberta de rota, o que influencia diretamente na quantidade de tráfego de controle gerado. A diferença na carga do sistema para cada protocolo de roteamento, de acordo com o número de ônibus na rede, pode ser observada na Figura 5.31.

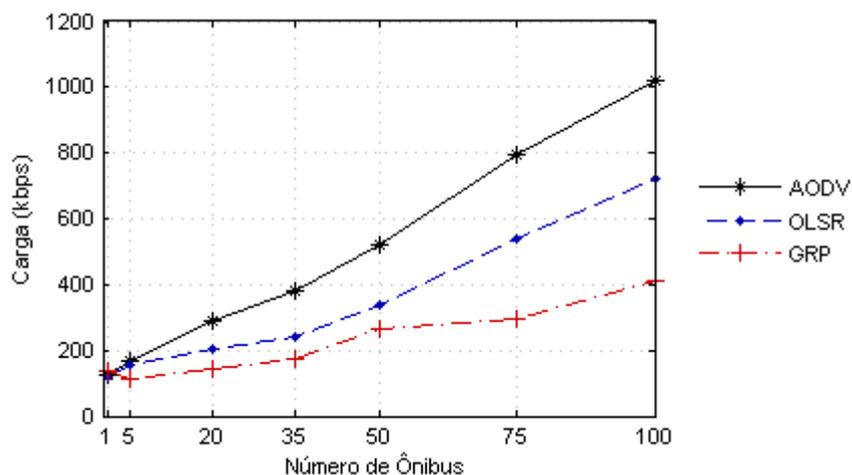


Figura 5.31. Carga do sistema em função do número de ônibus

Observa-se que a carga do sistema, comporta-se conforme esperado, sendo proporcional ao número de nós da rede. A carga de informação do sistema é igual para todos os protocolos, entretanto, o tráfego de roteamento e o encaminhamento das mensagens dependerão do comportamento de cada protocolo.

O protocolo GRP apresenta menor carga comparativamente aos protocolos AODV e OLSR. Isto ocorre devido ao fato de o protocolo GRP utilizar mais restritamente o mecanismo de *flood*, já que as mensagens de controle enviadas aos seus vizinhos não são propagadas por eles.

O protocolo AODV, devido à sua natureza reativa, utilizará o mecanismo de *flood* sempre que precisar descobrir uma rota válida para o destino de sua mensagem. Consequentemente, este protocolo gera uma maior carga em relação aos outros dois, que são pró-ativos. Já o OLSR otimiza o processo de *flood* através da seleção de MPRs, limitando a geração e transmissão de tráfego de controle.

A análise subsequente avalia o total de perdas por ultrapassagem do limite de retransmissões e sua relação com a eficiência do sistema. A Figura 5.32 faz uma comparação dessas perdas, que ocorrem nos momentos em que não há comunicação com o nó do próximo salto, devido a degradações do canal ou uso de rota desatualizada.

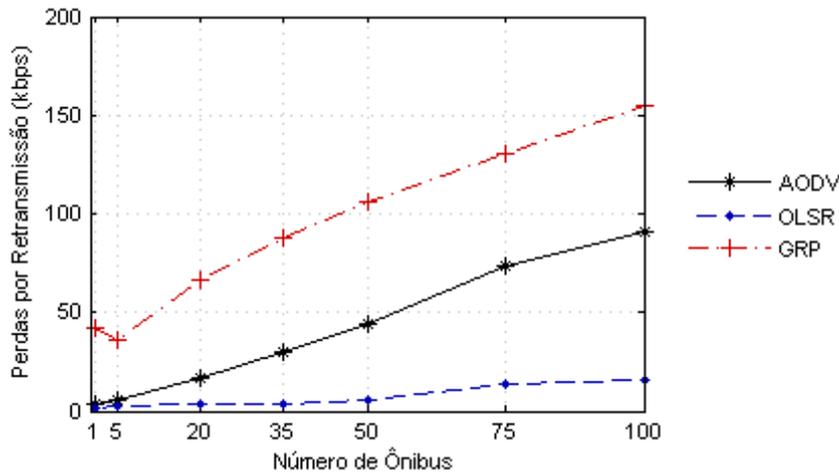


Figura 5.32. Perdas por ultrapassagem do limite de retransmissões em função do número de ônibus

Observa-se um número crescente de perdas com o aumento da quantidade de ônibus devido ao aumento da carga do sistema. O protocolo GRP, mesmo apresentando a menor carga, é o protocolo que resulta em maior valor absoluto de descarte de pacotes, refletindo sua baixa eficiência, como pode ser visto na Figura 5.33. Este é um resultado não esperado, já que na rede proposta, os destinos de todas as mensagens são pontos fixos, o que deveria facilitar a operação de protocolos geográficos. Além disso, o protocolo GRP é proativo como OLSR, que, por outro lado, apresentou baixo índice de perdas e a melhor eficiência.

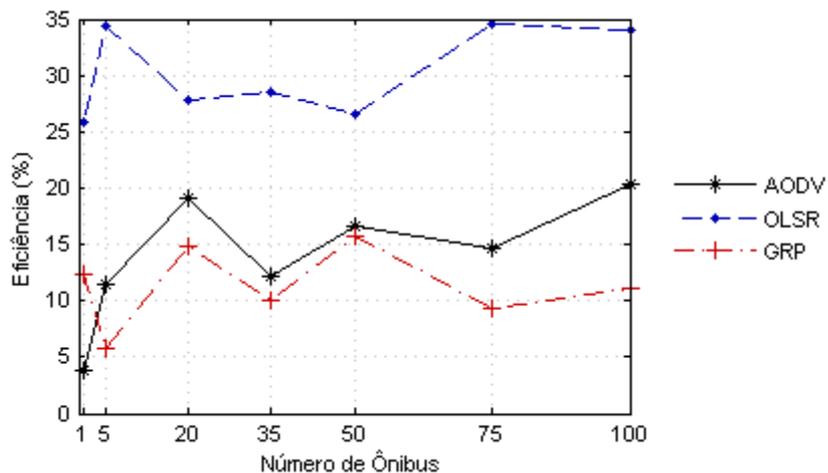


Figura 5.33. Eficiência da rede em função do número de ônibus

Observando esta figura, fica evidente que o modelo centralizado não representa uma solução adequada para a implantação do sistema, já que todos os protocolos resultam em eficiência inferior a 35%, portanto, abaixo do esperado. Isto se deve ao elevado número médio de saltos necessário para que cada pacote possa chegar ao seu destino. Uma grande quantidade de saltos dificulta o processo de roteamento, tornando a rede mais sensível a perdas de pacote e erros de rota.

### 5.2.4.2 MODELO CENTRALIZADO COM PONTOS DE ACESSO

Deve ser analisado o desempenho do sistema no caso de se usar pontos de acesso para a comunicação, já que sem eles a eficiência se mostrou insatisfatória. A Seção 5.1.4 descreve as principais características do modelo centralizado com pontos de acesso.

A diferença na carga do sistema mantém-se semelhante ao observado no modelo centralizado. O protocolo AODV comporta-se novamente como aquele que mais insere carga no sistema, o que tem explicação análoga ao caso da topologia centralizada.

As médias das perdas por ultrapassagem do limite de retransmissões, para cada protocolo e quantidade de ônibus, são ilustradas na Figura 5.34 a seguir.

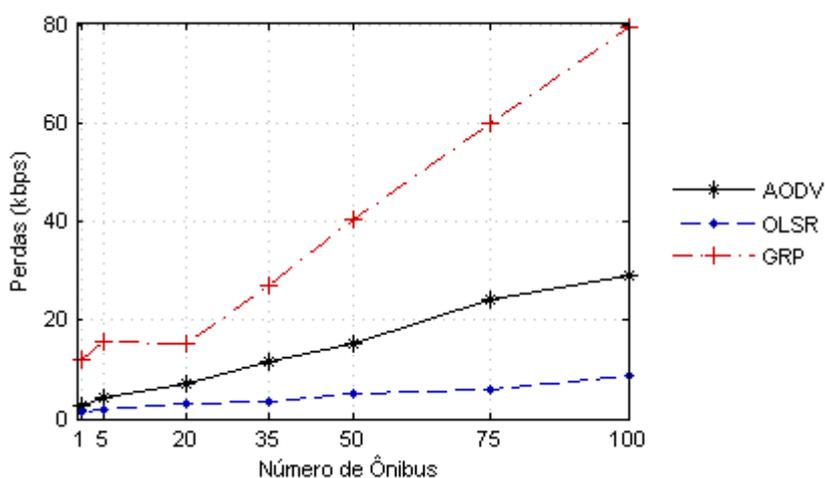


Figura 5.34. Perdas por ultrapassagem do limite de retransmissões em função do número de ônibus

Percebe-se novamente que o roteamento geográfico apresenta resultados inferiores aos outros dois protocolos. O OLSR, por outro lado, apresenta moderada taxa de perdas, o que pode ser explicado pelo bom desempenho do seu mecanismo proativo para estabelecer as rotas válidas. Usando pontos de acesso, as mensagens em geral percorrem menor número de saltos, o que para o OLSR se traduziu em eficiência acima de 88%, para todas as quantidades de ônibus analisadas, como pode ser visto na Figura 5.35.

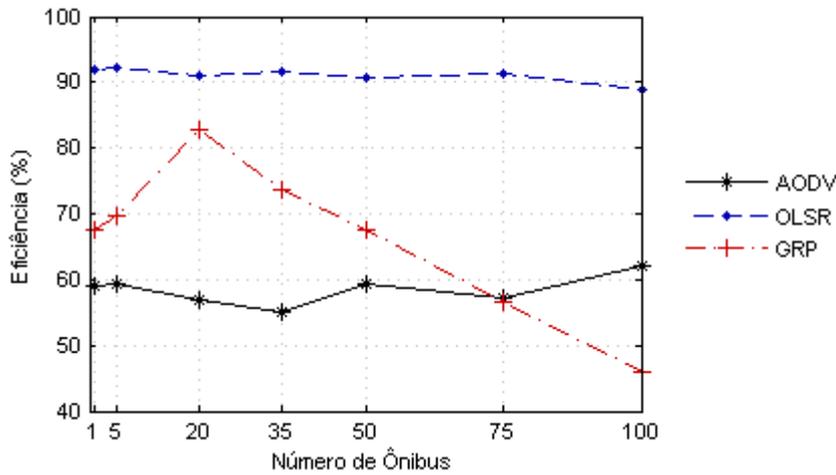


Figura 5.35. Eficiência da rede em função do número de ônibus

O protocolo AODV manteve sua eficiência próxima a 60% para os casos analisados. O valor baixo de eficiência pode prejudicar o envio de mensagens do sistema, tornando os serviços oferecidos ineficientes. O protocolo GRP comporta-se mais uma vez de forma inesperada, pois apresenta desempenho crescente até 20 ônibus, seguido de queda a partir desta quantidade. Esperava-se que o GRP gerasse uma curva de eficiência semelhante a do OLSR, pois o GRP, como o OLSR, também é um protocolo de roteamento proativo.

O atraso médio das mensagens de dados recebidas é outro fator importante, pois determina se o número de saltos ou a densidade de nós da rede impossibilitam os serviços propostos para o sistema. Esses atrasos são apresentados na Figura 5.36.

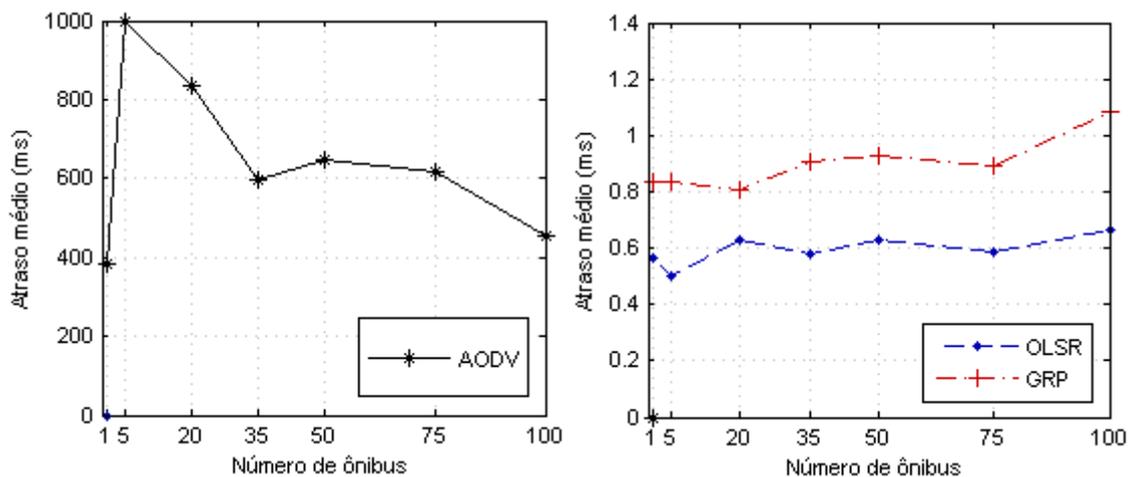


Figura 5.36. Atraso médio em função do número de ônibus

Observa-se que com o protocolo AODV o atraso é substancialmente superior aos obtidos com os protocolos proativos, consequência do seu mecanismo reativo de descoberta de rotas. Ainda para o AODV, verifica-se que o atraso médio decresce com o número de nós, ilustrando a capacidade de nós intermediários responderem às RREQs, o que limita o número de retransmissões de requisições,

diminuindo o tempo decorrido no estabelecimento das rotas válidas. Adicionalmente, verifica-se que a magnitude dos atrasos médios dos protocolos proativos não representa problema para as aplicações propostas neste sistema, visto que as mensagens são mandadas a cada 1 segundo e que os atrasos são da ordem de 1 ms.

Conclui-se que os protocolos de roteamento são de fato fatores que afetam significativamente o desempenho de redes de tamanho e mobilidade semelhantes a do sistema proposto. O protocolo OLSR obteve o melhor desempenho em relação aos protocolos analisados e é uma escolha satisfatória para oferecer os serviços pretendidos pelo sistema.

Um número maior de pontos de acesso pode melhorar o desempenho da rede. Contudo, outras alterações são preferíveis já que se deseja um sistema com a menor infraestrutura possível. Estas alterações podem ser o aumento do ganho da antena sugerido na Seção 5.2.3.2 e a utilização do padrão IEEE 802.11p que reduz a interferência inter-simbólica e permite uma maior potência de transmissão.

O padrão 802.11p, entretanto, reduz pela metade a taxa de transmissão. No sistema proposto, esta taxa seria reduzida de 6 Mbps para 3 Mbps. Utilizando o protocolo OLSR, a soma obtida da taxa de dados transmitida e enviada por cada estação, incluindo cabeçalhos da camada MAC, é, em média, igual a 140 kbps, e em todos os casos, menor que 700 kbps. Portanto a taxa de transmissão de 3 Mbps oferecida pelo padrão 802.11p é suficiente para atender ao sistema proposto.

#### **5.2.4.3 DIMENSIONAMENTO DOS PARÂMETROS DO PROTOCOLO DE ROTEAMENTO**

O dimensionamento dos parâmetros do protocolo de roteamento é realizado a partir de simulações que mostram os resultados da variação dos diferentes parâmetros no desempenho do sistema. Apenas o protocolo OLSR é analisado tendo em vista o seu melhor desempenho nas simulações anteriores, cujos parâmetros foram selecionados conforme descrito na Seção 5.1.4. Nestas simulações não foi variado o número de ônibus da rede, valor mantido em 100 ônibus, a carga máxima prevista.

Inicialmente, a eficiência do sistema com e sem a utilização do mecanismo de *willingness* é avaliada. A utilização desse mecanismo resulta em uma eficiência do sistema de 88,7% enquanto que a sua não utilização resulta em 42,5%. Esses resultados comprovam que a configuração do parâmetro *willingness* é determinante no desempenho, devendo estar habilitado para este sistema, pois, além de ser desejável que todos os nós operem como nós intermediários, todos os ônibus possuem igual recurso de processamento e energia.

O período de sinalização é analisado em conjunto com o tempo máximo que um nó aguarda uma mensagem de *hello* de determinado vizinho antes de considerá-lo inalcançável. Este parâmetro normalmente é configurado para ter o triplo da duração do período de sinalização. A eficiência, o atraso médio e a carga, variando-se o intervalo entre o envio de mensagens *hello* são indicados na Tabela 5.7.

Tabela 5.7. Desempenho da rede em função do período de sinalização

<b>Período de Sinalização (s)</b>	<b>Eficiência (%)</b>	<b>Atraso (ms)</b>	<b>Carga (kbps)</b>
<b>0,5</b>	88,2	0,73	859
<b>1</b>	88,4	0,68	718
<b>1,5</b>	88,0	0,64	615
<b>2</b>	87,0	0,66	560
<b>3</b>	87,0	0,61	555
<b>5</b>	83,5	0,61	434

Observa-se que o resultado com maiores variações relativas é a carga do sistema. Para manter a carga e o atraso reduzidos sem degradar de forma significativa a eficiência da rede, o valor de compromisso escolhido para o período de sinalização é de 1,5 segundos.

O intervalo de tempo entre o envio de mensagens de controle de topologia (TC) é analisado em conjunto com o parâmetro que indica o tempo que uma entrada na tabela de topologia deve expirar caso não receba uma nova mensagem de TC. Este parâmetro é configurado para ter o triplo da duração do intervalo entre TCs. A análise é novamente baseada na eficiência, atraso médio e carga, variando-se o intervalo entre TCs, como mostra a Tabela 5.8.

Tabela 5.8. Desempenho da rede em função do intervalo entre TCs

<b>Intervalo entre TCs (s)</b>	<b>Eficiência (%)</b>	<b>Atraso (ms)</b>	<b>Carga (kbps)</b>
<b>1</b>	88,3	0,77	1632
<b>10</b>	88,3	0,62	461
<b>20</b>	88,3	0,62	368
<b>30</b>	87,5	0,61	329
<b>60</b>	87,0	0,60	286

Mantendo a eficiência em com o melhor valor possível, de 88,3%, para atingir os menores valores de atraso e carga, o tempo de intervalo entre TCs adotado é de 20 segundos.

Com base nos resultados obtidos, pode-se concluir que para o sistema em questão, os parâmetros que proporcionam um melhor desempenho são:

- a utilização do mecanismo de *willingness*;
- o período de sinalização de 1,5 segundos; e
- o intervalo entre TCs de 20 segundos.

#### 5.2.4.4 APLICAÇÕES DE INTERNET

De forma a se mensurar o desempenho do sistema caso este fosse utilizado para prover outros serviços aos usuários, realizou-se nova simulação. Neste caso, considerou-se o serviço de acesso à Internet, adicionando à rede de ônibus uma demanda por *web browsing*. O modelo utilizado para isto é constituído inteiramente pela geração aleatória de tráfego de aplicação HTTP, conforme descrito na Seção 5.1.2.

Foi simulado o caso da melhor eficiência: a rede com seis pontos de acesso e protocolo de roteamento OLSR. Nesta simulação, procurou-se observar o percentual de requisições de páginas respondidas em um intervalo de tempo menor que determinado valor. Este valor está indicado no eixo das abscissas da Figura 5.37. Cada uma das curvas desta figura representa uma quantidade de usuários diferentes, na primeira, todas as paradas são consideradas usuários de Internet, e na segunda, todas as paradas e ônibus são considerados usuários.

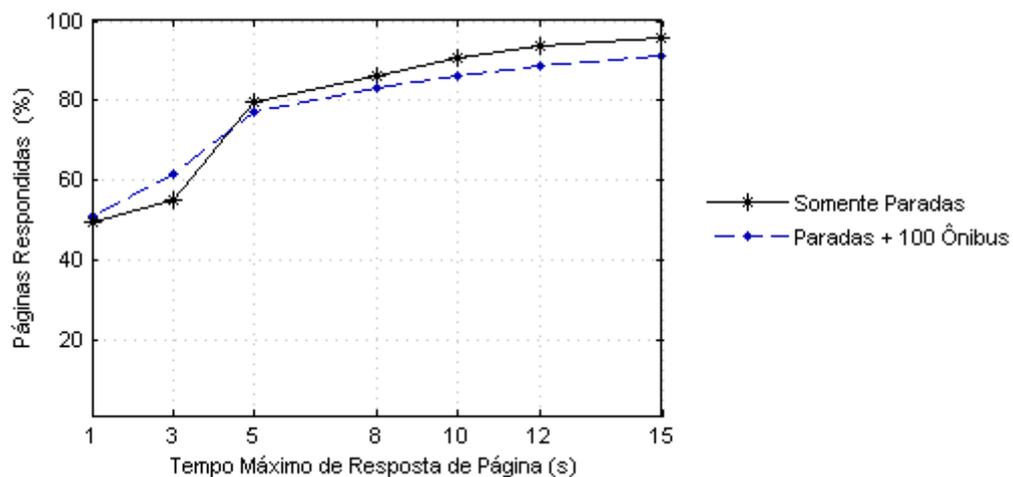


Figura 5.37. Percentual de páginas respondidas em função do tempo máximo de resposta de página

Tempos de resposta maiores ou iguais a 8 segundos são usualmente suficientes para que um usuário desista de visitar determinado *site* [34]. Para aplicações HTTP, os resultados indicam que mais 80% das requisições de páginas são respondidas em até 8 segundos para ambos os casos avaliados. Além disso, cerca de 50% das requisições são respondidas em até 1 segundo. Este resultado é satisfatório para a implantação do serviço de Internet para aplicações HTTP na rede proposta. Contudo, devem ser realizadas outras simulações que indiquem se a mesma qualidade de serviço pode ser obtida com outras aplicações típicas de Internet, como *e-mail* e FTP (*file transfer protocol*).

Espera-se que o resultado obtido para a aplicação HTTP seja ainda melhor caso sejam utilizadas outras configurações já citadas que permitam melhorar o desempenho da rede, como o ajuste do ganho das antenas e a utilização do padrão IEEE 802.11p.

### 5.3 RESULTADOS E ANÁLISE DO SISTEMA CELULAR UMTS

O objetivo das simulações da rede UMTS realizadas neste trabalho é demonstrar as características desse tipo de rede e analisar o desempenho da mesma. O sistema é analisado quanto à sua qualidade de serviço, sua eficiência, sua cobertura entre outros pontos importantes para seu bom funcionamento.

Desta forma, os resultados deste capítulo estão apresentados sob a forma de comparativos e demonstrativos. O primeiro comparativo é entre o desempenho do canal de descida compartilhado (DSCH) e o canal de descida (DCH). O DSCH, introduzido no GPRS, permite que a RNC faça a multiplexação da informação destinada para diferentes UEs no mesmo canal de transporte. Dessa forma, a largura de banda fixa de um canal de transporte pode ser dividida entre aplicações que tem necessidades de largura de banda variadas [24], ou seja, possibilita a descida compartilhada entre os diversos usuários da rede.

O segundo comparativo avalia o desempenho do agendamento do FACH (*forward access channel*) para diversos valores de QoS: *conversational* (voz), *streaming*, interativo e *background*.

O terceiro comparativo analisa a diferença entre os dois tipos de *handovers*: *soft* e *hard*. O *soft handover* é quando um UEs está simultaneamente conectado a duas ou mais células (ou setores da célula) durante uma ligação, enquanto o *hard handover* é quando o UE está se comunicando com uma única célula por vez.

A quarta simulação evidencia o funcionamento do sistema proposto utilizando a tecnologia UMTS, variando o número de móveis nela conectados: 1, 5, 20, 50 e 100.

A última simulação demonstra o funcionamento do sistema idealizado levando em consideração os outros usuários da rede de celulares 3G.

#### 5.3.1 COMPARATIVO ENTRE DSCH E DCH

Para demonstrar a eficiência do canal DSCH (canal de descida compartilhado), a simulação busca verificar se é possível utilizar mais portadoras com a mesma taxa de descida utilizado o DSCH em comparação com múltiplos canais DCH (canal de descida). Os tipos de aplicações pensadas para o sistema possuem larguras de banda são variadas. Assim, a utilização do canal compartilhado pode beneficiar o funcionamento da rede, permitindo o uso de menos canais de descida.

Para tal simulação, existem 7 UEs gerando 4 kbps cada (QoS 0), com o seguinte fluxo de tráfego:

- O UE0 transmite para o UE1 e recebe do mesmo;
- O UE2 transmite para o UE3 e recebe do mesmo;
- O UE4 transmite para o UE5 e recebe do mesmo;
- O UE6 transmite para o UE7.

Além dos UEs, tem-se uma *node-B*, responsável, entre outras coisas, por transmitir tráfego de controle e tráfego dos usuários através da interface de radio; uma RNC, que o nó de controle da UTRAN; e uma SGSN, nó de controle do *core network*.

A Figura 5.38 mostra o número de portadoras estabelecidas, entre os UEs e a RNC, e sendo servidas pelo DSCH na descida em cada instante da simulação.

Os resultados, conforme pode ser visto na Figura 5.38, indicam que o DSCH suporta até 6 portadoras nessa configuração. Uma taxa de 4 kbps por equipamento de usuário, exigiria um DCH com taxa real de aproximadamente 30 kbps (7 x 4 kbps). Assim, se tivesse sido usado uma configuração apenas com o DCH, ter-se-ia no máximo 4 portadoras dividindo concomitantemente a largura de banda de 120 kbps (30 kbps x 4). Portanto, com o uso do canal compartilhado, tem-se um ganho de 2 portadoras em comparação com o canal dedicado.

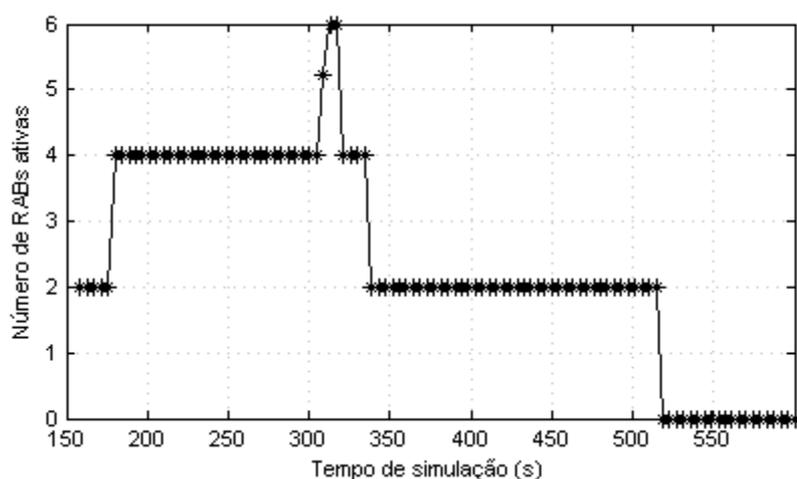


Figura 5.38. Número de Portadoras (*radio bears*) ativas no DSCH

A simulação demonstra a capacidade da RNC de fazer a multiplexação da informação destinada para diferentes UEs no mesmo canal de transporte. Assim, a largura de banda fixa de um canal de transporte pode ser dividida entre aplicações que tem necessidades de largura de banda variadas, como é o caso do sistema proposto.

### 5.3.2 COMPARATIVO DE DESEMPENHO DO AGENDAMENTO DO FACH

Nas redes UMTS, existe o suporte para diversos tipos de serviços: voz, vídeo, internet, entre outros. Cada um desses serviços possui uma qualidade de serviço (QoS) diferente, e portanto tem uma prioridade diferente na rede.

O UMTS define quatro classes de tráfego:

- Classe *Conversational* (QoS0), por exemplo, voz ou vídeo conferência. Esta classe tem os maiores requisitos em tempo real, com um rigoroso limite para os valores de atraso (*delay*) e *jitter*. Portanto, essa classe necessita de uma taxa garantida.

- Classe *Streaming* (QoS1), por exemplo *streaming* de vídeo. Essa classe é diferente da anterior devido a sua menor demanda por serviços em tempo real. O atraso não tem uma influencia tão grande quanto para serviços de voz, impactando mais quando interagindo com um servidor. Entretanto, serviços dessa classe necessitam de uma taxa garantida.
- Classe *Interactive* (QoS2), por exemplo *Web browsing* ou jogos. Esses serviços são por definição, interativos. Entretanto, suas demandas por serviços em tempo real são limitadas. Eles não necessitam de uma taxa de *bits* constante.
- Classe *Background* (QoS3), por exemplo o envio de *e-mails*. Para essa classe, normalmente não é necessária nenhuma qualidade de serviço.

Essa prioridade diferente para cada QoS, influencia principalmente no atraso que cada tipo de trafego experimenta na rede. Para demonstrar essa diferença, nessa simulação, tem-se o seguinte fluxo de tráfego entre os usuários:

- O UE0 transmite para o UE4 tráfego do tipo *conversational* (QoS0);
- O UE1 transmite para o UE5 tráfego do tipo *streaming* (QoS1);
- O UE2 transmite para o UE6 tráfego do tipo interativo (QoS2);
- O UE3 transmite para o UE6 tráfego do tipo *background* (QoS3).

A mesma carga é gerada para cada uma das aplicações.

O peso do agendamento de cada classe de QoS por FACH é configurado como a seguir:

- QoS 0: 5.0
- QoS 1: 3.0
- QoS 2: 2.0
- QoS 3: 1.0

Com essa simulação, é possível estudar os diferentes atrasos para cada QoS, percebendo qual o atraso para as aplicações do sistema proposto.

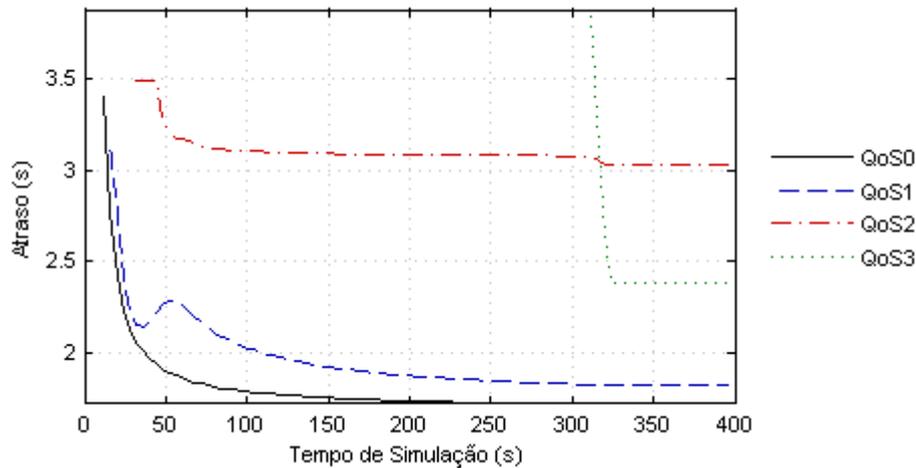


Figura 5.39. Atraso fim-a-fim para diferentes QoS

A Figura 5.39 mostra que o classe de tráfego com QoS 0 tem a menor media global do atraso fim-a-fim. Assim, esses serviços experimentam zero ou mínimo atraso por fila antes de serem transmitidos no FACH.

Da mesma forma, o QoS1 tem a secundo menor atraso médio. Algumas flutuações indicam algum atraso pela fila em buffers do FACH.

Para o QoS2, tem-se um atraso significamente maior. Porém, o tráfego ainda chega em seu destino. A maior parte do tráfego com QoS3 não chegam ao seu destino, pois os *timers* expiram e eles são descartados, enquanto esperam pela transmissão.

O sistema móvel proposto utilizará, em sua maior parte, o QoS3 que experimenta o maior atraso entre os tráficos analisados.

### 5.3.3 COMPARATIVO DE DESEMPENHO DE REDE COM SOFT HANDOVER E COM HARD HANDOVER

Essa simulação tem como objetivo uma comparação do desempenho entre o *soft* e o *hard handovers*, já que no sistema proposto, diversos *handovers* são realizados constantemente na rede.

São gerados dois cenários, nos quais dois UEs seguem trajetórias entre duas *Node-Bs* causando repetidos *handoffs* de uma célula para outra. Ambos UEs carregam arquivos FTP para um servidor continuamente durante a simulação, ou seja, na direção de subida. O QoS 3 é utilizado para esses tipo de serviço.

Os dois cenários são idênticos, com exceção de que no cenário *hard\_handover* o *soft handover* é desabilitado na RNC.

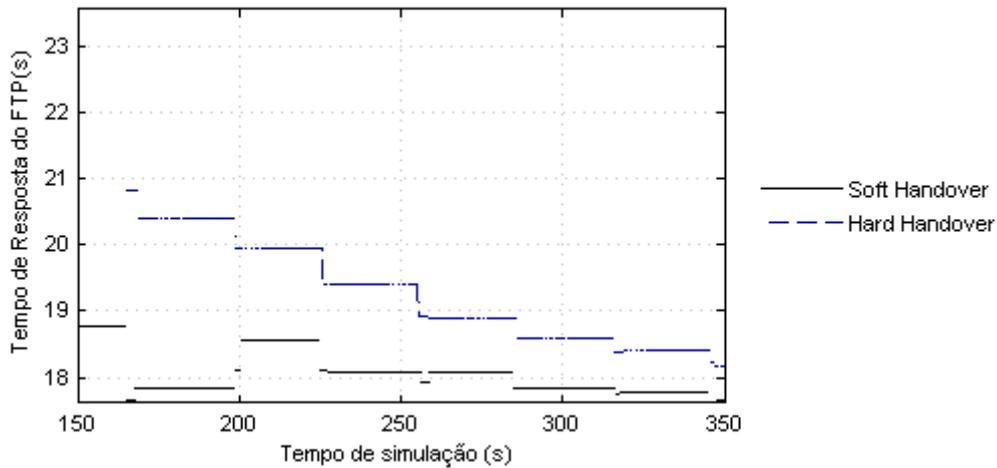


Figura 5.40. Tempo de resposta do FTP

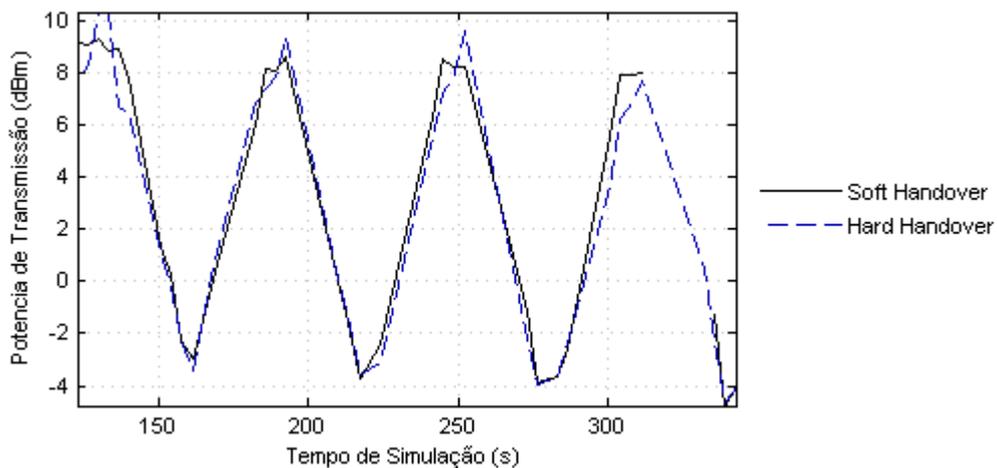


Figura 5.41. Potência de transmissão na subida (camada física do móvel)

Pela Figura 5.40, podemos perceber que não se tem grandes diferenças entre o *soft* e o *hard handover* em relação aos impactos em seus tempos de resposta da aplicação. O tempo de resposta é a quantidade de tempo que leva para o usuário se conectar a rede e a quantidade de tempo para completar uma transação, no caso, completar o *upload* do arquivo.

A vantagem do *soft handover* fica evidente com a Figura 5.41 que compara a potência de transmissão do UE na subida para ambos os casos. Percebe-se que os picos são mais suaves durante os *soft handover*. São os picos que indicam os *handover*, pois antes dele o UE está se afastando de determinada *Node-B* e, portanto no exato momento do *handover*, sua potência está máxima, pois sua distância é a maior possível. Logo depois do *handover*, a potência diminui, já que ele já está conectado a outra *Node-B*, mais próxima.

Comparando as curvas para os dois cenários, a potência durante o *hard handover* atinge valores bem mais altos (diferença de 3 dB). Assim, a vantagem do *soft handover* é a possibilidade de fazê-lo em menores valores de potência, o que é uma vantagem para outros UEs devido a uma menor interferência, além de proporcionar uma maior autonomia de bateria. No entanto, para isso, o usuário

demanda mais recursos da rede, já que no momento do handover, ele estará se comunicando com duas *Node-Bs*.

### 5.3.4 DESEMPENHO DA REDE COM DIFERENTES NÚMEROS DE MÓVEIS

A quarta simulação evidencia o funcionamento da rede proposta variando o número de móveis (ônibus) nela conectados: 1, 5, 20, 50 e 100. Para tal simulação, manteve-se fixa a taxa de transmissão de cada um dos ônibus (320 bps) e foi-se aumentando o número de ônibus da rede. Os ônibus enviam para um servidor seus dados de posição, velocidade e qualquer outra mensagem de segurança e controle do sistema. Eles têm trajetórias conforme descrito na Seção 5.1.1. As paradas de ônibus recebem dados do servidor com as informações dos ônibus que estão próximas a ela, informando para os passageiros o tempo de chegada dos veículos. O número de paradas é fixo para todos os casos, e o tráfego é fixo em 320 bps por parada, existindo 64 paradas. Primeiramente, foi verificada a maior taxa possível de ser enviada por cada UE. Para tal, foi enviado um tráfego variante, conforme pode ser visto na Figura 5.42 que crescia de 0 até 50 kbps. Foram simuladas taxas bem maiores que as necessárias para a aplicação inicial do sistema, pois o sistema usando o UMTS poderia ser utilizado para várias outras aplicações. Foi verificado que a maior taxa que o servidor era capaz de receber era aproximadamente 48 kbps. Esse valor é apenas para análise do sistema modelado pelo software, pois para a situação em questão, as taxas reais dos ônibus não passam de alguns *bytes*. Os valores médios para o UMTS é de 300 kbps, o baixo valor encontrado se deve ao pequeno tamanho dos pacotes utilizados no sistema.

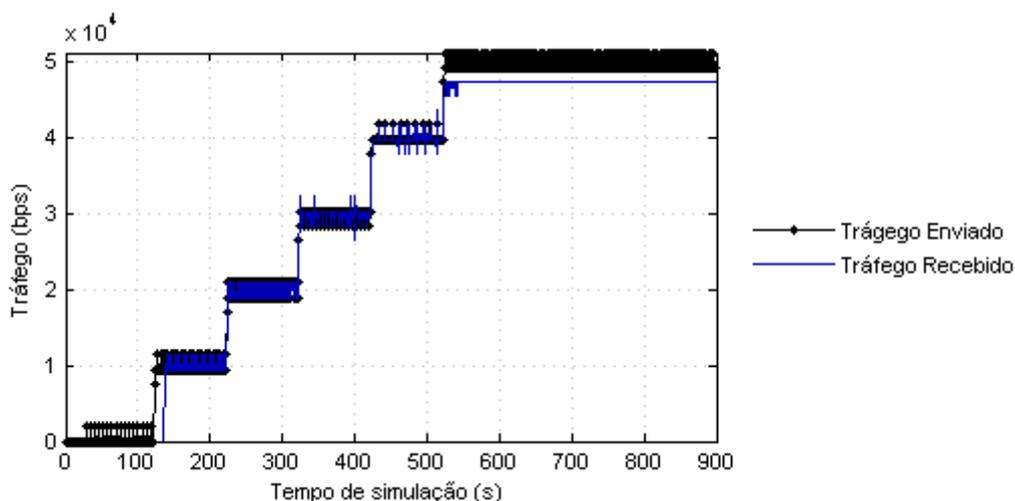


Figura 5.42. Máxima taxa recebida

Sabendo, portanto das limitações da rede, podemos visualizar o funcionamento da mesma analisando o tráfego enviado pelos ônibus para o servidor.

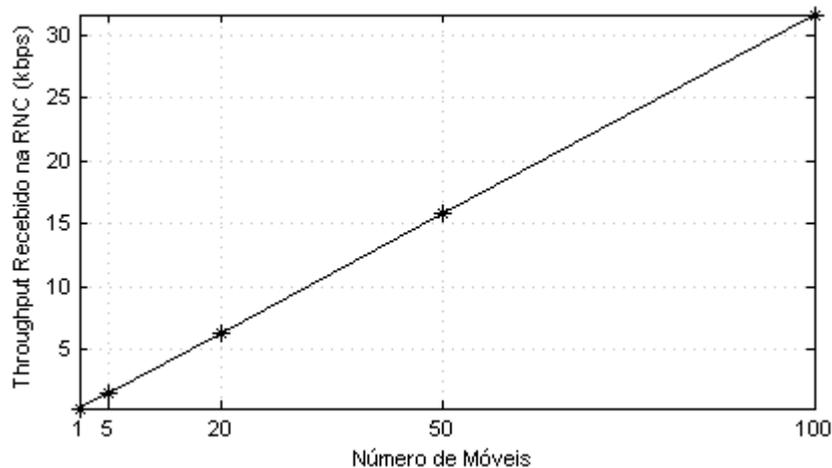


Figura 5.43. *Throughput* recebido pela RNC em função do número de moveis.

Na Figura 5.43, temos o tráfego recebido pelas RNCs para diferentes números de usuários da rede. Como era esperado, o tráfego recebido aumenta proporcionalmente com o aumento de tráfego dos usuários para o servidor. Esse aumento é linear para o gráfico, pois não se chega a um valor máximo do UMTS. Esse valor é de aproximadamente 2 Mbps por *Node-B* [23]. O que mostra que para a rede desejada, o UMTS seria uma solução satisfatória mesmo com um grande número de ônibus. Isso se deve ao fato que o tráfego de todos os ônibus é pequeno para serviços de estimativa de tempo ou emergências. Para o caso de serviços internet dentro desses ônibus e outros serviços de banda larga, mais recursos da rede seriam necessários. Para verificar o funcionamento dessa rede em meio a outros serviços, realizou-se a simulação descrita no 5.3.5.

### 5.3.5 DESEMPENHO DA REDE COM OUTROS USUÁRIOS

A última simulação demonstra o funcionamento do sistema idealizado levando em consideração os outros usuários da rede. Para tal, de acordo com dados de quantidade real de usuários da Brasil Telecom, realizou-se uma simulação concentrada numa pequena área com ônibus e usuários externos a essa rede. Esses usuários fazem uso de recursos de multimídia como VoIP e Vídeo Conferencias. Para demonstrar se o funcionamento é satisfatório, é necessário analisar os atrasos e a eficiência da rede.

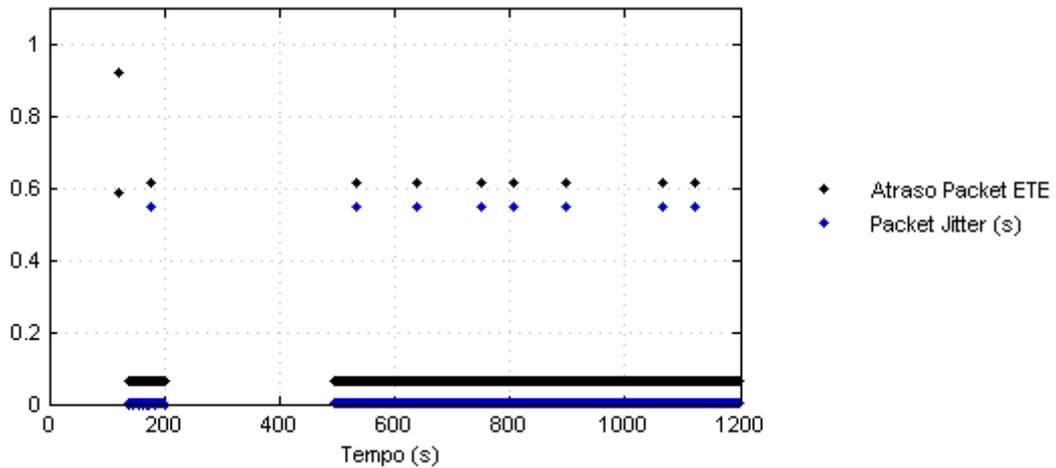


Figura 5.44. Atraso fim-a-fim e *jitter* na rede com influencia de móveis externos ao sistema.

Na Figura 5.44 pode-se observar que o Atraso de pacotes fim-a-fim (ETE – *end-to-end*) estão em sua maioria em valores próximos a 10 ms, com alguns pacotes experimentando atrasos maiores, que mesmo assim, não passam de 60 ms, que está próximo do valor especificado para o UMTS (50 ms). Da mesma forma, verifica-se que o *jitter*, que é a medida de variação do atraso entre os pacotes sucessivos de dados, também não passa desse valor. Esses dados são muito importantes para avaliar, por exemplo, o serviço de voz sobre IP (VoIP), pois para esse tipo de sistema, tanto o efeito do *jitter*, quanto a sua mais simples solução, bufferização, não são desejáveis.

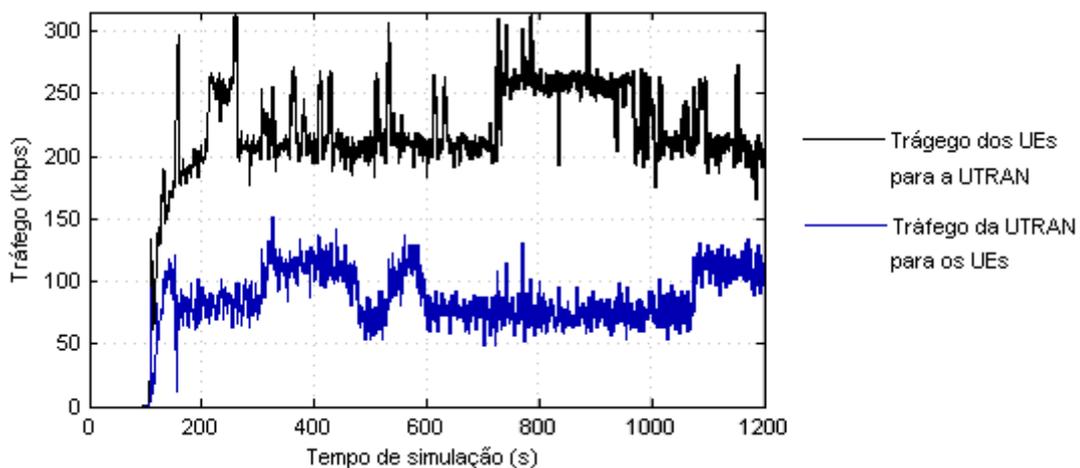


Figura 5.45. Tráfego recebido e enviado entre os UEs e a UTRAN.

Na Figura 5.45, tem-se o tráfego enviado pelos UEs para a UTRAN (*Node-B* e RNC) e o tráfego da UTRAN para os UEs. Pode-se notar que o tráfego é bem maior que nas situações anteriores, pois a rede não é exclusiva para o sistema de comunicação entre os ônibus e paradas. Têm-se usuários multimídia que transmitem e recebem aproximadamente 10 kbps de dados entre si além das informações enviadas dos ônibus para o servidor e do servidor para as paradas. Percebe-se que o tráfego do sistema proposto é uma pequena parcela do tráfego total da rede UMTS para essa área simulada. Isso demonstra o funcionamento do sistema mesmo em meio a outros usuários e serviços.

### 5.3.6 CONCLUSÕES

Nesse capítulo foram apresentados resultados de simulações para demonstrar e analisar o desempenho de uma rede UMTS e, de forma mais específica, o desempenho do sistema proposto.

Primeiramente, foi observado com as simulações que algumas características do UMTS são primordiais para o seu bom desempenho. Viu-se que como o canal de descida compartilhado (*DSCH*) pode usar múltiplas portadoras com a mesma largura de banda de descida, possibilitando maiores taxas de transmissão para serviços que utilizam larguras de banda variadas. Foi visto também que cada classe de tráfego experimenta um atraso diferente, de acordo com o QoS determinado para cada serviço. Outro fator importante desse tipo de rede é a possibilidade de realizar o *soft-handover* que permite o UE utilizar uma menor potência de transmissão reduzindo a interferência. No entanto, para tal, ele usa mais recursos da rede, já que ele estará mandando seus dados para duas *Node-Bs*. Com uso dobrado de recursos por um usuário apenas (uso de dois canais), diminui-se as taxas disponíveis para os outros usuários da rede.

Com as simulações do sistema proposto, é possível chegar à conclusão que para o sistema, o UMTS é satisfatório tanto para serviços de baixas taxas, como de predição de tempo. Além disso é possível o uso do umts para serviços banda larga como o uso de internet, com taxas não muito elevadas. Assim, a rede UMTS pode vir a ser útil em momentos que a rede *ad hoc* não for suficientemente eficiente. No entanto, o custo de uma rede UMTS é bem superior que a proposta rede *ad hoc*, tanto o custo de implantação, tanto o custo de trafegar dados na rede. Sendo, portanto, utilizada em apenas alguns momentos do dia ou para determinados serviços. Dessa forma, garante-se uma maior confiabilidade ao sistema.

## 6 CONCLUSÕES E PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir dos estudos, resultados e análises apresentadas, podem ser feitas conclusões a respeito do sistema proposto e dos aspectos mais relevantes para o seu funcionamento.

Verifica-se que o canal rádio-móvel é um fator que causa uma degradação considerável à transmissão de sinais na frequência de 5 GHz em ambiente veicular. O desempenho obtido nas diversas simulações realizadas mostram que a taxa nominal de transmissão (6 Mbps) é muito superior às taxas conseguidas em um ambiente veicular. Mesmo para distâncias iguais a 100 m, o *throughput* máximo obtido nas simulações com o modelamento do canal vale aproximadamente metade da taxa obtida em um ambiente sem desvanecimento, apenas com o modelo de Espaço Livre. Estes resultados mostram que aplicações que necessitem de altas taxas de transmissão de dados não são possíveis no sistema.

Além da degradação da taxa de transmissão de dados obtida, o canal rádio-móvel causa também uma redução no alcance dos enlaces de comunicação, fazendo com que a probabilidade de comunicação a uma determinada distância diminua. Através das simulações feitas, pode-se concluir que, dependendo da variabilidade do meio, o sistema não apresenta bons resultados de probabilidade de comunicação, o que diminui sua confiabilidade. Neste contexto, é proposto o aumento no ganho das antenas como forma de melhorar esta confiabilidade. Para a rede proposta o ganho mais adequado seria de 5 dBi. Este maior ganho faz com que o alcance de transmissão seja maior, além de aumentar a potência média de sinal recebido, possibilitando uma taxa de erro de *bit* menor, aumentando o *throughput*.

Apesar da baixa probabilidade de comunicação, as simulações do sistema utilizando as aplicações propostas resultaram em eficiências próximas a 90% e valores aceitáveis de atraso médio, menores que 1 ms. O pequeno espaçamento médio entre as paradas e a utilização de repetidores onde este espaçamento impossibilitasse a comunicação fez com que a rede superasse as dificuldades impostas pelo canal. Além disso, os resultados mostraram que aplicações típicas de Internet, como a aplicação HTTP, podem ser suportadas pelo sistema. Contudo, serviços que demandem altas taxas de transmissão não poderão ser oferecidos devido às limitações do canal.

O UMTS é satisfatório tanto para serviços de baixas taxas, como de predição de tempo, como para serviços banda larga como o uso de Internet. Assim, a rede UMTS poderia ser útil em momentos que a rede *ad hoc* não fosse suficientemente eficiente. No entanto, o custo de implantação de uma rede UMTS é bem superior que a proposta rede *ad hoc*. Além disso, diferentemente do UMTS não haveria custos de tráfego de dados na rede *ad hoc*. A utilização de repetidores na rede VANET pode garantir a cobertura necessária ao funcionamento do sistema, dispensando a utilização do UMTS como sistema secundário.

Complementando a análise do sistema baseado no padrão 802.11a, foram estudados os ganhos que podem ser obtidos utilizando-se o padrão 802.11p. Através da comparação entre os dois padrões e do

estudo dos resultados encontrados em artigos, pode-se concluir que a utilização do 802.11p possibilita um desempenho bastante superior ao sistema. Como este padrão é mais robusto ao desvanecimento de pequena escala, a degradação observada por ele será menor, reduzindo as perdas e elevando o *throughput* médio da rede. Além disso, as novas estratégias de controle de acesso ao meio e o menor *overhead* do padrão 802.11p possibilitam uma maior transferência efetiva de dados.

Outro fator determinante para o desempenho do sistema é a escolha do protocolo de roteamento e o ajuste dos seus parâmetros. O protocolo OLSR mostrou-se o mais adequado para a rede analisada. O mecanismo de *willingness* deve ser utilizado neste protocolo, e os parâmetros que proporcionam um melhor desempenho para a rede em questão são a utilização do período de sinalização igual a 1,5 segundos e do intervalo entre TCs igual a 20 segundos.

Conclui-se ainda que a utilização de antenas com ganho de 5 dBi em conjunto com a utilização do padrão 802.11p possibilitarão um aumento no desempenho global do sistema, melhorando tanto os serviços proposto para a rede de ônibus quanto possíveis serviços de Internet disponibilizados. Com estas alterações, o número de pontos de acesso poderá ser reduzido, diminuindo a infraestrutura necessária para o funcionamento do sistema e conseqüentemente, o custo necessário à sua implantação.

Propõem-se, para trabalhos futuros, a realização de medições para se determinar de forma precisa parâmetros do canal do ambiente em questão, como por exemplo, a variabilidade do meio. Essas medições servirão para caracterizar mais precisamente o cenário estudado e para verificar a validade dos dados obtidos em simulação.

É sugerida a simulação do sistema proposto utilizando-se o padrão 802.11p e antenas com ganhos de 5 dBi. Além disso, propõe-se a análise do protocolo de roteamento GPSR, um protocolo proativo geográfico que pode ser mais eficiente que o protocolo geográfico GRP analisado. É proposta também a comparação do desempenho deste protocolo na rede estudada com o protocolo OLSR, que obteve o melhor resultado dentre os simulados.

Propõem-se também o estudo da viabilidade da utilização do sistema para outras aplicações e serviços, principalmente aqueles que demandam maiores taxas de transmissão. Também é sugerido que seja analisada a necessidade e as possibilidades de se usar criptografia e protocolos de segurança na rede.

Finalmente, propõe-se a criação um protótipo do sistema, com número de nós reduzido. Simulações práticas deste sistema poderiam ser feitas para validá-lo e testar os serviços propostos e outros serviços que poderiam ser oferecidos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. DECRETO Nº 5.296 de 2 de dezembro de 2004. **Presidência da República Federativa do Brasil**, 2007. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil/\\_ato2004-2006/2004/Decreto/D5296.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil/_ato2004-2006/2004/Decreto/D5296.htm)>. Acesso em: 6 Dezembro 2009.
2. BILSTRUP, K. **A Survey Regarding Wireless Communication Standards Intended for a High-Speed Vehicle Environment**. Halmstad University. Halmstad, Suécia. Fevereiro 2007.
3. GEOSIT. **GEOSIT - Monitoramento on-line do Sistema Integrado de Transporte**. Disponível em: <<http://www.geosit.com.br/>>. Acesso em: 13 Abril 2009.
4. CITFOR. **ETUFOR - Empresa de Transporte Urbano de Fortaleza S/A**. Disponível em: <<http://www.amc.fortaleza.ce.gov.br/modules/wfchannel/index.php?pagenum=21>>. Acesso em: 15 Abril 2009.
5. NEXTBUS. **NextBus - Passenger Information Everywhere**. Disponível em: <<http://www.nextbus.com>>. Acesso em: 19 Abril 2009.
6. HELSINGIN kaupunki. **Public Transport Telematics - Helsinki Urban Traffic Control Centre**. Disponível em: <[http://www.hel2.fi/liikenteenohjaus/eng/pt\\_telematics.asp](http://www.hel2.fi/liikenteenohjaus/eng/pt_telematics.asp)>. Acesso em: 23 Abril 2009.
7. JIANG, D.; DELGROSSI, L. IEEE 802.11p: Towards an International Standard for Wireless Access in Vehicular Environments. **Vehicular Technology Conference, 2008. VTC Spring 2008. IEEE**, Maio 2008.
8. GAST, M. S. **802.11® Wireless Networks: The Definitive Guide**. 2ª Edição. ed. Sebastopol, CA: O'Reilly Media, 2005.
9. **IEEE 802.11 Wireless Local Area Networks**, 2009. Disponível em: <[http://www.ieee802.org/11/QuickGuide\\_IEEE\\_802\\_WG\\_and\\_Activities.htm](http://www.ieee802.org/11/QuickGuide_IEEE_802_WG_and_Activities.htm)>. Acesso em: 22 nov. 2009.
10. IEEE. IEEE Standard for Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, 2007.
11. EDFORDS, O. et al. **An Introduction to Orthogonal Frequency-Division Multiplexing**. [S.l.]: Divisão de Processamento de Sinais da Universidade Tecnológica de Lulea, 1996.
12. 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**, Maio 2008.
13. TSE, D.; VISWANATH, P. **Fundamentals of Wireless Communication**. New York: Cambridge University Press, 2005.
14. RAPPAPORT, T. S. **Wireless Communications: Principles and Practice**. 1ª Edição. ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall, Inc., 1996.
15. LOTHAR, S.; YUNPENG, Z.; HANS-JURGEN, R. Evaluation of communication distance of broadcast messages in a Vehicular Ad Hoc Network using IEEE802.11p.
16. KARP, B.; KUNG, H. T. GPSR: Greedy Perimeter Stateless Routing for Wireless Networks.
17. VAZ, I. P. **Roteamento Geográfico**. Disponível em: <[http://www.gta.ufrj.br/grad/06\\_2/igor/index.html](http://www.gta.ufrj.br/grad/06_2/igor/index.html)>. Acesso em: 22 Novembro 2009.
18. PERKINS, C. E.; BELDING-ROYER, E. M.; R., D. S. **IETF - RFC 3561 - Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing**. Disponível em: <<https://www1.ietf.org/rfc/rfc3561.txt>>. Acesso em: 17 Novembro 2009.

19. CLAUSEN, T. H.; JACQUET, P. **IETF - RFC 3626 - Optimized Link State Routing Protocol (OLSR)**. Disponível em: <<https://www1.ietf.org/rfc/rfc3626.txt>>. Acesso em: 17 Novembro 2009.
20. **3GPP - Third Generation Partnership Project**. Disponível em: <<http://www.3gpp.org>>. Acesso em: Outubro 2009.
21. KAARANEN, H. et al. **UMTS Networks: Architecture, Mobility and Services**. 2ª Edição. ed. Baffins Lane – England: John Wiley & Sons, Ltd, 2001.
22. RESEARCH Unit 6 - CTI. **Research Academic Computer Technology Institute**, 2009. Disponível em: <<http://ru6.cti.gr>>. Acesso em: Setembro 2009.
23. HOLMA, H.; TOSKALE, A. **WCDMA for UMTS - Radio Access for Third Generation Mobile Communications**. 1ª Edição. ed. New York: John Wiley & Sons, Ltd, 2004.
24. KAPPLER, C. **UMTS NETWORKS AND BEYOND**. 1ª. ed. [S.l.]: [s.n.].
25. LESCUYER, P. **UMTS, Les origines, L'architecture et La Norme**. 2ª Edição. ed. [S.l.]: Springer London Ltd, 2004.
26. BETTSTETTER, C. Smooth is Better than Sharp: A Random Mobility Model for Simulation of Wireless Networks, Munich, Germany, 2001.
27. WHEELWRIGHT, S. C. **Forecasting Methods for Management**. 4ª Edição. ed. New York : Wiley, 1985.
28. GENERATING Correlated Random Numbers. **SITMO**. Disponível em: <[http://www.sitmo.com/doc/Generating\\_Correlated\\_Random\\_Numbers](http://www.sitmo.com/doc/Generating_Correlated_Random_Numbers)>. Acesso em: 01 out. 2009.
29. ZHANG, J. et al. Principle of Link Evaluation. **Communications and Network**, v. 1, n. 1, p. 6-19, Agosto 2009. ISSN 10.4236/cn.2009.11001.
30. ZHUANG, J. et al. **IEEE 802.16m Evaluation Methodology Document (EMD)**. IEEE. [S.l.], p. 199. 2009. (IEEE 802.16m-08/004r5).
31. SALO, J. et al. MATLAB SCM Implemetation. **Radio**, 2005. ISSN MATLAB implementation of the 3GPP Spatial Channel Model. Disponível em: <[http://radio.tkk.fi/en/research/rf\\_applications\\_in\\_mobile\\_communication/radio\\_channel/scm.html](http://radio.tkk.fi/en/research/rf_applications_in_mobile_communication/radio_channel/scm.html)>. Acesso em: 01 set. 2009.
32. **Agência Nacional de Telecomunicações**, 2009. Disponível em: <<http://www.anatel.gov.br>>. Acesso em: Outubro 2009.
33. SHIANN-TSONG SHEU, T. C. J. C. A. F. Y. The Impact of RTS Threshold on IEEE 802.11 MAC Protocol, Tamsui, Taipei, Taiwan, 2002.
34. ZONA RESEARCH. The Need For Speed II. **Zona Market Bulletin**, v. 5, Abril 2001.
35. NETWORK R&D - Modeling and Simulation. **OPNET Technologies**, 2009. Disponível em: <[http://www.opnet.com/solutions/network\\_rd/](http://www.opnet.com/solutions/network_rd/)>. Acesso em: 15 out. 2009.
36. OPNET Modeler Documentation. OPNET Technologies, Inc. Bethesda. 2008.
37. SARKAR, S. K.; BASAVARAJU, T. G.; PUTTAMADAPPA, C. **Ad Hoc Mobile Wireless Networks - Principles, Protocols and Applications**. Boca Raton: Auerbach Publications, 2008.
38. STIBOR, L.; ZANG, Y.; REUMERMAN, H.-J. Evaluation of communication distance of broadcast messages in a vehicular ad-hoc network using IEEE 802.11p. **Wireless Communications and Networking Conference, 2007.WCNC 2007**. IEEE, Março 2007.
39. STANCIL, D. et al. Performance of 802.11p Waveforms over the Vehicle-Vehicle Channel at 5.9 GHz, Setembro 2007.



# I VISÃO GERAL DO SOFTWARE OPNET MODELER®

As redes de comunicações vêm crescendo de forma significativa nos últimos anos e aumentando o grau de complexidade dos seus protocolos a integração entre os mesmos. Os projetistas e analistas de rede são constantemente desafiados pelo elevado número de variáveis e opções possíveis para o projeto de cada sistema. A simulação se insere nesse contexto como uma importante ferramenta de suporte à decisão. A partir dela podemos modelar de diferentes formas um determinado sistema e analisar seus resultados sem precisar implantá-lo na prática.

O software OPNET Modeler® é um simulador de eventos discretos que permite o modelamento, simulação e análise de redes e protocolos diversos, como LANs, redes Wireless, MANETs, redes celulares, entre outras.

O OPNET possibilita o modelamento da rede em vários níveis de definição, mantendo uma arquitetura hierárquica que vai desde a topologia de redes e subredes até a programação em linguagem C/C++ da máquina de estados de cada processo. A Figura I.1 ilustra a interface gráfica do software evidenciando os diferentes níveis hierárquicos editáveis.

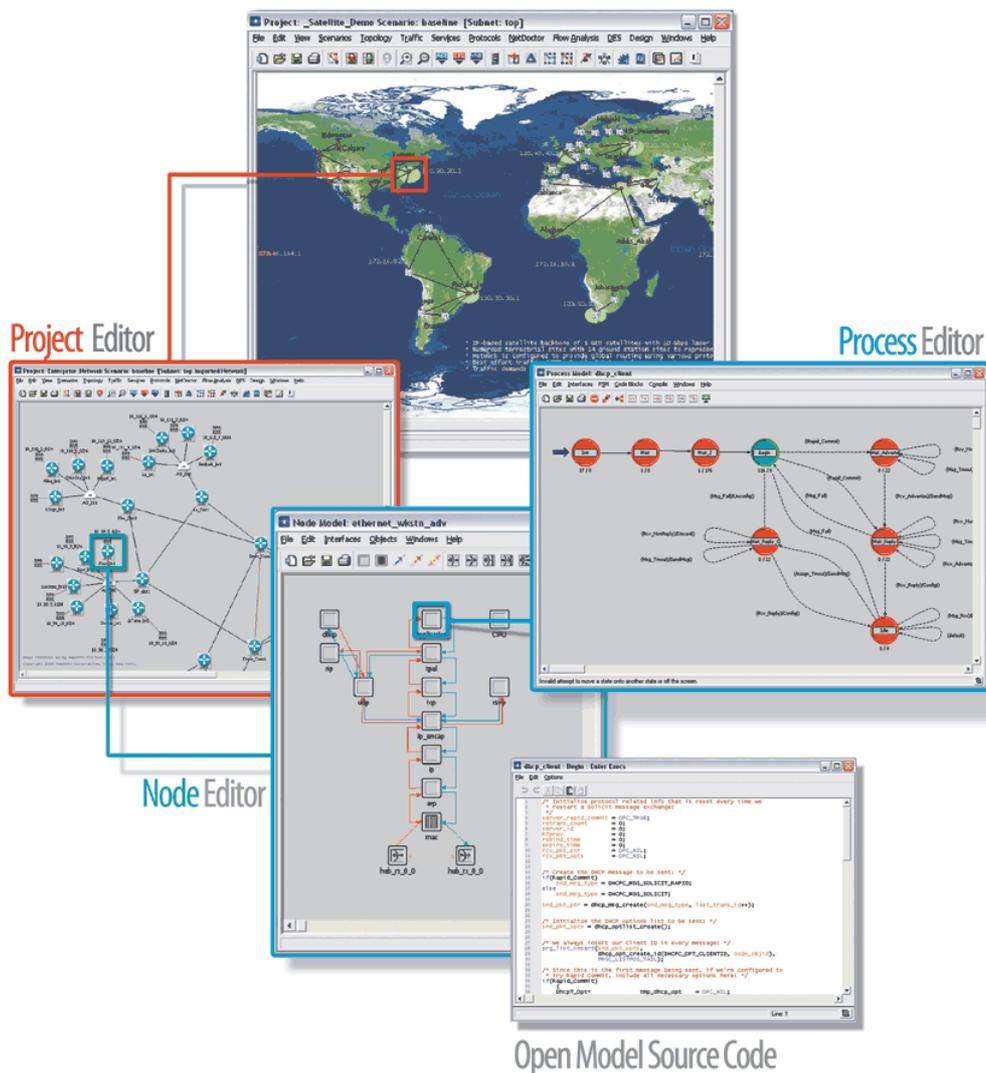


Figura I.1. Arquitetura em níveis hierárquicos da interface gráfica do software OPNET Modeler [35]

Os principais níveis hierárquicos do programa são descritos resumidamente nas próximas seções. [35]

## I.1 EDITOR DE PROJETOS (*PROJECT EDITOR*)

Representa graficamente a topologia de uma rede de comunicação. É o nível principal, mais alto, onde é possível criar o modelo de uma rede utilizando bibliotecas de módulos existentes ou criados, como nós, *links*, redes e subredes, escolher as estatísticas a serem analisadas, realizar simulações e visualizar seus resultados. Várias situações de uma mesma rede podem ser modeladas utilizando cenários distintos.

### I.1.1 CENÁRIOS (*SCENARIOS*)

Os cenários são ambientes de trabalho do editor de projetos onde são colocados e interligados os nós e redes. Permite que os nós sejam georeferenciados. É possível utilizar diferentes cenários em um mesmo projeto com construções distintas de rede ou comparar uma mesma rede sujeita a diferentes configurações.

## **I.II EDITOR DE NÓ (*NODE EDITOR*)**

O Editor de nó define o comportamento de cada objeto, equipamento ou nó em geral da rede, utilizando diferentes módulos ligados por feixes de pacotes (*packet streams*) ou ligações para estatísticas (*statistics wires*). Os módulos representam normalmente protocolos ou algoritmos. A interligação dos módulos reflete a arquitetura do equipamento ou objeto em questão.

## **I.III EDITOR DE PROCESSOS (*PROCESS EDITOR*)**

Este nível controla as funcionalidades de cada módulo dos nós através de uma máquina de estados finita (*FSM – Finite State Machine*). A FSM suporta especificações detalhadas de protocolos, recursos, aplicações, algoritmos e políticas de filas. Cada estado pode ser descrito em linguagem C/C++ , e a integração entre os estados é feita por feixes de transição de estado. Os processos podem ser cascateados em “processos pais” e “processos filhos”.

## **I.IV EDITOR DE CÓDIGO FONTE (*OPEN MODEL SOURCE CODE*)**

Nível mais baixo da hierarquia, que controla cada estado ou transição utilizando a linguagem de programação C ou C++. É possível programar cada parte da máquina de estados individualmente.

## **I.V MODELANDO REDES *WIRELESS***

### **I.V.I FUNDAMENTOS DE COMUNICAÇÕES SEM FIO**

- **Movimentação de sites**

Os sites fixos (nós e subredes) podem ser posicionados manualmente e podem ser georeferenciados. Os sites móveis (nós móveis e satélites) podem se movimentar de acordo com uma trajetória pré-definida em função do tempo. Ou uma *órbita* pré-definida no caso do satélite.

- **Radio Links**

Nós fixos, nós móveis e satélites comunicam-se por enlaces não estáticos. Eles são estabelecidos dinamicamente durante a simulação de acordo com as características de comunicação dos nós (como fatores variantes no tempo, posição dos nós, modificação dos atributos de transmissão e recepção e interferências de outros enlaces).

Durante a simulação, fatores como banda, modulação, potência transmitida, distância e direção da antena determinam se um enlace existirá ou não em um determinado momento.

Há um módulo opcional chamado “*Terrain Modeling*” que simula os efeitos do relevo e dos fatores atmosféricos no desempenho do enlace.

As antenas podem aumentar ou diminuir a potência do sinal transmitido ou recebido de acordo com a direção de propagação.

O atraso de propagação e a relação sinal/ruído são importantes fatores para determinar se um pacote foi transmitido com sucesso. O atraso de propagação dos pacotes determina quando os pacotes serão recebidos e quando colidirão. As colisões causam interferência e redução da relação sinal/ruído. Com os dados obtidos é calculada a BER que determina se um pacote é aceito ou não.

- **Características das Simulações**

As simulações podem ser realizadas sobre um grupo de nós, calculando os resultados sobre todos eles. Animações de movimentação dos nós podem ser vistas durante o progresso da simulação, utilizando a ferramenta *Time Controller*. Além disso, é possível gravar o fluxo de pacotes entre nós durante uma simulação. A ferramenta *2D Animation* é utilizada para a visualização dos fluxos.

- **Trajétórias**

As trajetórias podem ser baseadas em segmentos ou vetores.

**Segmentos** – São trajetórias formadas por uma série de pontos tridimensionais (x,y e altitude). O móvel atravessa esses pontos em um tempo estimado que pode ser fixo ou variável. A Figura I.2 mostra um exemplo de uma trajetória baseada em segmentos percorrida por um navio.

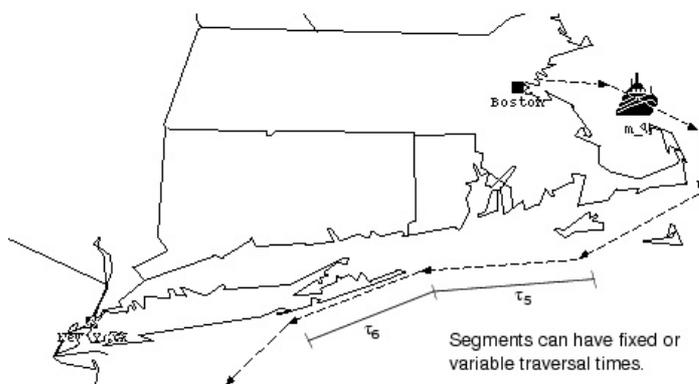


Figura I.2. Exemplo de trajetória baseada em segmentos [36]

**Vetores** - Depende de uma grande circunferência ao redor da Terra com centro congruente com o centro da mesma e passando por um determinado ponto que normalmente é definido como o nó que seguirá a trajetória. Esta circunferência é especificada de acordo com uma direção, velocidade em relação a terra e velocidade de subida. Não há um tempo limite e a posição do site muda de acordo com as especificações do vetor. Durante a simulação, o comportamento do site pode alterar os parâmetros do vetor, definindo uma nova circunferência ao redor da Terra. A figura a seguir ilustra a trajetória baseada em vetor.

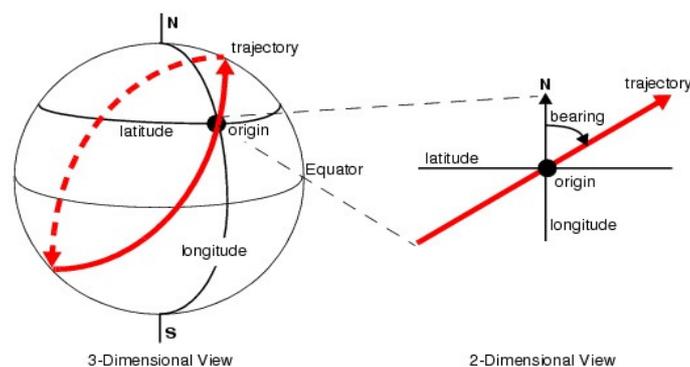


Figura I.3. Exemplo de trajetória baseada em vetor [36]

- **Manipulação Dinâmica da Posição dos Nós**

Se uma trajetória não for especificada para um determinado nó, sua posição pode ser atualizada por um processo durante a simulação.

- **Mobilidade Aleatória**

É possível determinar através do modelo de mobilidade “*random mobility*”, uma região retangular na qual um site irá se movimentar durante a simulação. O site escolhe um destino aleatório dentro da região e move-se com uma velocidade que pode ser específica ou também aleatória. Após alcançar o destino o site para por um tempo configurável e repete o processo.

Os parâmetros de mobilidade aleatória de um objeto podem ser salvos em um perfil e reusados em outros objetos mantendo a independência dos movimentos.

É possível repetir um determinado caminho aleatório seguido por um nó como forma de comparação entre simulações.

- **Wireless Domain**

Wireless Domain é uma técnica que pode ser utilizada para dividir a área de cobertura em clusters. Os parâmetros do enlace entre dois nós são calculados com base nos clusters a que pertencem e o resultado é armazenado para futuros cálculos. Esta técnica otimiza o tempo de processamento. [36]

## I.V.II ESTATÍSTICAS EM REDES SEM FIO

Além das estatísticas do canal como BER, *throughput* e *tamanho da fila*, o suplemento Wireless permite a coleta de medidas como status de colisão, potência recebida e relação Sinal/Ruído, além de estatísticas específicas do protocolo WLAN (*wireless LAN*).

Estatísticas de pares de nós podem ser criadas permitindo o foco em um *link* específico de um determinado transmissor com um determinado receptor. Um gráfico normal de um nó representaria a potência recebida por todos os transmissores enquanto um gráfico de um par de nó representaria a potência recebida apenas pelos transmissor selecionado, adicionando seletividade ao processo.

- **Animações Automáticas**

A funcionalidade *wireless* permite a captura animada do movimento dos nós móveis e satélites e do fluxo de pacote entre os mesmos. [36]

## I.VI MODELOS SEM FIO

- **Modelos Padronizados**

O OPNET disponibiliza padrões de comunicação como sistemas celulares (GSM, CDMA, UMTS, IEEE 802.16 WiMAX, LTE) redes móveis *ad hoc*, Wi-Fi (IEEE 802.11), Bluetooth, ZigBee, satélites, entre outros. O *Wireless LAN* (IEEE 802.11) inclui modelos detalhados para análise de implementações WLAN usando simulação de eventos discretos. Inclui os padrões IEEE 802.11, 802.11b, 802.11a, 802.11g e 802.11e. [35]

Para estudos de redes wireless que envolvam interferências simples, três modelos básicos de fontes *jamming* (interferência eletrônica intencional) são oferecidos:

- *Single-Band Jammer*

- *Pulsed Jammer*

- *Frequency-Swept Jammer*

Modelos de Antenas básicos e de fabricantes específicos também estão disponíveis ou podem ser facilmente especificados através do editor de Antenas. [36]

- **Modelos Especializados**

- **Mobile Ad Hoc Networks (MANET)**

O modelo MANET possibilita o roteamento de pacotes entre nós de uma rede utilizando um dos algoritmos modelados. Os protocolos de roteamento disponíveis são:

- *Ad Hoc On Demand Distance Vector Routing (AODV)*

- *Dynamic Source Routing (DSR)*

- *Optimized Link State Routing (OLSR)*

- *Temporally-Ordered Routing Algorithm (TORA)*

- **Universal Mobile Telecommunications System (UMTS)**

Baseado no padrão *3rd Generation Partnership Project (3GPP) Release-5*, possibilita a criação de redes de celular 3G. [36]

## I.VII MODELANDO O TRÁFEGO DA REDE

### I.VII.I TIPOS DE TRÁFEGO

Com o OPNET é possível modelar tráfegos Explícitos (*Explicit Traffic*) e em segundo plano (*Background Traffic*).

### I.VII.II EXPLICIT TRAFFIC

É o tráfego simulado pacote por pacote. A simulação modela cada evento relacionado aos pacotes (criação, entrada na fila, transmissão, etc.). Este tipo de tráfego resulta em resultados mais precisos, porém maior tempo de processamento. É criado pelo usuário que especifica o tamanho e a frequência das transações escolhendo uma distribuição.

O “*explicit traffic*” é configurado através dos objetos “*Application Definition*” e “*Profile Definition*”.

Existem três métodos gerais para o modelamento de tráfego explícito:

- **Geração de pacotes (Packet generation)**

É possível configurar nós para gerar *streams* de pacotes genéricos. Este é o método básico para a adição de tráfego em uma rede. A figura a seguir mostra um exemplo de geração de tráfego por este método.

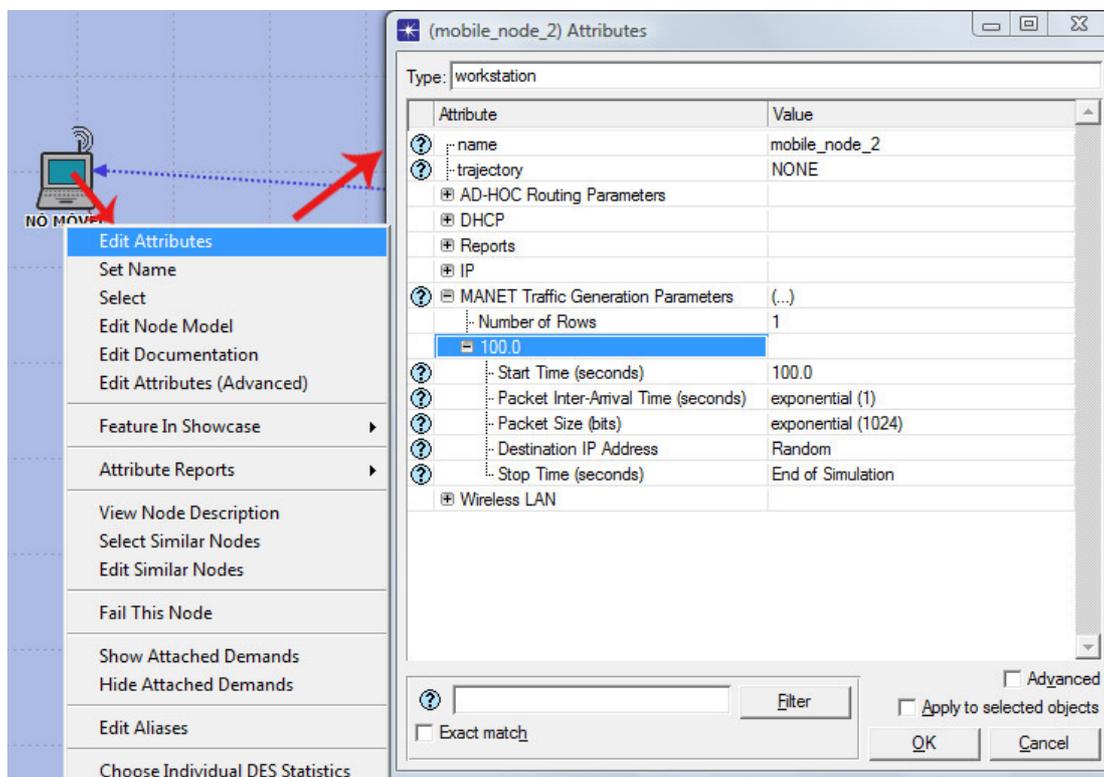


Figura I.4. Exemplo de geração de tráfego

- **Application Demands**

Quando o foco da simulação não é o comportamento das aplicações que geram tráfego, este método pode ser um jeito simples de representar o tráfego da rede.

Criado para representar o tráfego fluente entre dois nós. Este tipo de tráfego pode ser puramente discreto (explícito), puramente analítico (*background*) ou uma combinação de ambos.

Segue uma série de requisições e respostas, como em uma arquitetura cliente-servidor, o nó de origem envia uma requisição para o nó destino que retorna uma resposta para a fonte. A figura a seguir exemplifica o processo de criação de tráfego por este método.

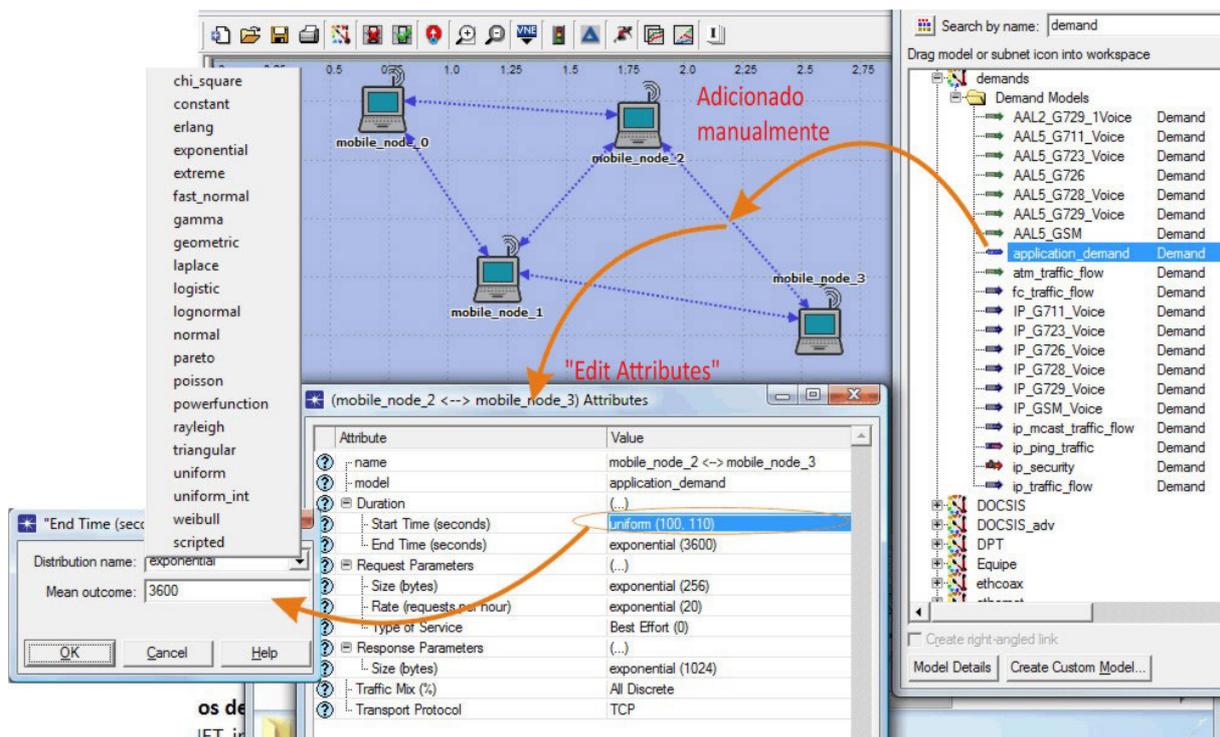


Figura I.5. Exemplo de geração de tráfego

- **Modelos de aplicação de Tráfego (Application Traffic Models)**

O OPNET inclui um conjunto de modelos para a geração de tráfego baseados em aplicações padrão como FTP, HTTP, e-mail, voz e outros. Também é possível utilizar uma modelo de aplicação genérica para representar outras aplicações não padronizadas.

É interessante definir perfis e aplicações para ser usados em uma rede.

- Perfis: podem ser aplicados em objetos específicos como servidores, LANs, clientes, etc. O perfil especifica certos tipos de aplicações utilizadas por aquele grupo particular de usuário (com aquele perfil). Por exemplo, podemos ter um perfil para os Engenheiros (pouco uso de e-mail, muito uso de FTP) e um perfil para o Marketing (Muito uso de HTTP, muito uso de e-mail).

- Aplicações: pode ser uma aplicação comum, como e-mail, FTP, HTTP, DNS ou uma aplicação customizada. As aplicações podem ser escolhidas para cada perfil diferente.

Para utilizar o modelo de aplicação de tráfego no OPNET, inserimos dois objetos na rede, o “*Profile Definition*” e o “*Application Definition*”. Os ícones estão representados na figura abaixo.



Figura I.6. Ícones utilizados para aplicação de tráfego

As aplicações padrão são mostradas na figura a seguir.

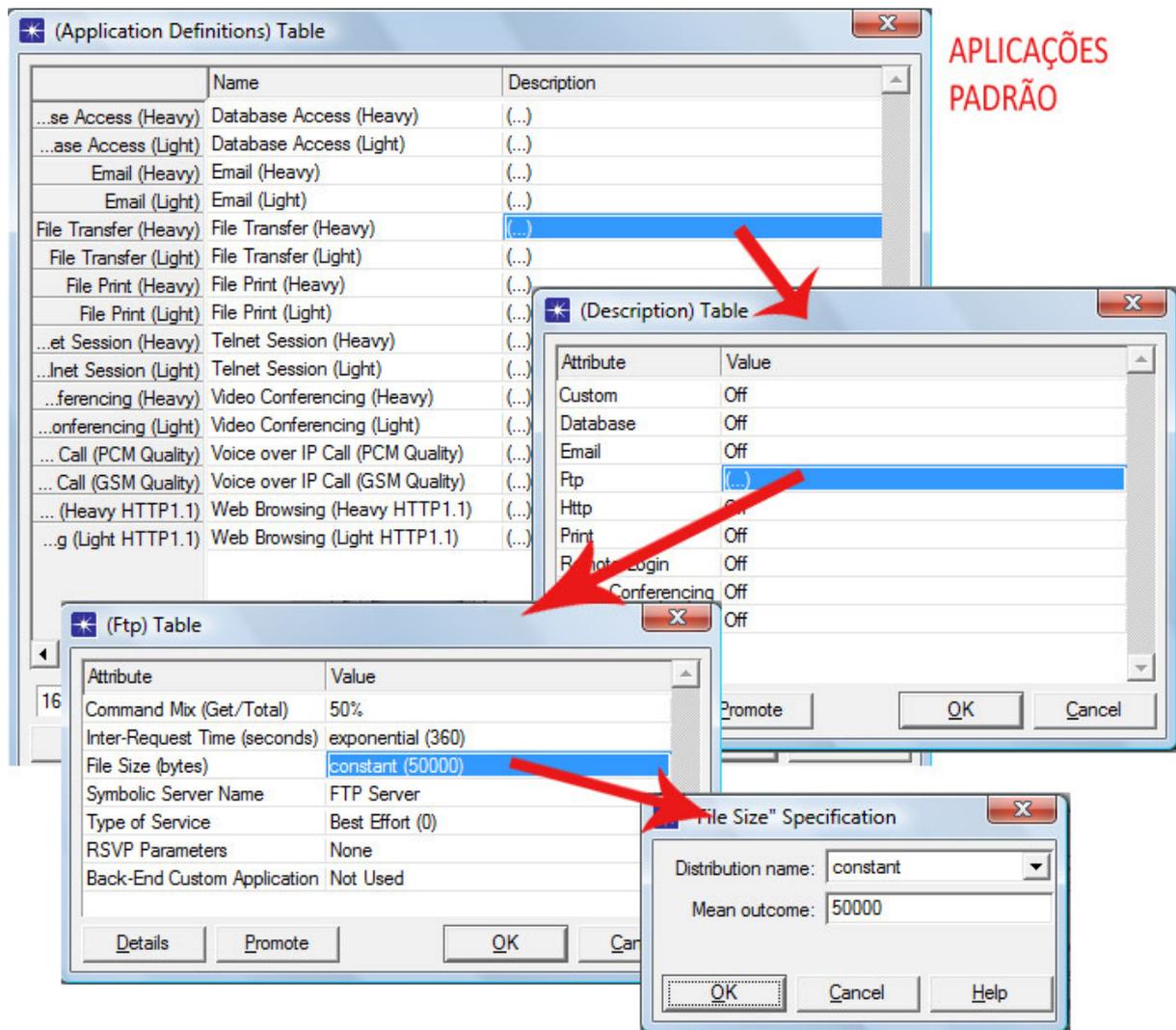


Figura I.7. Aplicações Padrão

Depois de configurar as aplicações que serão utilizadas, definimos os perfis. A figura a seguir ilustra um exemplo de definição do perfil “Estudante” e as aplicações utilizadas por esse perfil.

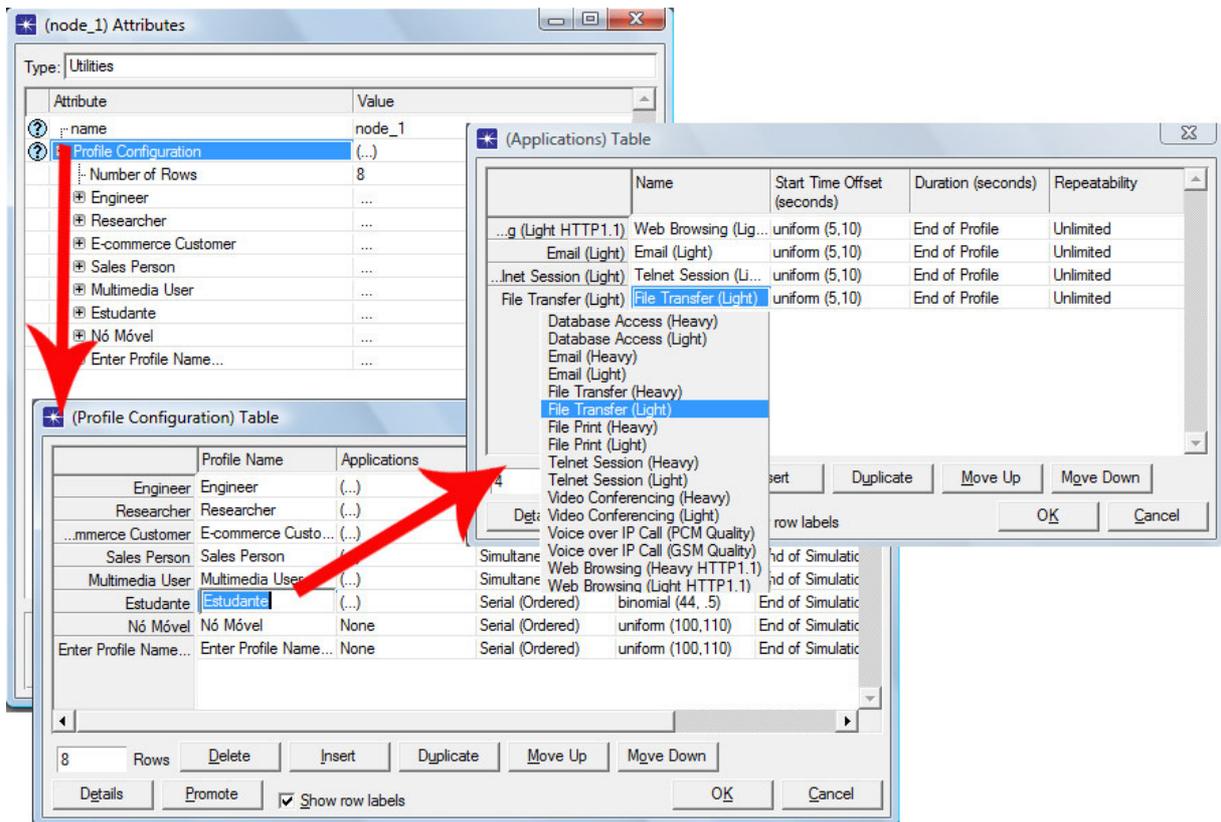


Figura I.8. Exemplo de definição do perfil “Estudante” e as aplicações utilizadas por esse perfil

### I.VII.III BACKGROUND TRAFFIC

O “*Background Traffic*” é um tráfego analiticamente modelado que altera o comportamento do tráfego explícito através da introdução de atrasos adicionais. Como cada pacote não é explicitamente modelado, a velocidade de simulação aumenta consideravelmente.

Também estão disponíveis três métodos para o modelamento do *Background Traffic*:

- **Traffic Flows**

Descrevem um fluxo fim-a-fim de uma fonte para um ou mais nós destino. É possível criar *traffic flows* manualmente, inserindo um objeto. É possível especificar:

- A origem e o destino;
- O período de simulação;
- A taxa de transmissão em *bits/s* ou pacotes/s.

É possível visualizar o tráfego entre cada par de componentes da rede através do “*Traffic Center*”. O *traffic flow*, pode ser modificado para gerar tráfego explícito através da edição dos seus atributos, modificando a variável *Traffic Mix*, de “*All Background*”, para “*All Explicit*”. A Figura I.9 mostra uma visão geral da Central de Tráfego (*Traffic Center*).

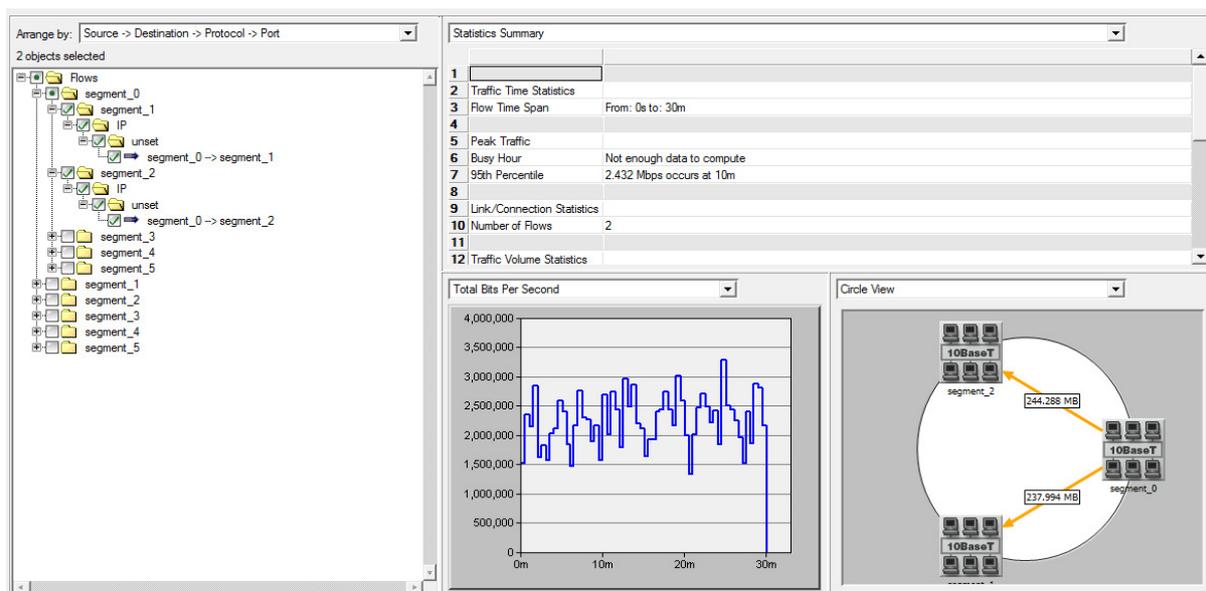


Figura I.9. Tráfego entre cada par de componentes da rede

Pode-se ainda importar o tráfego através de um arquivo texto, como no código exemplificado a seguir:

```
time_origin: 05/15/1998 04:00:00,,,,
time_end: 05/15/1998 4:30:0,,,,
traffic:,,,,
192.9.200.97,      192.9.200.8,      [05/15/1998 4:0:0-05/15/1998 4:0:30], 3960, 494400
192.9.200.97,      192.9.200.116,    [05/15/1998 4:0:0-05/15/1998 4:0:30], 3930, 492326.25
192.9.200.97,      192.9.200.27,     [05/15/1998 4:0:0-05/15/1998 4:0:30], 4530, 566092.5
192.9.200.97,      192.9.200.210,    [05/15/1998 4:0:0-05/15/1998 4:0:30], 7230, 904987.5
192.9.200.97,      192.9.200.9,      [05/15/1998 4:0:0-05/15/1998 4:0:30], 8250, 1032750
(...)
```

O tamanho de cada pacote pode ser configurado, bem com a duração do tráfego e outros parâmetros.

Pode-se editar a curva de tráfego manualmente como no exemplo ilustrado na figura a seguir.

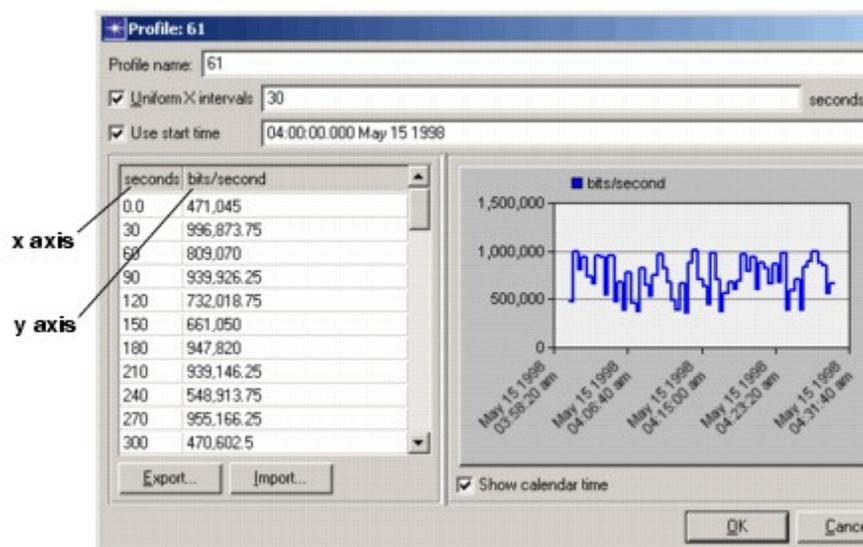


Figura I.10. Caixa para editar o tráfego manualmente

- **Baseline Loads**

Representa o tráfego como um *throughput* estático de um *link*, nó ou conexão. É aplicado pelo usuário a um determinado objeto.

Também é possível importar a linha de carga de um arquivo texto externo.

A carga é usualmente definida como uma porcentagem da capacidade total do servidor, LAN ou outro nó. No caso de *links*, é definida usualmente em *bits/seg*.

- **Application demands**

Criado para representar o tráfego fluente entre dois nós, como citado anteriormente. [36]

## I.VIII ESTATÍSTICAS

O OPNET disponibiliza uma série de dados que podem ser coletados durante a simulação. Diversos tipos de gráficos e animações podem ser gerados.

As estatísticas podem ser coletadas a nível global (*Global Statistics*) ou Local (*Node* ou *Link Statistics*), de um link ou nó específico. Além disso, a utilização do tráfego do tipo *traffic flow* permite a obtenção de estatísticas especiais (*Demand Statistics*) como tráfegos enviado e recebido, atraso fim-a-fim e *jitter*.

Estatísticas locais estão associadas com objetos particulares. Os objetos que suportam estatísticas locais são os nós, links e módulos. Estatísticas globais fornecem informações relacionadas com todo o sistema. [36]

A divisão principal das categorias de dados é mostrada a seguir:

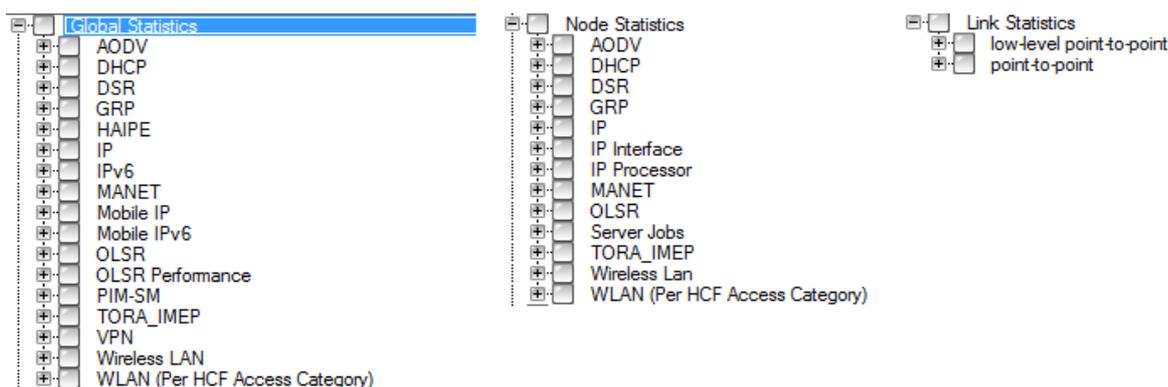


Figura I.11. Categorias de Estatísticas

Em cada uma das categorias secundárias (como AODV, DHCP, IP, etc.) podemos obter uma gama de dados diferentes. Nas figuras a seguir exibimos um exemplo de dados que podem ser coletados por padrão da subcategoria “*Wireless LAN*” a nível global e local.

- **Estatísticas Globais:**

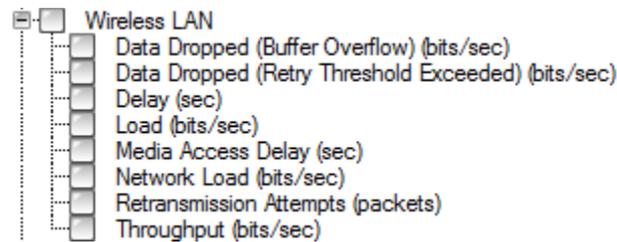


Figura I.12. Estatísticas Globais

- **Estatísticas dos Nós**

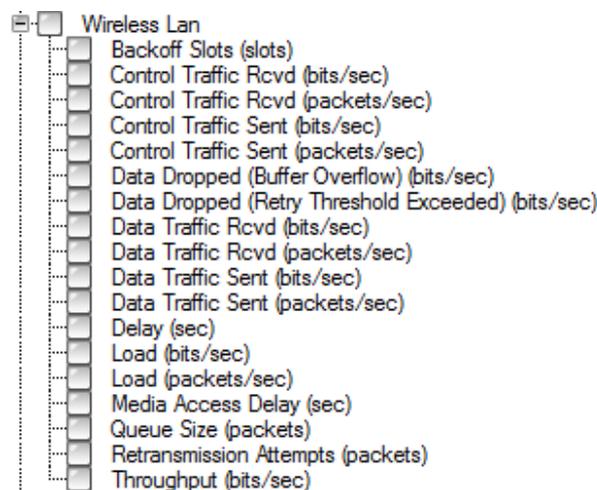


Figura I.13. Estatísticas dos Nós

## I.IX RADIO TRANSCEIVER PIPELINE

O radio transceiver pipeline é a pilha de processos que o OPNET executa para tratar o envio e o recebimento de pacotes, por um par transmissor/receptor. Ele é composto por 14 estágios. A maioria desses estágios é executada para cada pacote para cada receptor.

A camada física é modelada no OPNET através de vários estágios interligados, alguns associados ao transmissor e alguns deles associados ao receptor, como por exemplo, o modelo de erro que é executado no décimo terceiro estágio (estágio “*wlan\_error*”) que pega como entrada informações calculadas anteriormente, por exemplo, no estágio que trata da potência recebida (“*wlan\_power*”), estágio da relação sinal-ruído (“*dra\_snr*”), o estágio que trata da taxa de erro de *bit* (“*wlan\_ber*”) entre outros. Detalhadamente, o evento de geração de erro opera da seguinte forma:

### **Estágio 0:** *Receiver Group*

Neste estágio, o OPNET verifica, para cada nó transmissor, todos os possíveis nós receptores de pacotes gerados por esse transmissor. No caso, ele verifica se as bandas de frequência dos dois nós são compatíveis, se a separação espacial entre eles é muito grande para possibilitar a comunicação, se as antenas são direcionais e não estão alinhadas, etc. Normalmente é executado apenas uma vez no início da simulação e analisa todos os nós.

### **Estágio 1:** *Transmission delay*

Este estágio é o primeiro a ser executado no início da transmissão de cada pacote, dado que o estágio 0 é executado normalmente somente no início da simulação. É executado apenas uma vez para todos os receptores.

Este estágio é o responsável pela determinação do tempo gasto para a transmissão, desde o primeiro até o último *bit* enviado. Esse parâmetro é importante para determinar o tempo de retenção do canal, para determinar quando outro pacote pode começar a ser transmitido ou quando o canal se tornará disponível.

### **Estágio 2:** *Closure*

Neste estágio, é determinado para cada receptor se o pacote que está sendo enviado será ou não considerado no resto do processamento. Não é necessário que este seja um pacote válido, ou que tenha como destino o receptor considerado. Apenas é verificado se essa transmissão afeta de alguma forma o receptor, podendo ser um pacote recebido ou apenas ruído. Essa verificação é efetuada basicamente verificando-se fatores físicos, como obstáculos e curvatura da Terra.

### **Estágio 3:** *Channel Match*

Verifica se a transmissão ocorre em uma banda compatível com a banda de recepção do canal. Dependendo do resultado dessa análise, o pacote é classificado como:

Pacote válido: A transmissão encontrasse dentro da banda de recepção e pode ser recebido com sucesso

Ruído: A transmissão não ocorre dentro da banda de recepção, de modo que a recepção não é possível, mas possui alguma parte da banda do sinal dentro da banda do receptor, gerando ruído.

Ignorado: Pacote sem componentes dentro da banda do receptor. Não são executados os próximos estágios.

### **Estágio 4:** *Transmitter Antenna Gain*

Neste estágio é calculado o ganho da antena de transmissão na direção de cada um dos receptores. Usando um vetor de direção e os dados do diagrama de radiação da antena, é calculado o ganho em questão. O ganho da antena pode ser criado a partir de dados externos ou através de padrões gerados em programação C/C++.

### **Estágio 5:** *Propagation Delay*

Computa o tempo gasto pelo pacote para “viajar” entre o transmissor e o receptor. Importante para sincronizar o começo da recepção.

#### **Estágio 6:** *Receiver Antenna gain*

Neste estágio é calculado o ganho da antena de recepção, de forma análoga ao tratamento dado ao ganho da antena de transmissão.

#### **Estágio 7:** *Received Power*

Neste estágio é calculada a potência do pacote recebido. São levados em consideração os ganhos das antenas, a distância dos nós, a potência de transmissão e a frequência. No caso, o modelo *default* é o Espaço Livre.

#### **Estágio 8:** *Interference Noise*

Este estágio é responsável pelo tratamento dos pacotes que foram considerados como ruído. Durante o tempo de recepção de um pacote válido, este estágio é responsável por monitorar as outras transmissões que estão ocorrendo e somar as componentes de potência delas que irão contribuir para a formação do ruído de interferência.

#### **Estágio 9:** *Background Noise*

Neste estágio são computados todos os componentes de ruído que não sejam provenientes de interferência. São considerados os componentes de ruído térmico e ruído AWGN.

#### **Estágio 10:** *Signal to Noise Ratio*

Primeiramente a atual relação sinal-ruído no receptor (para a transmissão de pacotes correspondente) é calculada. A SNR é calculada levando em consideração o modelo de propagação utilizado, a potência transmitida, o nível de ruído bem como os efeitos das antenas. No entanto o OPNET da forma como ele está implementado não leva em consideração o desvanecimento seletivo em frequência, o que pode ser um problema, principalmente em sistemas OFDM, pois leva a resultados não condizentes com a realidade.

#### **Estágio 11:** *Bit error rate*

Uma vez que a potência recebida e a SNR são obtidas, a taxa de erro de *bit* é calculada. As relações entre SNR e BER utilizadas pelo OPNET estão disponíveis em formas de tabelas para os diferentes tipos de modulação, que requerem a *bit*-SNR ou  $E_b/N_0$  como entrada. No entanto, ao invés de utilizar o  $E_b/N_0$ , o modelo padrão do OPNET não leva em consideração os efeitos dos diferentes tipos de modulação e aplica a SNR de símbolo ou  $E_s/N_0$ , levando à desvio de resultados algumas vezes consideráveis.

#### **Estágio 12:** *Error allocation*

Depois o número total de *bits* errados é calculado baseado em cálculos anteriores da média da BER pela SNR. A probabilidade que um certo número de erros ocorra em um pacote com um certo tamanho é

computado baseado em uma função densidade de probabilidade binomial. Com isso esse valor de *bits* errados passa para o próximo estágio (“*wlan\_ecc*”) que determina se o pacote pode ser corrigido ou não.

**Estágio 13: Error correction**

O último estágio do *transceiver pipeline* (“*wlan\_ecc*”) é responsável pela decisão de aceitar ou rejeitar o pacote recebido baseado no número de *bits* errados, o tamanho do pacote e em um limite de correção de erro selecionado no receptor. Esse limite é definido como a máxima proporção entre o número de *bits* errados por pacote que podem ser completamente corrigidos por algum esquema de codificação. O limite de correção de erro pode ser ajustado diferentemente para diferentes esquemas de correção [36].

A Figura I.14 ilustra um diagrama em blocos do *radio transceiver pipeline*.

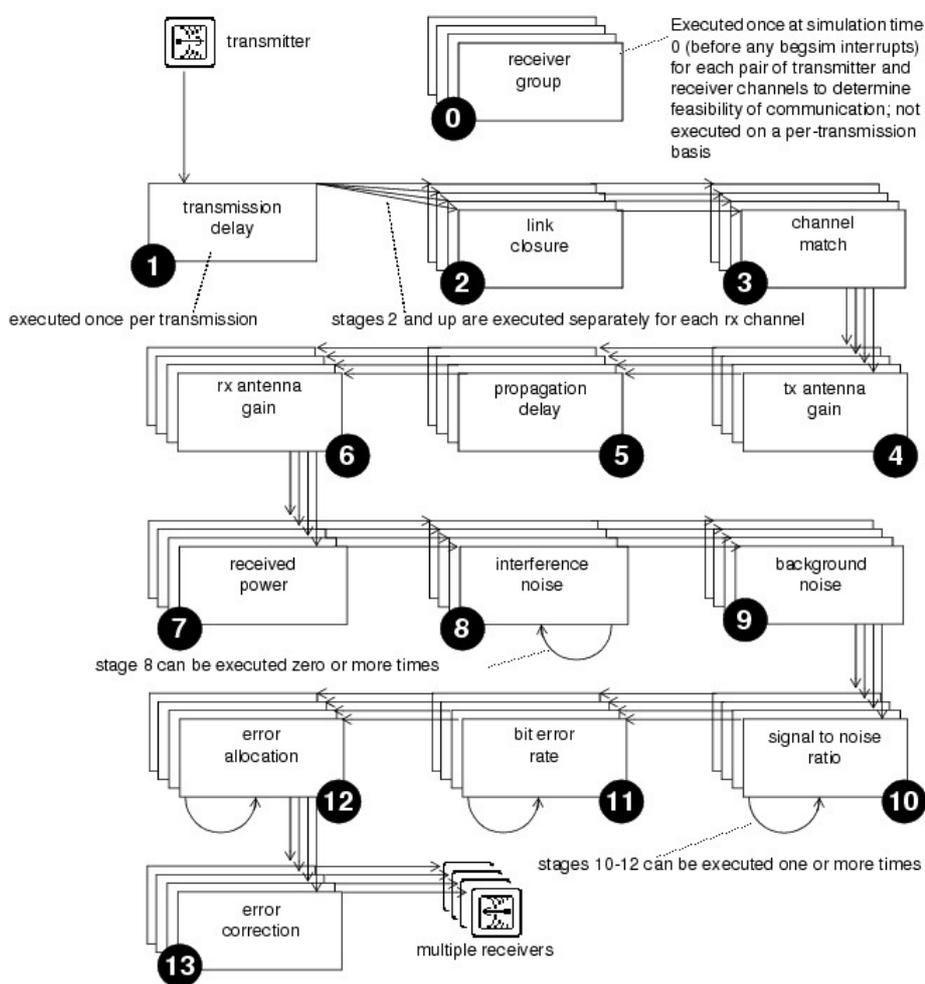


Figura I.14. Estágios do Radio Transceiver [36]

**I.X UMTS**

O *Opnet Model Suite* permite a simulação do modelo UMTS para validar qualidade de serviços fim-a-fim, *throughput*, taxa de perda, atraso fim-a-fim e atraso *jitter*. Ele também pode ser utilizado para validar a

viabilidade de oferecer uma variedade de classes de serviços dada determinada qualidade de serviço. A Figura I.15 mostra a arquitetura no UMTS modelada no OPNET.

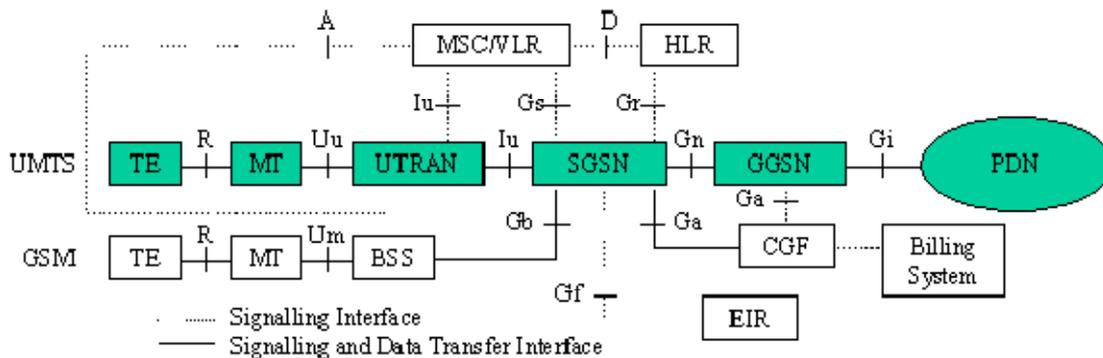


Figura I.15. Arquitetura do UMTS – OPNET [36]

O OPNET modula o RAN (*Radio Access Network*) do UMTS e as funcionalidades do *core network* conforme a Figura I.16. O RAN contém o equipamento do usuário (UE) que inclui o equipamento terminal (TE), o terminal móvel (MT) e o UMTS *Terrestrial Radio Access Network* (UTRAN), que contém o *Node-B* e o *Radio Network Controller* (RNC).

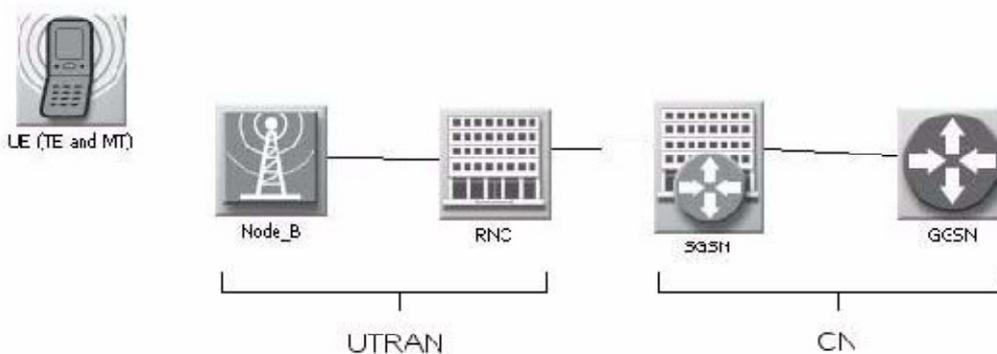


Figura I.16. Modelo UMTS – OPNET [36]

O UMTS usa WCDMA (*Wideband Code Division Multiple Access*). Nessa versão do WCDMA é utilizado um chip rate de 3,84 Mcps e uma largura de banda nominal de 5 MHz. O Modelo suporta FDD (*Frequency Division Duplex*), mas não suporta TDD (*Time Division Duplex*); ou seja, o *uplink* e o *downlink* utilizam diferentes faixas de frequência. O *frame* tem uma largura de 10 ms e é dividido em 15 *slots*. O fator de espalhamento espectral varia de 4 a 256 para o *uplink* e de 4 a 512 para o *downlink*.

O *packet domain core network* possui dois tipos de nós: o *serving GPRS support nodes* (SGSNs) e os *gateway GPRS support node* (GGSN). Os GSNs possuem todas as funcionalidades necessárias para dar suporte dos pacotes de serviço GSM e UMTS. Os SGSNs monitoram a posição do usuário e realizam funções de

segurança e controle de acesso. O GGSN contém informações de roteamento para os usuários. O CN dos modelos dos nós inclui tanto SGSN e GGSN.

O *circuit switched core network*, que não está modelado, inclui o *mobile switching center/visitor location register* (MSC/VLR). O MSC/VLR é usado na arquitetura do *packet domain* para coordenar eficientemente os serviços e funcionalidades do PS e do CS. O *Home Location Register* (HLR) contém informações do GSM e UMTS. O *Charging Gateway Functionality* (CGF) coleta informações do SGSN(s) e GGSN. O *Equipment Identity Register* (EIR) armazena informações sobre a identidade do equipamento do usuário. O HLR, CGF e EIR são parte dessa descrição, mas não estão modeladas. [36]

## II ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DO PONTO DE ACESSO KRAZER WAP 354H

### WAP354

### Wireless 802.11a/b/g 5-Port Access Point

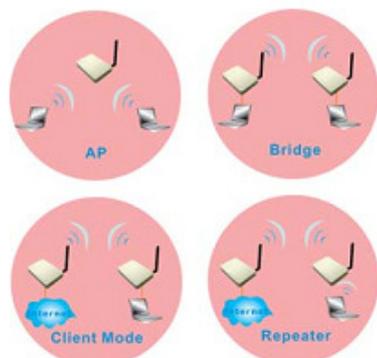
#### Description

Wireless 802.11a/b/g Access Point, WAP354, comes with 5 Ethernet ports and high-speed wireless connection to link all types of networking device together.

To ensure the highest level of security, WAP354 provides 64/128 bit WEP, WPA, WPA2 encryption, IEEE 802.1x and MAC Address Filter to prevent unauthorized PCs from accessing your wireless network.

With a web-based management interface, setting up and maintaining your network is easy and can be done from any computer on the network

#### Applications



#### Features

- Support 802.11a/b/g Standards
- Security: WEP 64/128, WPA, WPA2, 802.1x and 802.11i
- AP, WDS (Bridge + Repeater), or Client Mode
- Advanced Quality of Service (QoS) - 802.11e, WMM
- OS support: Win98/SE/ME/2000/XP/CE, Linux, MAC OSX

#### Specification

Standards	IEEE 802.11 a/b/g standards compliant
Antenna	Dual Band Detachable Dipole Antenna (RP-SMA 2dB)
	802.11b/g
	USA (FCC): 2.412GHz ~ 2.482GHz
	Europe (ETSI): 2.412GHz ~ 2.472 GHz
	Japan (TELEC): 2.412GHz ~ 2.483GHz
Frequency Range	802.11a
	U-NII: 5.15 ~ 5.35 GHz; 5.725 ~ 5.825 GHz
	ISM: 5.725 ~ 5.850 GHz
	DSRC: 5.850 ~ 5.925 GHz
	Europe(ETSI): 5.15~5.35 GHz; 5.47~5.725 GHz
	Japan (TELEC): 4.90 ~ 5.00 GHz; 5.03 ~ 5.091 GHz
Number of Selectable Channels	802.11b/g: USA (FCC) 11 channels; EU (ETSI) 13 channels; Japan (TELEC) 14 channels
	802.11a: USA (FCC) 12 channels; EU (ETSI) 19 channels; Japan (TELEC) 4 channels
Data Rate	802.11b: 1, 2, 5.5, 11Mbps
	802.11g: 8, 9, 12, 18, 24, 36, 48, 54Mbps
	802.11a: 8, 9, 12, 18, 24, 36, 48, 54Mbps
Coverage Area	Indoor: up to 100M
	Outdoor: up to 300M
Transmit Power	11a OFDM: 11 ~ 13dBm ; 11g OFDM: 13 ~ 15dBm
	11b CCK: 16 ~ 18dBm
Receiver Sensitivity	+65dBm at 54Mbps, 10% PER ; +80dBm at 11Mbps, 8% PER ;
Power Requirement	12V 800mA
Certifications:	FCC, CE



**Head Office:** 1F, No.21, Yanfa 2nd RD., SBIP Hsin-Chu 300, Taiwan ( R.O.C. )  
**Factory:** No.77, Youyi Rd., Jhunan Township, Miaoli County 350, Taiwan, (R.O.C.)  
**Taipei Office:** 3F, No.188, sec. 2, Jhongsing Rd., Sindian City, Taipei County 231, Taiwan, R.O.C.

**Tel:** 886-3-578-9090 **Fax:** 886-3-578-9520  
**Tel:** 886-37-580-777 **Fax:** 886-37-580-799  
**Tel:** 886-2-8665-0457 **Fax:** 886-2-8665-0877