Dissertação de Mestrado

Inatel
Instituto Nacional de Telecomunicações

ESTUDO, PROPOSTA DE MODELO GERAL DE SIMULAÇÃO E IMPLEMENTAÇÃO DE MODELO ESPECÍFICO PARA RANGING INICIAL EM REDES IEEE 802.16d

HERLON CLAYTON PAGGI HERNANDES

DEZEMBRO/ 2007

INSTITUTO NACIONAL DE TELECOMUNICAÇÕES – INATEL

MESTRADO EM TELECOMUNICAÇÕES

ESTUDO, PROPOSTA DE MODELO GERAL DE SIMULAÇÃO E IMPLEMENTAÇÃO DE MODELO ESPECÍFICO PARA RANGING INICIAL EM REDES IEEE 802.16D

HERLON CLAYTON PAGGI HERNANDES

Dissertação apresentada ao Mestrado em Telecomunicações do Instituto Nacional de Telecomunicações – INATEL, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Telecomunicações.

ORIENTADOR: PROF. DR. ANTÔNIO MARCOS ALBERTI.

SANTA RITA DO SAPUCAÍ - MG

2007

HERLON CLAYTON PAGGI HERNANDES

ESTUDO, PROPOSTA DE MODELO GERAL DE SIMULAÇÃO E IMPLEMENTAÇÃO DE MODELO ESPECÍFICO PARA RANGING INICIAL EM REDES IEEE 802.16D

Esta dissertação foi julgada e aprovada para a obtenção
do título de Mestre em Telecomunicações do Instituto
Nacional de Telecomunicações

Santa Rita do Sapucaí, de 17 de Dezembro de 2007.

Membros da Banca

Prof. Dr. Antônio Marcos Alberti
Orientador

Profª. Drª. Anelise Munaretto Fonseca
Examinador Externo

Prof. Dr. Sandro Adriano Fasolo
Examinador Interno

DEDICATÓRIA

Dedico àqueles que fazem a diferença.

.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus.

Agradeço aos meus pais, Joselino Hernandes e Édile Paggi Hernandes pelo apoio incondicional na minha vida.

Agradeço a minha noiva, Elisângela Cristina Ramos, pelo incentivo, compreensão e companheirismo.

Agradeço ao caro amigo-orientador Prof. Dr. Antônio Marcos Alberti, pelas horas e discussões dedicadas a este trabalho.

Agradeço aos amigos que fiz no Inatel, companheiros de estudos, em especial Bruno Augusto Caetano Coura.

Agradeço ao Inatel, por carregar a bandeira da qualidade de ensino.

Agradeço a Deus.

RESUMO

Baseados nos estudos do padrão IEEE 802.16 e de suas variantes, foi desenvolvido um modelo geral que satisfaz as funcionalidades específicas e comuns da camada MAC, bem como da camada PHY, tanto para estações rádio-base, quanto para estações de assinantes. O modelo proposto organiza as principais funcionalidades da tecnologia do ponto de vista do *uplink* e do *downlink*.

A partir deste modelo geral, foi desenvolvido e implementado em uma ferramenta baseada em eventos discretos, um modelo específico que tem por finalidade simular o processo de entrada na rede de uma estação de assinante. Este simulador é dividido em blocos funcionais que são acionados através de eventos parametrizados, baseados em tabelas e variáveis, que visam simular um ambiente real de comunicação.

Através da ferramenta é possível se visualizar todo o processo de entrada de uma estação na rede. O detalhamento do processo de sincronização da camada PHY, do processo de sincronização da camada MAC, do processo de *ranging* inicial e do processo de negociação de capacidades é facilmente visualizado e analisado. A implementação feita serve de base para trabalhos e implementações futuras, uma vez que o modelo proposto é bastante flexível e modular.

ABSTRACT

Based on studies of the IEEE 802.16 standard and its variants, it was developed a general model that satisfies the specific and common functionalities of the MAC layer as well as for the PHY layer, not only for the radio-base stations, but also for subscriber's stations. The proposed model organizes main technology functionalities from the point of view of uplink and downlink.

From this general model, it was developed and implemented in an event-driven based tool, a specific model that aims to simulate the process of a subscriber's station network entry. This simulator is divided in functional blocks that are called through parameterized events, based on tables and variables, which has the objective to simulate a real communication environment.

Using the tool it is possible to visualize the whole process of a subscriber's station network entry. The details of the PHY layer synchronization, MAC synchronization, initial ranging and capabilities negotiation processes, are easily visualized and analyzed. The implementation done serves as subsidy for future works and implementations, once the proposed model it is very flexible and modular.

SUMÁRIO

RESUMO **5**

ABSTRACT **6**

LISTA DE FIGURAS **11**

LISTA DE TABELAS **13**

LISTA DE ACRÔNIMOS E UNIDADES **14**

1. INTRODUÇÃO ..... **I**

1.1 TECNOLOGIAS SEM FIO (802.X) I

1.2 A PROBLEMÁTICA DA COMUNICAÇÃO WIRELESS BANDA LARGA III

1.3 HISTÓRICO DO WIMAX IV

1.4 MOTIVAÇÃO PARA O TRABALHO VI

1.5 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO VI

2. WIMAX **18**

2.1 DESCRIÇÃO GERAL 18

2.1.1 Padrões *18*

2.1.2 Topologias *19*

2.1.3 Freqüências *22*

2.1.4 Multiplexação *24*

2.1.5 Modulações *26*

2.1.6 Múltiplo Acesso *28*

2.1.7 Duplexing *30*

2.1.8 Sistema de Antenas *30*

2.1.9 Modelo de Referência de Protocolos *32*

2.1.9.1 PHY 32

2.1.9.1.1 WirelessMAN-OFDM PHY 35
2.1.9.2 MAC 36
2.2 ENTRADA DE UMA ESTAÇÃO DE ASSINANTE NA REDE 39
2.2.1. Visão Geral 39
2.2.2 Inicialização e Entrada na Rede 40
2.2.3 *Ranging* Inicial 41
2.3 GERENCIAMENTO E ADMISSÃO DE CONEXÕES 44
2.4 GERENCIAMENTO DE BANDA 45
2.5 EMPACOTAMENTO E FRAGMENTAÇÃO 46
2.6 SUPORTE À QUALIDADE DE SERVIÇO 46
2.7 SEGURANÇA 49
2.8 ASPECTOS MERCADOLÓGICOS 50
2.8.1 Mercado e Governo *50*
2.8.2 Fabricantes, Equipamentos e Investimentos *52*
3. PROPOSTA DE MODELOS DE SIMULAÇÃO 55
3.1 TRABALHOS ANTERIORES 55
3.2 DISCUSSÃO, PRÉ-REQUISITOS E DESAFIOS DE MODELAGEM 60
3.2.1 Topologias *61*
3.2.2 Arquitetura *61*
3.2.3 Camada MAC *62*
3.2.3.1 Gerenciamento de Conexões e Negociação de QoS 62
3.2.3.2 Gerenciamento de Largura de Banda 63
3.2.3.3 Duplexação e Mapeamento 64
3.2.3.4 *Ranging* Inicial e *Radio Link Control* 64
3.2.3.5 Segurança 65
3.2.4 Camada PHY e Modelo de Integração *65*
3.3 MODELO GERAL DE SIMULAÇÃO PARA UMA CÉLULA IEEE 802.16D 66
3.3.1 Estação Rádio Base *66*
3.3.1.1 Visão Geral 66
3.3.1.2 Output Section 69

3.3.1.2.1 MAC 69
3.3.1.2.2 PHY 75
3.3.1.3 Control Section 75
3.3.1.3.1 MAC 75
3.3.1.4 Input Section 78
3.3.1.4.1 PHY 79
3.3.1.4.2 MAC 79
3.3.2 Estação do Assinante (SS) *81*
3.3.2.1 Output Section 82
3.3.2.2 Control Section 84
3.4.1 Ferramenta de Simulação Utilizada *87*
3.4.2 Visão Geral *88*
3.4.3 BS – Base Station (Estação Rádio Base) *89*
3.4.3.1 Dados privados 89
3.4.3.2 Parâmetros 89
3.4.3.3 Eventos 90
3.4.3.3.1 BS_CM – *Base Station Connection Manager* 90
3.4.3.3.2 BS_RG – *Base Station Ranging* 91
3.4.3.3.3 BS_PHY – Base Station PHY SDU Transmiter 96
3.4.4 Subscriber Station *96*
3.4.4.1 Parâmetros 96
3.4.4.2 Eventos 97
3.4.4.2.1 SS_IAPM – Subscriber Station Initialization, Auto Configuration and Privacy Management 97
3.4.4.2.2 SS_RG_RLC 98
3.4.4.2.3 SS_PHY_SDU_RX – Subscriber Station PHY SDU Receiver 101
4. RESULTADOS OBTIDOS COM O MODELO ESPECÍFICO 103
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS 116
5.1 SUMÁRIO DAS ATIVIDADES 116
5.2 PRINCIPAIS CONTRIBUIÇÕES 118

5.3 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS 119

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 121

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: *BACKHAUL* [44]. 20

FIGURA 2: GRÁFICO DE TOPOLOGIAS [31]. 21

FIGURA 3: TOPOLOGIA PONTO-CONSECUTIVO-PONTO [44]. 21

FIGURA 4: DISPOSIÇÃO DOS SÍMBOLOS OFDM NO DOMÍNIO DO TEMPO. 24

FIGURA 5: SÍMBOLO OFDM. 26

FIGURA 6: EXEMPLOS DE CONSTELAÇÃO DA MODULAÇÃO M-QAM. 27

FIGURA 7: MODELO DE REFERÊNCIA DE PROTOCOLOS WIMAX. 32

FIGURA 8: ABSTRAÇÃO DO PROCESSO DE NETWORK ENTRY [17]. 44

FIGURA 9: PLANO DE CONTROLE DA BS (ERB – ESTAÇÃO RÁDIO BASE). 68

FIGURA 10: ALGORITMO DE CONTROLE DE *PACKING* E *FRAGMENTATION*. FIGURA 24 DE [17]. 70

FIGURA 11: SDU DE TAMANHOS FIXOS. 71

FIGURA 12: SDU DE TAMANHO VARIÁVEL. 71

FIGURA 13: CABEÇALHOS *PACKING* E DE FRAGMENTAÇÃO NO MAC SDU E PDU. 72

FIGURA 14: CABEÇALHO DO PRÉ-MAC PDU. 74

FIGURA 15: DL SUBFRAME. 74

FIGURA 16: ALGORITMO PARA O *POLLING*. FIGURA 38 DE [17]. 77

FIGURA 17: UL SUBFRAME. 79

FIGURA 18: PLANO DE CONTROLE DA ESTAÇÃO DO ASSINANTE (SS). 81

FIGURA 19: ALGORITMO DE CONCESSÃO E REQUISIÇÃO DE BANDA [17]. 86

FIGURA 20: SIMULAÇÃO: ABSTRAÇÃO DO PROCESSO DE *RANGING* INICIAL [05]. 88

FIGURA 21: SIMULAÇÃO: TELA DA FERRAMENTA QUANDO A SINCRONIZAÇÃO PHY É ALCANÇADA E AGENDA-SE FINAL DA SINCRONIZAÇÃO MAC. 104

FIGURA 22: SIMULAÇÃO: TELA DA FERRAMENTA QUANDO PRIMEIRA REQUISIÇÃO RNG-REQ É PROCESSADA NA BS. 106

FIGURA 23: SIMULAÇÃO: TELA DA FERRAMENTA QUANDO PRIMEIRA RESPOSTA RNG-RSP É PROCESSADA NA SS. 107

FIGURA 24: SIMULAÇÃO: TELA DA FERRAMENTA QUANDO: A) ÚLTIMA RESPOSTA RNG-RSP PROCESSADA NA SS ANTES DE SE ATINGIR A POTÊNCIA ADEQUADA. B) POTÊNCIA ADEQUADA ATINGIDA NA BS. 109

FIGURA 25: SIMULAÇÃO: RESULTADOS DA SIMULAÇÃO ANTES DO *RANGING* INICIAL. 113
FIGURA 26: SIMULAÇÃO: RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DURANTE AS FASES DE *RANGING* INICIAL E NEGOCIAÇÃO DE CAPACIDADES. 114

LISTA DE TABELAS

TABELA 1: COMPARAÇÃO WIMAX COM OUTRAS TECNOLOGIAS *BROADBAND WIRELESS* [09]. ...23
TABELA 2: ATRASO DE PROPAGAÇÃO EM DIFERENTES AMBIENTES [50]. ...25
TABELA 3: VAZÃO NOS ESQUEMAS DE MODULAÇÃO [15]. ...28
TABELA 4: PARÂMETROS OFDM/OFDMA USADOS EM WIMAX [09]. ...36
TABELA 5: CLASSES DE SERVIÇOS SUPORTADAS PELO PADRÃO. ...47
TABELA 6: CAMPOS DO CABEÇALHO DO PRÉ MAC PDU NA BS. ...73
TABELA 7: CAMPOS DO CABEÇALHO DO PRÉ MAC PDU NA SS. ...84
TABELA 8: SIMULAÇÃO: DADOS PRIVADOS DA *BASE STATION*. ...89
TABELA 9: SIMULAÇÃO: PARÂMETROS DA *BASE STATION*. ...89
TABELA 10: SIMULAÇÃO: ABSTRAÇÃO DO ARMAZENAMENTO DE CIDS NA BS E NAS SSS. ...91
TABELA 11: SIMULAÇÃO: PARÂMETROS DAS MENSAGENS UCD. ...91
TABELA 12: SIMULAÇÃO: PARÂMETROS DAS MENSAGENS DCD. ...92
TABELA 13: SIMULAÇÃO: ASSOCIAÇÃO DAS SS ÀS UL *BURST PROFILE*. ...93
TABELA 14: BS_ULBP – PERFIL DE *UPLINK*. ...93
TABELA 15: BS_DLBP – PERFIL DE *DOWNLINK*. ...94
TABELA 16: SIMULAÇÃO: FORMATO DA MENSAGEM RNG_REQ. ...95
TABELA 17: SIMULAÇÃO: PARÂMETROS DA SS. ...97
TABELA 18: SIMULAÇÃO: PARÂMETROS DO EVENTO SS_IAPM. ...97
TABELA 19: SIMULAÇÃO: PARÂMETROS DE SS_RG_RLC. ...98
TABELA 20: SIMULAÇÃO: EVENTOS DURANTE FASE DE SINCRONIZAÇÃO DA PHY. ...110
TABELA 21: SIMULAÇÃO: EVENTOS DURANTE FASE DE SINCRONIZAÇÃO DA MAC. ...110
TABELA 22: SIMULAÇÃO: EVENTOS DURANTE FASE *RANGING* INICIAL. ...111
TABELA 23: SIMULAÇÃO: EVENTOS DURANTE FASE DE NEGOCIAÇÃO DE CAPACIDADES. ...112

LISTA DE ACRÔNIMOS E UNIDADES

AAS	Advanced Antenna System
ABP	Adaptive Burst Profile
AK	Authentication Key
ARQ	Automatic Repeat ReQuest
BE	Best-Effort Service
BPSK	Binary Phase Shifiting Keying
BS	Base Station
CAC	Connection Admission Control
CDMA	Code Division Multiple Access
CI	CRC Indicator
CID	Connection IDentifier
CINR	Carrier to Interference and noise ratio
CRC	Cyclic Redundancy Check
CS	Control Section
CSMA	Carrier Sense Multiple Access
DCD	Downlink Channel Descriptor
DCP	Data/Control Plane
DHCP	Dynamic Host Configuration Protocol
DIUC	Downlink Interval Usage Code
DL-MAP	Downlink MAP
DAS	Dynamic Service Addition
DSC	Dynamic Service Change
EC	Encriptation Control
EKS	Encriptation Key Sequence
ERB	Estação Rádio Base
ertPS	Extended Real-Time Polling Service
FDD	Frequency-Division Duplexing
FDMA	Frequency Division Multiple Access
FEC	Forward Error Correction

FFT	Fast Forrier Transform
FHS	Fragmentation Subheader
FIFO	First Input First Output
GHz	Giga Hertz
GSM	Global System for Mobile Communications
HCS	Header Check Sequence
HT	Header Type
HTTP	Hyper Text Transfer Protocol
HUMAN	High-Speed Unlicensed Metropolitan Area Networks
IAP	Initialization, Auto-Configuratiom and Privacy Manager
IE	Information Element
IEEE	Institute of Electrical and Eletronics Engineers
IES	Instituição de Ensino Superior
IFFT	Inverse Fast Fourrier Transform
IS	Input Section
LAN	Local Area Network
LEN	Lenght
LOS	Line of Sight
MAC	Médium Access Control Layer
MAN	Metropolitan Area Network
Mbps	Mega bits per second
MHz	Mega Hertz
MIMO	Multiple-Input Multiple-Output
NLOS	Non Line of Sight
nrtPS	Non-Real-Time Polling Service
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
OS	Output Section
PAN	Personal Area Network
PDU	Packet Data Unit
PKM	Private Key Management

PHSI	Payload Header Suppression Index
PHY	Physical Layer
PMP	Point-to-Multi-Point
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QoS	Quality of Service
QPSK	Quaternary Phase Shift Keying
REG_REQ	Registration Request
REG_RSP	Registration Response
RLC	Radio Link Control
RNG_REQ	Ranging Request
RNG_RSP	Ranging Response
RSA	Algoritmo de criptografia de chave-pública desenvolvido por Ron **R**ivest, Adi **S**hamir e Leonard **A**dleman.
RSV	Reserved
rtPS	Real-Time Polling Service
SA	Security Associations
SBC_REQ	SS Basic Capability Request
SBC_RSP	SS Basic Capability Response
SDU	Service Data Unit
SFID	Service Flow Identification
SLA	Service Level Agreement
SNMP	Simple Network Management Protocol
SOFDMA	*Scalable* OFDMA
SS	Subscriber Station
STC	Space-Time Coding
TDD	Time-Division Duplexing
TDMA	Time Division Multiple Access
TFTP	Trivial File Transfer Protocol
UCD	Uplink Channel Descriptor
UGS	Unsolicited Grant Service
UIUC	Uplink Interval Usage Code

UL-MAP	Uplink MAP
UWB	Ultra-Wide-Band
VOIP	Voice over IP
VPN	Virtual Private Network
WAN	Wide Area Network
WiBRO	Wireless Broadband
WiMAX	World Interoperability for Microwave Access

1. INTRODUÇÃO

1.1 Tecnologias Sem Fio (802.x)

Com o crescimento da Internet, o uso de tecnologias sem fio tem despertado grande interesse. Não só pelo suporte a mobilidade, mas também pelas crescentes necessidades de acesso.

A cobertura dos dispositivos, freqüências e vazão definem os padrões de redes sem fio. Os padrões a seguir relacionados referem-se aos mais utilizados e difundidos padrões de mercado:

- 802.16 – MAN (*Metropolitan Area Network*):

O padrão 802.16, é preconizado pelo IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) para acesso banda larga em redes sem fio metropolitanas. No desenrolar deste documento serão relatadas as características técnicas, físicas e mercadológicas que definem este padrão de acesso. WiMAX - *World Interoperability for Microwave Access*, padrão IEEE 802.16 [21], e suas variantes, é uma tecnologia de rede sem fio, de banda larga, oficialmente chamado de "*Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems*" [17].

- 802.15 *Bluetooth* – PAN (*Personal Area Network*):

Tecnologia aplicada a pequenas distâncias e que tem por principal objetivo a conexão entre dispositivos e a conexão de diversos aparelhos, definindo uma rede pessoal. Popularmente, esta tecnologia é conhecida como *Bluetooth*. Uma PAN tem um raio aproximado ou de ação em torno de 10 metros entre o dispositivo mestre e o dispositivo de acesso. Esta célula de cobertura é definida como *Piconet*. O *Bluetooth* propaga-se em 79 canais de largura de banda igual a 1 MHz cada um, a uma taxa bruta de 1 Mbps, sendo aplicado, principalmente, na conectividade de telefones celulares a sistemas automotivos, *headsets* e computadores pessoais. Uma variante deste padrão, chamado de UWB (*Ultra-Wide-Band*) 802.15.3, é designada para entregar serviços multimídia com taxas de até 400Mbps [21]. O *Bluetooth* não foi desenvolvido para oferecer serviços de banda larga e de grande distância, todavia, pode ser utilizado numa convergência simples com outros padrões.

- 802.11 – LAN (*Local Area Network*):

O mais conhecido padrão de conexão *wireless* do mercado é dividido em 3 sub-padrões, que mostram a evolução e a convergência entre eles.

O padrão 802.11a trabalha numa freqüência de 5GHz e, conforme as características do meio, a uma velocidade de 54Mbps. Os padrões 802.11b e 802.11g trabalham na freqüência de 2.5GHz, entretanto, com velocidades diferentes, 11 e 54 Mbps, respectivamente [21].

A área de cobertura deste padrão pode chegar a um raio de 100 metros em suas configurações básicas. Em virtude das características do meio e da distância entre os dispositivos, as velocidades de propagação e a cobertura podem diminuir consideravelmente. Estas instalações são feitas através de antenas direcionais ou em topologias *mesh*, podendo chegar a 10 (dez) quilômetros de cobertura.

Mesmo uma cobertura significante para redes MAN, em determinada topologia, o padrão 802.11 não conta com características intrínsecas do padrão 802.16, principalmente as técnicas de segurança padronizados. Mesmo existindo um legado significativo, o WiMAX ainda é a melhor opção para grandes distâncias e velocidades.

- 802.20 – WAN (*World Area Network*):

O primeiro padrão a ser especificamente projetado para carregar o tráfego nativo IP para acesso em banda larga de forma completamente móvel é conhecido como *Mobile-Fi*. Ele proporcionará taxas de transmissão entre 1 Mbps a 4 Mbps a distâncias de até 15 quilômetros.

Considerando as características técnicas dos padrões *wireless* citados acima, o WiMAX combina as melhores funções para oferecer um acesso seguro, de banda larga e abrangente. Serão apresentadas durante o desenvolvimento deste trabalho, tais características intrínsecas do padrão.

1.2 A Problemática da Comunicação Wireless Banda Larga

O principal desafio para a construção e funcionamento de redes sem fio de banda larga está diretamente ligado ao meio de transmissão. As redes sem fio contam com complexos mecanismos de propagação de ondas de rádio, necessários para a comunicação entre pontos distantes, com o desafio de ultrapassar o espaço livre, espaços obstruídos e reconhecer os sinais resultantes após diversas modificações e esvanecimentos, advindos deste tipo de comunicação.

Redes de banda larga sem fio necessitam propagar sinais sobre diversas condições NLOS (*Non Line of Sight*), onde diversos obstáculos, a movimentação dos transmissores e receptores, a interferência de outros sinais, ruídos, juntamente com o atraso, o enfraquecimento e distorção dos sinais, são problemas que devem ser tratados para oferecer um serviço de comunicação de qualidade. Este é o desafio de um sistema de comunicação digital que opera nestas condições, especialmente quando este tipo de serviço requer suporte para diversas taxas de dados e mobilidade em altas velocidades [09]. Em síntese, os canais de redes sem fio para comunicações de banda larga, apresentam diversos desafios a serem vencidos.

Em ambientes NLOS os sinais recebidos são, tipicamente, enfraquecidos em relação as condições de ambientes LOS (*Line of Sight*). Este esvanecimento está diretamente relacionado a distância e, juntamente, com diversas variáveis, como terreno, folhagens e a própria instalação das antenas. Este tipo de problema é conhecido como *pathloss,* ou perda de percurso. O bloqueio do sinal em virtude da existência de obstáculos no seu caminho, sejam estes pequenos ou grandes, traz diversas e severas perdas de potência de recepção.

O recebimento de diversos sinais, resultado da propagação e reflexão de sinais por diversos caminhos, resultam no fenômeno conhecido como *multipath fading*, desvanecimento por múltiplos percursos. Este é caracterizado por variações de amplitude no recebimento dos sinais propagados e refletidos.

Juntamente com o fenômeno anterior, quando o tempo de atraso, *delay*, entre os vários sinais é significante na transmissão no período de símbolo, este símbolo pode chegar no receptor durante o período do próximo símbolo, causando assim uma interferência entre símbolos. Levando em consideração que em altas taxas de dados o tempo de símbolo é pequeno, qualquer

atraso pode causar interferências consideráveis. O uso da técnica OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) tem sido a solução para minimizar tal problema.

Diretamente relacionado com a velocidade desenvolvida dos dispositivos em movimento e a portadora, estes movimentos podem gerar dispersão de freqüência conhecida como Espalhamento *Doppler*. Em sistemas de banda larga o espalhamento *Doppler* irá gerar uma dificuldade na sincronização dos equipamentos, reduzindo a área de cobertura do sinal. Afetará também sistemas OFDM, podendo corromper suas subportadoras.

Tais características de propagação exige que técnicas de engenharia sejam desenvolvidas para mitigar os problemas citados, com a finalidade de oferecer, efetivamente, qualidade nestes enlaces. Nas seções seguintes, serão discutas algumas técnicas e soluções com este objetivo.

1.3 Histórico do WiMAX

Com o real e notório aumento na fabricação e utilização de dispositivos sem fio, o acesso sem fio banda larga recebeu mais atenção nos últimos anos [47]. O mercado está exigindo cada vez mais serviços com mobilidade e com qualidade para suportar aplicações multimídia.

Em 1999 são iniciadas pesquisas para a definição de um padrão com estas características. Em abril de 2002 sua 1ª versão fora homologada. Identificado como IEEE 802.16, tinha como principais características o funcionamento nas freqüências entre 10 e 66 GHz e velocidades de até 34 Mbps.

Popularmente é conhecido como WiMAX. Visa a interoperabilidade e convergência entre as tecnologias de conectividade banda larga, oferecendo também o acesso à última milha e a possibilidade de oferta de novos serviços agregados.

No ano seguinte, em 2003, o WiMAX Forum® foi fundado com o intuito de compartilhar e desenvolver melhorias ao padrão IEEE 802.16. Também em 2003, uma emenda à primeira versão, o IEEE 802.16a é homologada e a velocidade de funcionamento testada e suportada sobe para 75 Mbps.

Em Junho de 2004, foi publicada outra emenda ao IEEE 802.16a, o IEEE 802.16-2004 ou IEEE 802.16d, que apela à interoperabilidade. Em 2005, a variante IEEE 802.16e é publicada visando oferecer suporte as conexões nomádicas e móveis, através de antenas direcionais geograficamente distantes, e através da propagação omnidirecional.

Como já citado, o item segurança é muito discutido e atacado em outros padrões menos robustos. Devido ao meio físico de propagação e as vulnerabilidades nele existentes, os padrões IEEE 802.16 possui seções específicas e funcionais relacionadas com segurança e qualidade de serviço. Estes itens diferenciam e colocam o WiMAX à frente de outras soluções sem fio.

Quando da primeira publicação do padrão, a indústria prometera um acesso sem fio e de grande largura de banda, números muito acima dos possíveis e a preços populares. A promessa, que mais tarde deverá ser alcançada, é oferecer uma conexão de 50 Mbps, num raio de 50 quilômetros da estação rádio base e um valor médio de US$ 50. Estudos publicados afirmam que o quesito velocidade já foi alcançado. Entretanto, os demais pontos possivelmente estão próximos de serem alcançados.

No Brasil existem diversas iniciativas, inclusive governamentais, para a utilização do WiMAX para diversas soluções. Entretanto, brigas judiciais impedem a utilização comercial pelas operadoras e, conseqüentemente, a colaboração para melhoria do padrão. Paralelamente, universidades e institutos privados discutem a homologação de uma padrão próprio, batizado de WiMAX 700.

Tais características e iniciativas fazem do WiMAX, IEEE 802-16 e suas variantes, sinônimo de mobilidade, segurança, competitividade e alto desempenho, sendo uma promessa para a convergência de serviços *triple-play*, que incluem voz, dados e multimídia no mercado emergente mundial.

1.4 Motivação para o Trabalho

Com o intuito de desenvolver um modelo de suporte à qualidade de serviço oferecido pelo padrão IEEE 802.16, e conhecer detalhadamente o funcionamento da tecnologia, estão detalhados neste trabalho dados técnicos e de funcionamento do padrão IEEE 802.16.

As topologias, freqüências, modulações, camadas, interfaces aéreas, os processos de estabelecimento de conexão, técnicas de mitigação de interferência e o aproveitamento do espectro favorecem as características do padrão, tais como mobilidade, qualidade, robustez, vazão e segurança.

A proposta deste trabalho é entender e apresentar as definições técnicas, físicas e lógicas; os comportamentos técnicos e físicos; a interoperabilidade e convergência da tecnologia; casos de sucesso e provas de conceito de utilização e implementação; empresas e corporações que investiram e investem neste padrão; e, a aplicabilidade desta tecnologia e infra-estrutura em ambientes da iniciativa privada e governamental. Em especial, o funcionamento das funções de gerenciamento de tráfego, que visam oferecer parâmetros de QoS (*Quality of Service*) atrativos, estão qualitativamente analisados e comentados de forma organizada e encadeada neste trabalho.

Apresentadas as principais características e, elencados os principais processos, viu-se a necessidade de simular e analisar o funcionamento do processo de entrada na rede, chamado de *network entry*, especificamente o procedimento de *ranging* inicial. Assim, fora implementado e simulado tal processo, que tem seus resultados apresentados e discutidos no capítulo 4.

1.5 Organização da Dissertação

A dissertação está organizada em **cinco capítulos**. O **primeiro capítulo** apresentou um histórico técnico dos padrões de comunicação *wireless,* um sucinto relato dos problemas existentes em comunicações sem fio, um breve histórico sobre o padrão IEEE 802.16 e os motivadores deste trabalho. O **segundo capítulo** apresenta um resumo do padrão IEEE 802.16, detalhando os padrões existentes, topologias, freqüências, esquemas de multiplexação, modulações, técnicas de múltiplo acesso, *duplexing*, sistemas de antenas, o modelo de referência

de protocolos. Apresenta também, sob a égide da norma [17], os procedimentos de gerenciamento de conexões e admissão, inicialização de estações, gerenciamento de banda, empacotamento e fragmentação, QoS, segurança e aspectos mercadológicos. O **terceiro capítulo** apresenta a proposta de um modelo geral de simulação da tecnologia. Aqui é apresentada uma discussão sobre os trabalhos já realizados, e mostra a arquitetura proposta para a implementação do modelo. Ainda no terceiro capítulo é apresentado os objetos necessários para a implementação do modelo específico, voltado à inicialização e sincronização da estação na rede. O **quarto capítulo** apresenta a implementação e os resultados obtidos utilizando o modelo específico. O **quinto e último capítulo** apresenta algumas considerações finais, norteadas pelos estudos realizados e pelo trabalho de simulação desenvolvido e sugere futuros trabalhos neste baseado.

2. WIMAX

2.1 Descrição Geral

A necessidade crescente de estar e ser localizado em qualquer lugar do planeta, faz das tecnologias de conectividade sem fio, *wireless*, a tecnologia que mais agregou serviços e funcionalidades em dispositivos cada vez mais compactos e convergentes. As redes *wireless* estão divididas em padrões, freqüências, e outras características que as definem singularmente.

2.1.1 Padrões

O padrão IEEE 802.16 fora desenhado para prover o acesso à última milha para redes sem fio metropolitanas. Uma divisão simples no padrão definiu o uso de dois espaços de freqüências ligadas, diretamente, ao modo que as antenas estão dispostas. Conexões LOS e NLOS, entre 10 e 66GHz, e 2 e 11GHz, respectivamente, definiram as características técnica de cada sub-padrão.

O padrão IEEE 802.16 recebeu modificações e adaptações com a finalidade de melhorar o funcionamento e atender as expectativas criadas para cada modo de propagação e de acesso, seja ele por conexões fixas ou móveis.

Publicado em Abril de 2002, o IEEE 802.16 objetivava o acesso entre 10 e 66GHz, com processamento de até 34Mbps sobre antenas em LOS. Em abril de 2003 fora publicado o IEEE 802.16a, que através de uma emenda no padrão anterior, tinha a finalidade de expandir a extensão em bandas licenciadas e não licenciadas, podendo chegar até 75Mbps em conexões NLOS. Em Janeiro de 2003 outra proposta fora publicada, 802.16c que nasce com a finalidade de auxiliar a interoperabilidade em freqüências de 10 a 66GHz. Em Junho de 2004 fora publicado uma emenda ao subpadrão 802.16a, conhecido como 802.16-2004, também tem apelo a interoperabilidade. E para concluir as publicações, 802.16e fora publicado em Dezembro de 2005 com a finalidade de oferecer interoperabilidade a conexões 802.11, oferecendo suporte as conexões nomádicas.

2.1.2 Topologias

As redes sem fio oferecem facilidades de instalação e de configuração de topologias. Devido às técnicas e ao meio de propagação, as antenas são instaladas de diversos modos.

As conexões com visada, isto é, antenas direcionadas entre si, conhecidas como LOS, ou simplesmente, conexões com visada direta, são, normalmente, configuradas para a criação de enlaces de grande distância. As conexões sem visada são conhecidas como NLOS e, normalmente, são configuradas para a propagação omnidirecional, isto é, em todas as direções. Nesta topologia a cobertura do sinal é menor.

O padrão WiMAX preconiza as seguintes topologias: a PMP – Ponto-Multi-Ponto, *Mesh*, Ponto-a-ponto, Ponto-consecutivo-Ponto e *Backhaul* [44].

As BS (*Base Station*), ou ERB (Estação Rádio Base), gerenciam as conexões realizadas e requisitadas pelas SSs (*Subscriber Station*), ou estações de assinantes.

Na topologia PMP, as BSs são os pontos concentradores e gerenciam todas as requisições e transmissões das SSs. Todo o tráfego da rede na célula de cobertura desta BS é analisado e distribuído às SSs, de acordo com o contrato de serviço, oferecendo e melhorando, se necessário, as características do sinal, rotas e robustez da rede.

Na topologia *Mesh* as SSs também fazem o papel de roteadores, como as BSs, cooperando com outras SSs. Nesta topologia, todas as estações comunicam-se entre si, sendo viável apenas para conexões NLOS.

Usando uma distribuição planejada, todos os nós da rede, inclusive a BS, igualam suas características de transmissão para toda sua vizinhança. Asseguram assim que as transmissões não sofrerão colisões.

Usando uma programação centralizada, a BS reúne as requisições de recursos de todas as SSs dentro de uma cobertura de saltos e determina a quantidade de recursos de cada enlace na rede para *downlink* e *uplink*.

Todas as comunicações *Mesh* são estabilizadas entre dois nós e todos os PDUs (*Packet Data Unit*), i.e. (*Information Elements*), dados e mensagens de controle são enviados no domínio do tempo pelas SSs [50].

Dois equipamentos, com funções similares, são implementados na topologia *Mesh*, sendo o *switch mesh* e *router mesh*. No *switch mesh* as rotas são fixas. No *router mesh*, as SSs são inteligentes e negociam a melhor rota e condições para as transmissões, mantendo atualizadas todas as tabelas de roteamento.

A topologia *Mesh* conta com vantagens, que vão deste a capacidade de roteamento, larga cobertura e redundância, até a diminuição dos custos oriundos da infra-estrutura.

Nas topologias *Mesh* implementadas, invariavelmente existe a necessidade de conectar esta rede a um *backbone*, público ou privado. Neste ambiente chamaremos este *backbone* de *backhaul*, conforme mostrado na Figura 1.

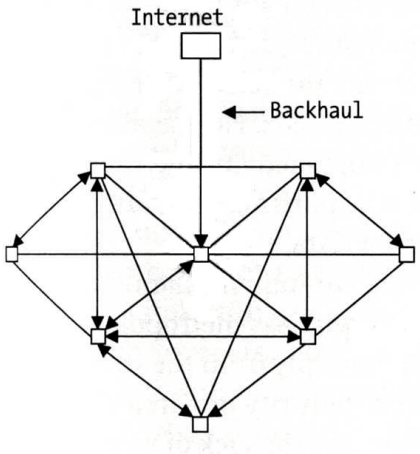


Figura 1: *Backhaul* [44].

A visada direta, LOS, entre duas antenas caracteriza a conexão ponto a ponto, instaladas geograficamente distantes. Este tipo de conexão é realizada apenas entre duas BSs.

Na Figura 2, estão exemplificadas as topologias possíveis e pode-se ter uma noção das soluções de interoperabilidade e dimensionamento de uma rede WiMAX.

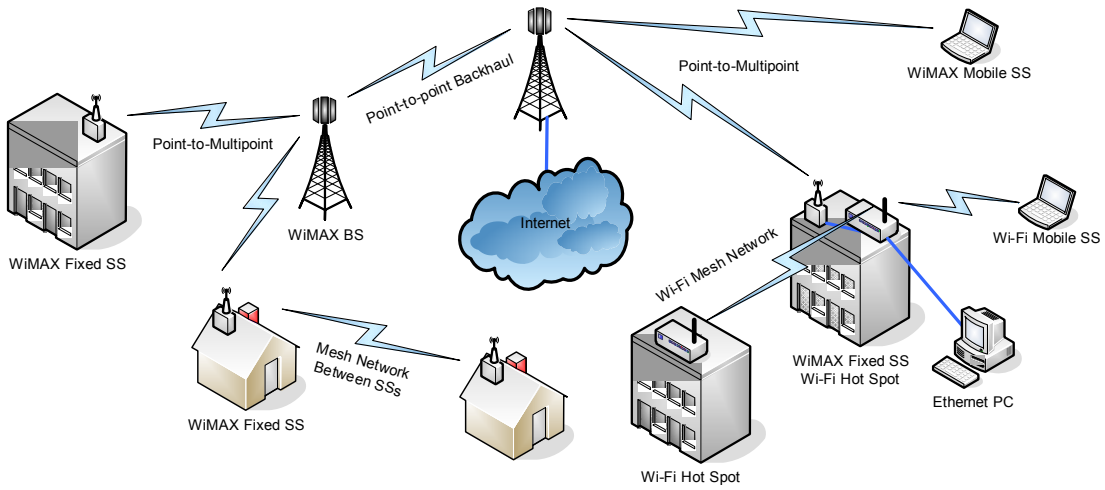


Figura 2: Gráfico de topologias [31].

A topologia ponto-consecutivo-ponto refere-se a anéis sem fio, ponto a ponto lógicos, como representado na Figura 3. Mesmo que raras, preconizam que o sinal não se propague para todas as antenas, evitando *loops* ou processamentos não necessários.

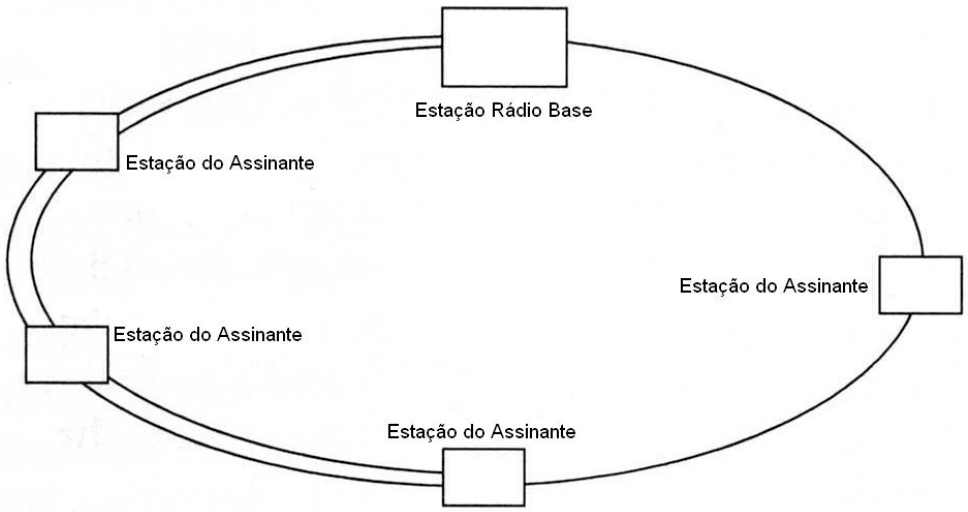


Figura 3: Topologia ponto-consecutivo-ponto [44].

As características da propagação e do ambiente onde viajam as ondas eletromagnéticas, registram alguns fenômenos que devem ser levados em consideração quando do projeto da rede. Absorção, reflexão e difração, são alguns fenômenos que têm ação direta sobre os enlaces,

robustez e vazão da rede, e devem ser levados em consideração quando do mapeamento e dimensionamento da rede. Vale salientar que na Seção 1.2 deste trabalho são citadas as problemáticas existentes em comunicações *wireless*.

De grande relevância para a análise do desempenho de um enlace nas proximidades da superfície da Terra [39], a Zona de Fresnel ou elipsóide de Fresnel, se faz necessária para o cálculo e representação dos focos entre as antenas transmissoras e receptoras. É possível definir uma linha imaginária para a linha de visada de um enlace LOS.

2.1.3 Freqüências

As redes sem fio comunicam-se através de freqüências pré-definidas. A comunicação entre dois pontos e a efetivação de um enlace é gerida segundo as leis e normas de telecomunicações, sendo divididas em não licenciadas e licenciadas.

Freqüências não licenciadas não recebem nenhuma sanção governamental ou regulatória, sendo utilizadas indiscriminadamente. As freqüências licenciadas são geridas e reguladas pelo governo, que administram sua utilização e exploração comercial.

As redes portáteis operam sob freqüência de 2 a 11GHz, acontecendo em freqüências licenciadas de 2,5GHz e 3,5GHz e em freqüências não licenciadas de 5,8 GHz. Estas redes são caracterizadas pelo acesso de última milha, termo criado para referenciar o usuário final da rede. Nesta arquitetura o sinal é propagado omnidirecionalmente em células de até 8 quilômetros, não necessitando de visada entre os dispositivos para o acesso.

As redes fixas operam sob freqüências de 10 a 66GHz. Nesta arquitetura as conexões necessitam de visada, onde as antenas são direcionadas entre si, alcançando até 50 quilômetros.

A disponibilidade de espectro de freqüência é a chave para prover serviços banda larga *wireless* e para o desenvolvimento WiMAX, onde diversas bandas podem ser utilizadas. Cada banda apresenta características únicas que impactam, significativamente, sobre o desempenho dos sistemas, limitando a taxa de dados e a cobertura do sinal. A Tabela 1 compara WiMAX com outras tecnologias sem banda larga [09]:

Tabela 1: Comparação WiMAX com outras tecnologias *Broadband Wireless* [09].

Parâmetros	WiMAX Fixo	WiMAX Móvel	HSPA	1x EV-DO Ver A	Wi-Fi
Padrão	IEEE 802.16-2004	IEEE 802.16e-2005	3GPP *Release* 6	3GPP2	IEEE 802.11a/g/n
Taxa de Pico de dados no *downlink*	9,4Mbps em 3,5MHz usando relação 3:1 DL para UL TDD; 6,1Mbps com 1:1	46Mbps usando relação 3:1 DL para UL TDD; 32Mbps com 1:1	14,4Mbps usando todos os 15 códigos; 7.2Mbps com 10 códigos;	3,1Mbps; Rev. B suportará 4,9Mbps.	54Mbps compartilhado usando 802.11a/g; mais que 100Mbps (pico) usando 802.11n
Taxa de Pico dados no *uplink*	3,3Mbps em 3,5MHz usando relação 3:1 DL para UL; 6,5Mbps com 1:1	7Mbps em 10MHz usando relação 3:1 DL para UL; 4Mbps com 1:1	1,4Mbps inicialmente; 5,8Mbps posteriormente	1,8Mbps	
Banda	3,5MHz e 7MHz em banda de 3,5GHz; 10 MHz em banda de 5,8GHz	3,5MHz, 7MHz, 5MHz, 10MHz e 8,75MHz inicialmente	5MHz	1,25MHz	20MHz para 802.11a/g; 20/40MHz para 802.11n
Modulações	QPSK, 16 QAM, 64 QAM	QPSK, 16 QAM, 64 QAM	QPSK, 16QAM	QPSK, 8 PSK, 16 QAM	BPSK, QPSK, 16 QAM, 64 QAM
Multiplexação	TDM/OFDMA	TDM/OFDMA	TDM/CDMA	TDM/CDMA	CSMA
Duplexação	TDD, FDD	TDD inicialmente	FDD	FDD	TDD
Freqüência	3,5GHz e 5,8GHz inicialmente	2,3GHz, 2,5GHz e 3,5GHz inicialmente	800/900/1,800/ 1,900/2,100MHz	800/900/1,800/ 1,900MHz	2,4GHz, 5GHz
Cobertura	4 a 8 Km	< 3 Km	1,6 a 4,8 Km	1,6 a 4,8 Km	< 30 m *indoor*; < 300 m *outdoor*
Mobilidade	Não se aplica	Média	Alta	Alta	Baixa

O WiMAX Fórum® tem identificado as bandas 2,3GHz, 2,5GHz, 3,5GHz e 5,7GHz para as primeiras certificações de interoperabilidade. As bandas entre 2,5GHz e 2,7GHz licenciadas tem sido alocadas nos Estados Unidos, Canadá, México, Brasil e alguns países asiáticos. Em muitos países, estas bandas são restritas para aplicações fixas. A banda 2,3GHz Licenciada, também disponível em diversos países, é utilizada pelos serviços WiBRO, desenvolvido pela Korea do Sul para serviços móveis. A banda 3,5GHz Licenciada foi a primeira banda alocada para serviços *broadband wireless* fixo. Em diversos países as regras destas bandas não são permitidas para aplicações nomádicas e móveis. A banda de 5GHz não licenciada - freqüências não licenciadas de banda de 5,25 a 5,85GHz - são de interesse para o WiMAX. Livre para uso

irrestrito, esta banda pode ser a base de desenvolvimento WiMAX, particularmente em locais subdesenvolvidos, com baixa densidade populacional e mercados remotos [09]. A freqüência relativamente alta, unida com potenciais restrições nesta banda, cria uma dificuldade de prover serviços móveis e nomádicos. Igualar aplicações fixas requer, em muitos casos, a instalação de antenas externas para os assinantes.

2.1.4 Multiplexação

Redes sem fio de banda larga requerem o uso de sofisticados esquemas de modulação, com melhor eficiência espectral e de multiplexação. O OFDM é uma tecnologia de multiplexação por divisão em freqüências ortogonais, onde durante um certo intervalo de tempo (tempo de símbolo) as portadoras cossenoidais e senoidais são moduladas em amplitude. A Figura 4 ilustra a idéia básica por de trás desta técnica de multiplexação. O interessante é que a amplitude destas ondas pode ser modulada em diferentes escalas, tais como QPSK (*Quaternary Phase Shift Keying*), QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*) e BPSK (*Binary Phase Shifiting Keying*) [08].

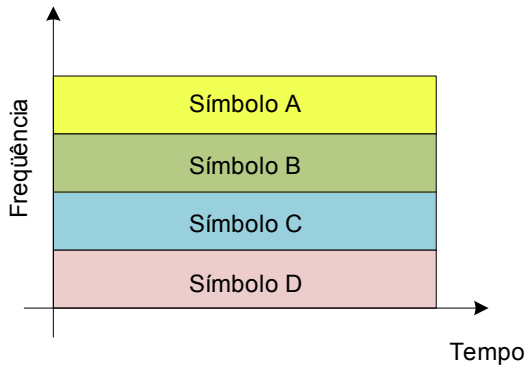


Figura 4: Disposição dos símbolos OFDM no domínio do tempo.

Patenteado em 1970 pela Bells Lab, OFDM é baseado num processo matemático chamado FFT (*Fast Forrier Transform*), que provê canais robustos necessários para suportar alta eficiência espectral e canais de boa vazão, características estas que suportam aplicações banda larga com

capacidade, cobertura e QoS, transmitindo múltiplas freqüências e múltiplos sinais em paralelo [19].

A necessidade de oferecer serviços com banda larga confiáveis, em conexões NLOS, fez com que a indústria adotasse o OFDM como padrão de multiplexação, pois o OFDM é capaz de suportar com robustez sinais propagados com múltiplos percursos [19]. Um símbolo OFDM pode ser definido como a menor porção de dados que pode ser transmitida durante um certo intervalo de tempo. Símbolos OFDM são transmitidos em múltiplas bandas no domínio da freqüência, utilizando-se de subportadoras ortogonais entre si. A Figura 4 ilustra o formato de um símbolo OFDM.

O padrão 802.16-2004 especifica 256 subportadoras e o padrão 802.16e-2005 especifica de 512 a 2048 subportadoras [08]. Portanto, com OFDM a combinação de múltiplas subportadoras ortogonais transmitindo em paralelo com símbolos de longa duração, assegura que além de uma grande vazão, a transmissão fique imune aos limites de propagação impostos pelos ambientes NLOS e a interferência produzida por múltiplos percursos.

Em sistemas OFDM a entrada de fluxo de dados é dividida em diversos subfluxos paralelos de taxa de dados reduzida, aumentando a duração de símbolo, e cada subfluxo é modulado e transmitido em subportadoras ortogonais separadas.

A Tabela 2 nos dá uma noção do atraso de propagação em tipos diferentes de ambiente:

Tabela 2: Atraso de propagação em diferentes ambientes [50].

Tipo de ambiente	Máximo atraso de propagação em μs
Dentro de escritórios	< 0,1
Dentro de fábricas	< 0,2
Áreas abertas	< 0,2
Áreas suburbanas (LOS)	0,2 – 1,0
Áreas suburbanas (NLOS)	0,4 – 2,0
Áreas urbanas	1,0 – 3,0

Além disso, a introdução de um prefixo cíclico pode eliminar completamente a interferência entre símbolos. Este prefixo é tipicamente a repetição da última amostra da porção

de dados do bloco que é adicionado no início do *payload* de dados. O prefixo evita a interferência entre os blocos. Uma desvantagem do prefixo é a introdução de *overhead* [50].

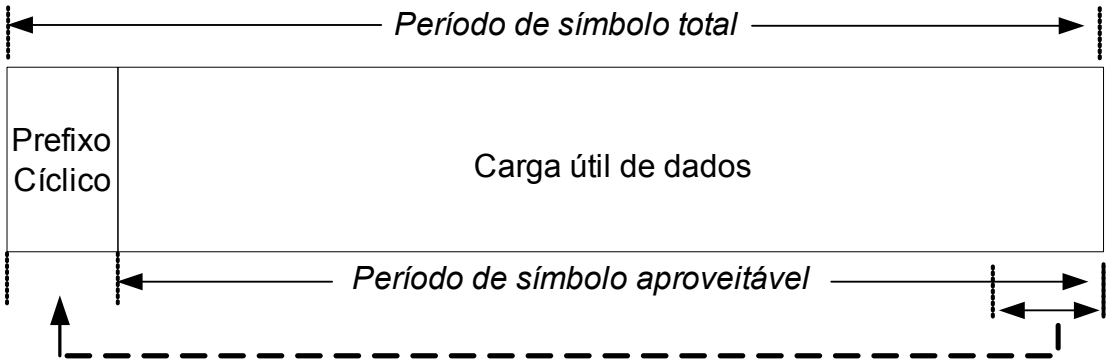


Figura 5: Símbolo OFDM.

A modulação OFDM pode ser realizada com IFFT (*Inverse Fast Fourier Transform*), a qual habilita um grande número de subportadoras (acima de 2048). Em um sistema OFDM os recursos são disponíveis no domínio do tempo na forma de símbolos OFDM e no domínio da freqüência na forma de subportadoras.

2.1.5 Modulações

As modulações QPSK, QAM e BPSK [50] podem ser utilizadas para codificar *bits* e gerar símbolos OFDM. São elas que produzem as amplitudes das cossenóides e senóides multiplexadas no OFDM.

Para entender melhor o que é e como funciona um sistema de modulação, definimos a taxa de *bauds*, que é o número de amostras por segundo realizadas pelo dispositivo. Cada amostra envia um fragmento de informações, ou seja, símbolos. Assim, técnicas de modulação determinam o número de *bits* por símbolo. Exemplificando, QAM 16 conta com 4 *bits* por símbolo. QAM 64, 64 combinações, com 16 *bits* por símbolo. Assim, com 16 *bits* de dados por símbolo e 2.400 *bauds*, atingimos 38.400 Kbps. [45]

Na Figura 6, temos um gráfico exemplificando os símbolos da constelação da modulação m-QAM:

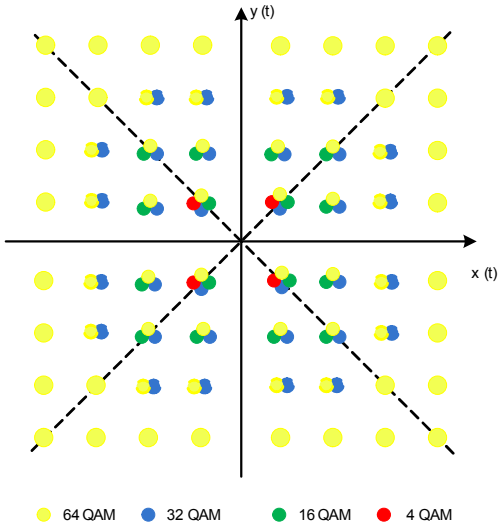


Figura 6: Exemplos de Constelação da modulação m-QAM.

A eficiência de modulação pode ser melhorada, de uma definição 4 QPSK para 64 QAM, entretanto, tal modificação pode afetar a cobertura do sinal. Quando é selecionado um dos padrões QAM, a utilização de banda é melhorada, diminuindo os ruídos inerentes deste tipo de conexão, e negativamente, diminuindo a cobertura. Isso acontece devido ao aumento do número de *bits* por símbolo. Apesar de maior popularidade, o QPSK tem sua eficiência contestada quando comparada aos esquemas QAM. A modulação 64 QAM provê maior densidade de informações, enquanto 16 QAM provê maior robustez.

Na Tabela 3 podemos avaliar os resultados obtidos por [15] em relação a vazão de cada esquema de modulação:

Tabela 3: Vazão nos esquemas de modulação [15].

Modulação	Taxa de código	Vazão (Mbps)
BPSK	½	6,91
QPSK	½	13,82
	¾	20,74
16 QAM	½	27,65
	¾	41,47
64 QAM	⅔	55,30
	¾	62,21

É preconizado no padrão IEEE 802.16, que a BS e a SS tem a capacidade de modificar, ou requisitar, a modificação do sistema de modulação, com a finalidade de melhorar a eficiência do enlace, de acordo com o SLA (*Service Level Agreement*) definido e as características do ambiente de propagação. O SLA, ou acordo de nível de serviço, prevê o nível de qualidade de serviço prestado e a prioridade de atendimento ao cliente nas operadoras de telecomunicações. Através do SLA é possível acompanhar e monitorar os resultados dos serviços prestados.

Como exemplificado em [19], com 256 subportadoras OFDM, temos 192 subportadoras de dados, 8 subportadoras guias e 56 de guarda. Com o intuito de aumentar a vazão de dados, cada fluxo é mapeado individualmente nas subportadoras de dados e modulados usando QPSK ou QAM, onde símbolos podem acontecer no domínio do tempo e da freqüência.

2.1.6 Múltiplo Acesso

As técnicas de múltiplo acesso tentam prover canais de comunicação que não interfiram em outras comunicações ativas. As técnicas mais comuns dividem as dimensões disponíveis entre múltiplos usuários através do uso da freqüência, do tempo ou código. Em FDMA (*Frequency Division Multiple Access*), cada usuário recebe uma portadora única de freqüência. Em TDMA (*Time Division Multiple Access*), cada usuário utiliza *slots* de tempo pré-definidos. Sistemas

CDMA (*Code Division Multiple Access*) permitem que cada usuário compartilhe banda e espaços de tempo com vários outros usuários, pois, utiliza códigos binários ortogonais para a separação e identificação dos usuários. A ortogonalidade não é garantida em sistemas *wireless* densos, desta forma, a técnica garante ortogonalidade somente entre usuários na mesma célula [09]. É o chamado reuso de código.

O FDMA pode ser implementado em sistemas OFDM, atribuindo a cada usuário um conjunto de subportadoras. Esta alocação pode ser realizada de várias formas como a alocação estática ou dinâmica de subportadoras para cada usuário. A metodologia estática TDMA é apropriada para taxa de dados constante, entretanto, WiMAX utiliza algoritmos mais sofisticados de escalonamento baseados em tamanho de filas, condições de canais e atraso para conseguir melhor desempenho que o TDMA estático. Em resumo, cada usuário espera sua vez para transmitir.

Uma alternativa é considerar uma técnica para acesso aleatório. CSMA (*Carrier Sense Multiple Access*) é comumente utilizado em sistemas de comunicação baseado em pacotes, como LANs 802.11.

Em acessos aleatórios os usuários competem por canais antes que existam alocação de recursos de tempo, freqüência ou códigos. É notório que técnicas de acessos aleatórios incluem *ALOHA* e *slotted ALOHA*, bem como CSMA. Em *ALOHA* os usuários simplesmente transmitem pacotes sem considerar outros usuários, tornando este esquema ineficiente e com alto índice de colisões. *Slotted ALOHA* é mais sofisticado, pois os usuários transmitem em limites de tempo pré-definidos diminuindo as colisões. CSMA é superior, em comparação ao *ALOHA* e *Slotted ALOHA*, devido a sua detecção de portadoras. Os dispositivos escutam o canal antes de transmitir, de forma que não causam e evitam colisões. Teoricamente, a eficiência do CSMA está em torno de 60 ou 70% em redes sem fio LAN, valores toleráveis, uma vez que o enlace é compartilhado [09]. A necessidade elevada de eficiência espectral em WiMAX, impossibilita o uso de CSMA.

OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*) é uma tecnologia multiportadora que amplia o OFDM para uso como uma tecnologia de múltiplo acesso. É praticamente uma técnica hibrida de FDMA e TDMA, onde são atribuídos subportadoras

(FDMA) em diferentes espaços de tempo (TDMA) [09]. Para cada grupo de subportadora é atribuído um subcanal, e para cada estação de usuário é designado um ou mais subcanais para transmissão. Desta forma, são oferecidos benefícios para aumentar a flexibilidade, para aproveitar a vazão e a robustez da rede [08].

OFDMA é uma técnica flexível de múltiplo acesso que pode acomodar diversos usuários com larga variedade de aplicações, taxa de dados e exigências de QoS. Com a designação de subcanais para especificar cada estação, a transmissão de diversas estações pode ocorrer simultaneamente sem interferência.

O padrão 802.16e-2005 foi desenvolvido para abrigar aplicações móveis, e adota OFDMA para prover flexibilidade a estes usuários em ambientes NLOS.

2.1.7 Duplexing

Equipamentos WiMAX licenciados, para funcionamento em bandas de freqüências não licenciadas, utilizam *time-division duplexing* (TDD) para esta ação, isto é, as rajadas são transmitidas em intervalos de tempo diferentes e na mesma freqüência. Rajadas são agrupamentos de símbolos OFDM propagados no espaço livre. No decorrer do trabalho, rajada também será chamada de *burst*. Os equipamentos WiMAX licenciados para funcionamento em bandas de freqüências licenciadas, realizam a multiplexação utilizando *time-division duplexing* (TDD) ou *frequency-division duplexing* (FDD), onde as rajadas são enviadas em freqüências diferenciadas.

2.1.8 Sistema de Antenas

Um sistema de antenas tem como principal intenção prover sinais confiáveis e resistentes a interferências nas redes de acesso sem fio. Nestes ambientes, onde o número de usuários é elevado e a limitação de espectro são notórios, o reuso de freqüências é um constante desafio.

O padrão WiMAX suporta diversos modelos no processo de instalação de antenas, incluindo o MIMO (*Multiple-Input Multiple-Output*) e o AAS (*Advanced Antenna System*).

MIMO é um sistema que utiliza mais de um rádio para realizar o envio e a recepção das conexões sem fio. MIMO habilita fluxos de dados paralelos para aumentar a vazão, onde pode ser exemplificado com um 2 x 2 MIMO [08]. Neste caso, são utilizados dois elementos de recepção e dois elementos de envio.

Num sistema ponto-multiponto empregando MIMO, cada BS transmite um diferente fluxo de dados e cada SS recebe vários componentes do sinal transmitido. Com o uso de algoritmos apropriados, as SSs são capazes de separar e decodificar os fluxos de dados recebidos simultaneamente.

AAS refere-se a técnicas conhecidas como *Space-Time Coding* (STC) e *Beam-Forming*. STC é uma família de técnicas que implementa transmissões diversificadas, visando aumentar a qualidade do sinal e localizar, onde estiver, dentro da cobertura da antena, uma SS. STC é uma técnica robusta, apesar de prover baixo ganho de sinal. Uma técnica STC, conhecida e incorporada ao padrão é a Alamouti Code [08], publicada em 1998.

Beam-Forming transmite o sinal de diversas antenas, provendo uma substancial melhora nas direções de *downlink* e *uplink*, aumentando o ganho efetivo da antena e reduzindo o enfraquecimento do sinal resultante das interferências.

Para aumentar a cobertura e realizar o reuso de freqüências enquanto atenuam as interferências, sistemas sem fio cobrem uma área de serviço com múltiplas células, no qual são divididas em múltiplos setores.

Algumas SSs podem ser alocadas no limite entre as células ou setores e, potencialmente, podem receber sinais de diversas fontes, criando assim interferências. Para cada setor é tipicamente designado um canal de freqüência. Em concordância, cada canal é reusado com uma separação espacial com a condição de maximizar o uso do espectro enquanto minimiza a própria interferência dos mesmos canais sendo utilizados em qualquer parte da rede.

Assim, a organização e o reuso de freqüência têm a finalidade de aumentar a cobertura e minimizar as interferências criadas entre as células da rede.

2.1.9 Modelo de Referência de Protocolos

O modelo de referência IEEE 802.16 é composto por duas camadas, PHY e MAC como pode ser visualizado na Figura 7:

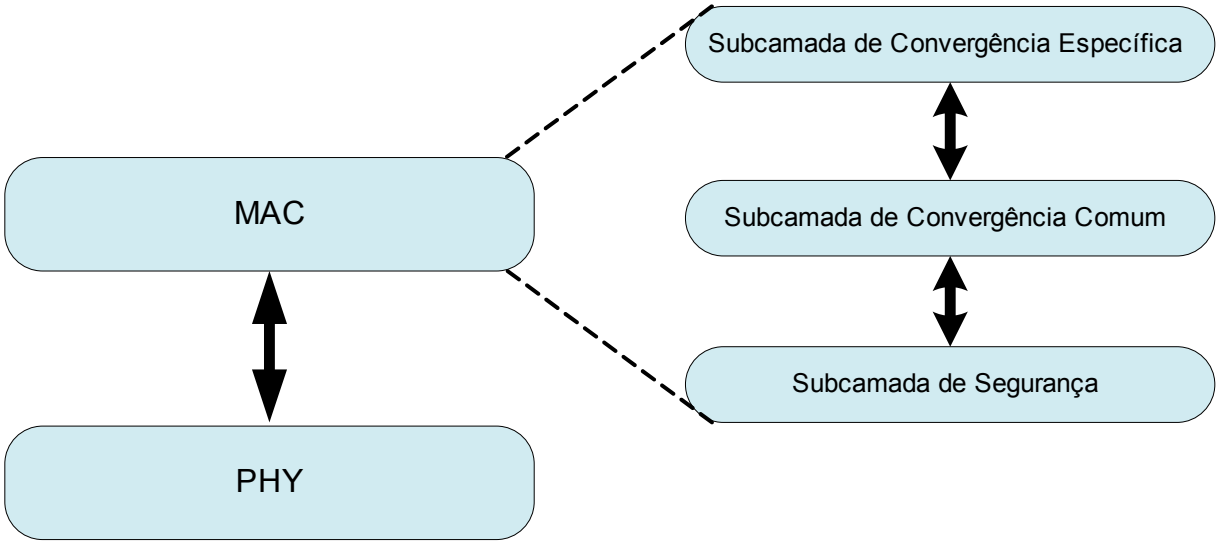


Figura 7: Modelo de Referência de protocolos WiMAX.

. Este modelo integrado tem a finalidade de garantir a comunicação entre dispositivos, processando fases específicas e delimitadas. No decorrer desta subseção serão discutidas as funcionalidades, responsabilidades e ações de cada uma delas. Vale salientar que o principal objetivo deste trabalho é uma discussão em torno da camada MAC.

2.1.9.1 PHY

A Camada PHY é responsável pela modulação, codificação, definição do espectro, correção de erros, definição das técnicas de multiplexação e a transmissão dos MAC PDUs.

A IEEE 802.16 PHY suporta taxa de dados superiores a 134Mbps sobre canais de 28MHz e são definidas variantes FDD e TDD [37]. Suporta também diversos tipos de modulação. No *uplink* suporta, obrigatoriamente, QPSK, enquanto 16-QAM e 64-QAM são opcionais. No

downlink suportam QPSK e 16-QAM, enquanto 64-QAM é opcional. Esta variedade de esquemas de modulação oferece eficiência e robustez.

Na camada PHY diversas técnicas de correção e recuperação de erro são utilizadas, pois, neste tipo comunicação é comum a presença de erros e inconsistências, conforme [9]. Estes erros, comuns em comunicações sem fio, como discutido na Seção 1.2, aumentam a lentidão na rede. Contudo, são utilizados algoritmos de controle, que tentam mitigar os erros oriundos desta comunicação.

Através do ARQ (*Automatic Repeat ReQuest*), FEC (*Forward Error Correction*) ou de protocolos híbridos que combinam os dois citados anteriormente, a eficiência do enlace é melhorada, pois, algoritmos de correção de erro de bit e de controle de recebimento tentam minimizar tais problemas.

No ARQ são utilizados 3 protocolos, basicamente. São eles o *Stop-and-Wait*, o *Go-Back-N* e o *Selective Repeat*. No primeiro o transmissor apenas envia um bloco quando recebe um aviso positivo da recepção do antecessor. No segundo, são enviados sucessivamente os blocos, e, quando do recebimento de algum bloco problemático, o transmissor é avisado e todos os blocos a partir deste são reenviados. E por fim, o terceiro envia sucessivamente seus blocos e apenas reenvia os blocos que apresentaram erros. Tanto o protocolo *Go-Back-N*, quanto o protocolo *Selective-Repeat* utilizam janelas deslizantes.

A FEC preocupa-se com a correção de erros. Nesta técnica, o transmissor adiciona à mensagem *bits* de paridade e o receptor verifica a existência de erros, que se detectados, podem ser corrigidos até certo ponto. Caso eles sejam corrigidos, os dados são enviados as camadas superiores.

Como citado anteriormente, pode-se utilizar protocolos híbridos, que contemplam ARQ-FEC no mesmo processo de envio, recepção e correção de erros.

Na combinação de modulações PHY, com os esquemas FEC usados entre a BS e a SS, são identificados os perfis de *uplink* e *downlink*, dependendo da direção das mesmas. Estes perfis são identificados nos DIUC (*Downlink Interval Usage Code*) e UIUC (*Uplink Interval Usage*

Code). Todas as SSs requerem uma determinada característica de qualidade do sinal durante a inicialização e requisitam a BS um DIUC particular. Continuamente, a SS requer o monitoramento da qualidade de transmissão e o controle do perfil de *downlink* e *uplink*. O RLC (*Radio Link Control*) é um processo contínuo que tem a finalidade de otimizar a capacidade da camada PHY, bem como o controle de potência.

A camada PHY também utiliza o ABP (*Adaptive Burst Profiles*). Este verifica as condições características do ambiente onde é propagado o sinal e modifica, se houver a necessidade, os perfis de modulação rajada a rajada. O uso do ABP tenta garantir um perfil adequado para cada momento da propagação.

As interfaces aéreas suportadas influenciam as características da camada PHY [31]:

- *WirelessMAN-SCa PHY*:

Baseada em transmissões de portadora simples. É projetada para topologias NLOS e para operações abaixo de 11 GHz. Suporta ABP e FEC no *uplink* e *downlink* e acrescenta melhorias na estrutura dos quadros visando contornar as condições do meio de transmissão NLOS.

- *WirelessMAN-SC PHY*:

Definida para operar na faixa de 10 a 66GHz, suporta FDD e TDD e utilização do ABP para ajustar os parâmetros de transmissão individualmente. No FDD suporta *full-duplex* e *half-duplex*, por utilizar freqüências distintas. No TDD utiliza de quadros de tamanho fixo, ajustando para *downlink* e *uplink*.

- *WirelessMAN-OFDM PHY*:

Visa operar em sistemas NLOS e com freqüências abaixo de 11GHz, suporta a utilização do FEC e ABP. Conta com 256 portadoras, onde destas utilizam-se apenas de 200 para tráfego de dados e as demais são utilizadas como guarda e gerência. Utiliza-se de um preâmbulo para sincronização e, após ele, existe o campo FCH (*Frame Control Header*), que tem a função de mapeamento das conexões.

- *WirelessMAN-OFDMA PHY*:

Visa operar em sistemas ponto-multiponto NLOS e com freqüências entre 2 e 11GHz. Este camada PHY é destinada para topologias que suportem dispositivos móveis e portáteis. No IEEE 802.16e-2005 esta camada foi modificada para SOFDMA (*Scalable* OFDMA), com portadoras variáveis, com os valores de 128, 256, 1024 e 2048 [09].

- *WirelessMAN-HUMAN PHY*:

A estrutura HUMAN (*High-Speed Unlicensed Metropolitan Area Networks*) opera com freqüências não licenciadas entre 5 e 6 GHz e visa a conexão com ambientes Wi-Fi e caracteriza-se pelo espaçamento de 5MHz entre os canais.

2.1.9.1.1 WirelessMAN-OFDM PHY

Como citado anteriormente, esta é a modalidade de interface aérea utilizada neste trabalho. Vale lembrar que das 256 subportadoras, 192 são utilizadas para o tráfego de dados, 8 são utilizadas para sincronização e o resto é utilizado para banda de guarda. Quando são utilizadas grandes larguras de banda, o espaço entre as subportadoras aumenta e o tempo de símbolo diminui. A diminuição do tempo de símbolo, implica na necessidade do aumento do tempo de guarda para melhorar o desempenho com relação ao atraso de propagação.

Existe a necessidade de realizar uma análise entre a eficiência espectral e a robustez do atraso de propagação [09]. Esta referência de tempo de guarda pode ser acomodada em atrasos de propagação de até 16μs quando operados em canais de 2,5MHz e até 8μs quando operados em canais de 7MHz.

Na Tabela 4 abaixo estão indicados os parâmetros OFDM e OFDMA utilizados para WiMAX:

Tabela 4: Parâmetros OFDM/OFDMA usados em WiMAX [09].

Parâmetros	OFDM-PHY (Fixo)	OFDMA-PHY (Móvel)			
Tamanho FFT	256	128	512	1024	2048
Número de sub-portadoras de dados usados	192	72	360	720	1440
Número de sub-portadoras de sincronização	8	12	60	120	240
Número de sub-portadoras de guarda	56	44	92	184	368
Prefixo Cíclico ou tempo de guarda	1/32, 1/16, 1/8, 1/4				
Taxa de sobreamostragem	Depende da banda: 7/6 para 256 OFDM, 8/7 para múltiplos de 1.75MHz, e 28/25 para múltiplos de 1.25MHz, 1.5MHz, 2MHz, ou 2.75MHz				
Canal de Banda (MHz)	3.5	1.25	5	10	20
Espaçamento de freqüência de sub-portadoras	15625	10,94			
Tempo de símbolo útil (µs)	64	91,4			
Tempo de guarda assumido 12.5% (µs)	8	11,4			
Duração do símbolo OFDM (µs)	72	102,9			
Número de símbolos OFDM em quadros de 5ms	69	48,0			

2.1.9.2 MAC

A camada MAC tem a finalidade de prover a inteligência para a camada PHY, assegurando que os níveis de serviços acordados sejam cumpridos, configurando os parâmetros de QoS. Estas funcionalidades não são encontradas em outros padrões de redes sem fio e foram desenhadas para aplicações banda larga sem fio ponto multiponto.

A camada MAC tem a responsabilidade de adaptar o tráfego de outras tecnologias para a rede WiMAX, adaptar a transmissão em função do meio, multiplexar os fluxos de tráfego, escalonar e alocar dinamicamente recursos para os fluxos e oferecer suporte a segurança de comunicação.

Dividida em 3 subcamadas, a Subcamada de Convergência Específica, a Subcamada de Convergência Comum e a Subcamada de Segurança, dentre outras funcionalidades, são responsáveis por transportar os protocolos IP, PPP, Ethernet; oferecer suporte à camada física; inicializa as estações, oferecer suporte à qualidade de serviço, segurança e integridade dos fluxos.

Subcamada de Convergência Específica:

Esta subcamada é responsável por realizar a convergência de outras tecnologias para os padrões 802.16. Como exemplo, a ATM CS é responsável por associar diferentes serviços ATM e suportar as convergências geradas em redes ATM aos PDUs WiMAX. A *Packet CS* utiliza PDUs WiMAX para transportar outros protocolos, como IP, PPP e Ethernet. O encapsulamento de outras tecnologias aos padrões 802.16 é sua principal função.

O serviço da subcamada de convergência específica prove algumas transformações ou mapeamentos de dados de redes externas. Isto inclui classificação dos SDUs de redes externas e associação com o próprio fluxo de serviço identificado pelo CID. Um fluxo de serviço é um fluxo unidirecional de pacotes provido com parâmetros particulares de QoS [15].

Subcamada de Convergência Comum:

A Subcamada de Convergência Comum é responsável por alocar e escalonar dinamicamente os recursos de transmissão, estabelecer e realizar manutenção das conexões, construir o MAC PDU, e oferecer suporte ao ajuste adaptativo das técnicas de transmissão, iniciando e oferecendo suporte à qualidade de serviço das estações.

WiMAX é uma tecnologia orientada à conexão, cujas conexões são identificadas por 16 bits, chamados de CID (*Connection ID*), que identificam e determinam no máximo 64.000 conexões para cada canal *uplink* e *downlink*. Além dos CIDs, cada SS conta com um *MAC ADDRESS* de 48 *bits*, identificando o equipamento juntamente com o CID.

Estas conexões são organizadas e estabelecidas através de 3 conexões básicas, com a finalidade de garantir integridade e qualidade do enlace. Estas conexões podem ser iniciadas tanto pela BS quanto pela SS; entretanto, na maioria das conexões é a SS que inicia a requisição. Estas 3 conexões, entre a SS e a BS, refletem a existência de 3 níveis de QoS para gerenciamento de tráfego. Para cada fluxo de serviço é definido um SFID. SFID é um identificador de fluxo de serviços que define os parâmetros de QoS associado a cada conexão. Cada fluxo de serviço tem ao menos um SFID e uma direção associada. Cada SFID é identificado com 32 bits [17].

A 1ª conexão, chamada de conexão básica, é utilizada pela BS MAC e SS MAC para trocar mensagens urgentes e pequenas [17][31][12] . Estas mensagens são de alta prioridade e não toleram atrasos, pois é neste momento que são medidos a potência e o alcance do sinal, com a finalidade de produzir um perfil do enlace a ser estabelecido. Vale salientar que a comunicação é iniciada com baixa potência e é melhorada gradativamente, quando da necessidade. A SS envia suas características para a BS, que por sua vez, estabelece a conexão e define as características do sinal de acordo com o nível de serviço da estação e do tipo de serviço que irá trafegar. Ajustado o sincronismo através das informações trocadas, a BS estabelece a conexão com a SS.

A 2ª conexão, chamada de conexão primária, também serve para o envio de mensagens entre a SS e a BS. Esta conexão é realizada durante a inicialização da SS e usada para transportar mensagens de gerência da MAC tolerantes a atrasos. Como exemplo, podemos citar a mensagem enviada pela SS para a BS, quando do término de um *download* [17].

Por fim, a conexão secundária, que é opcionalmente gerada, troca mensagens com tolerância de *delay*, como DHCP, TFTP e SNMP, e pode ser estabelecida durante a inicialização da SS.

Quando estabelecida uma conexão, a SS recebe da BS um UL-MAP (*uplink MAP*), que traz as características do sinal e do ambiente, determinando a modulação que a SS deve utilizar e em que porção do tempo e da freqüência os dados serão recebidos e enviados. A BS também recebe da SS um DL-MAP (*downlink MAP*), que também contém as informações e detalhes das características do ambiente gerenciado pela BS.

Periodicamente, a BS monitora a qualidade do enlace estabelecido através do RLC. Este mecanismo verifica a necessidade de realizar alguma modificação nas configurações do enlace já estabelecido em função do tráfego e das características ambientais de propagação. A SS também pode requisitar um perfil mais robusto para sua comunicação, entretanto, é a BS que irá determinar a possibilidade de tal modificação. Este monitoramento da BS, através do RLC e, a possibilidade de pedido da SS, tem como principal finalidade garantir e qualidade do fluxo de dados.

Subcamada de Segurança:

A Subcamada de Segurança é responsável pela criptografia e autenticação das conexões, protegendo-as contra acessos não autorizados e inseguros. Esta utiliza-se de protocolos e algoritmos voltados para o gerenciamento de chaves, necessários para a autenticação na rede e segurança do tráfego.

Vale salientar que o IEEE 802.16 preconiza diretivas de segurança, característica esta não contemplada em outros padrões de redes *wireless*. Posteriormente, será detalhado o funcionamento desta subcamada onde a SS obtém a autorização e criptografia necessárias para a comunicação segura.

2.2 Entrada de Uma Estação de Assinante na Rede

2.2.1. Visão Geral

Quando da inicialização, um processo de sincronização e personalização de parâmetros de transmissão, com a finalidade de garantir robustez e qualidade no enlace, são executados juntamente com a BS. Quando da inicialização de um equipamento WiMAX, a MAC inicia o varredura de freqüências, procurando um canal operante para estabelecer uma conexão. Como este processo é realizado via *broadcast*, a SS pode atingir várias BS no seu raio de cobertura de sinal, pois as SSs são configuradas para escolher apenas uma BS para realizar a autenticação na rede. Após a decisão de qual canal, ou par de canais, atenderá a comunicação exigida, a SS estabelece sincronismo com a camada física e aguarda um preâmbulo para a comunicação iniciar. Periodicamente a SS envia, através de *broadcast*, pedido de informações sobre a modulação e o FEC utilizados pela BS, a fim de garantir qualidade do enlace e modificar suas características, caso necessário.

O processo de alinhamento dos dispositivos é realizado quando da inicialização da SS, e através do *ranging* inicial o perfil do enlace é negociado até a efetiva sincronização. Quando da perda de sincronização, o *ranging* inicial é executado novamente. Após o processo de sincronização, quando a SS já realiza a transmissão de dados, é executado um *ranging* periódico,

com a finalidade de garantir que a transmissão não perca suas características e conseqüentemente ofereça a qualidade necessária a conclusão do processo de transmissão. Este utiliza-se de rajadas cíclicas de verificação, enquanto o *ranging* inicial utiliza-se de intervalos de contenção, no qual longos preâmbulos são necessários.

A SS também registra-se através de um acesso aleatório de canais, e, se este for bem sucedido, o processo de *ranging* é realizado sob controle da BS. O processo de *ranging* é cíclico, onde os parâmetros de potência e tempo são usados para iniciar o processo, calcular e re-calcular os parâmetros de propagação, sucessivamente, até o aceite efetivo pela SS e pela BS. Estes parâmetros são monitorados, medidos e armazenados na BS, e transmitidos para a SS até a efetiva troca de dados. Durante a troca de dados, os parâmetros armazenados são atualizados de maneira a assegurar as mudanças futuras de perfil, de maneira a controlar as SS pontualmente [17] [09]. A seguir serão detalhados os procedimentos de entrada de uma SS na rede.

2.2.2 Inicialização e Entrada na Rede

Quando do processo de inicialização de um dispositivo ou equipamento numa célula WiMAX, o dispositivo realiza uma série de processos, dependentes, com a finalidade de estabelecer uma conexão segura e robusta para a comunicação. Estes processos são chamados de fases.

A primeira fase tem a finalidade de procurar o canal de *downlink* e obter sincronismo físico com a BS. A segunda obtém os parâmetros de transmissão através das mensagens UCD (*Uplink Channel Descriptor*). A terceira executa o *ranging*. A quarta negocia as capacidades básicas de transmissão. A quinta autoriza a SS e executa a troca de chaves com a BS. A sexta executa o registro da SS. A sétima estabelece a conectividade IP. A oitava estabelece/sincroniza a hora e dia. A nona transfere os parâmetros operacionais e, para finalizar, a décima fase libera a SS para o estabelecimento de conexões de dados. Vale salientar que a sétima, oitava e nona fase são opcionais.

Quando da inicialização, ou após a perda do sinal, a SS deve adquirir o canal de *downlink*, premissa deste processo de entrada e inicialização na rede.

A SS armazena seus parâmetros operacionais e, quando da necessidade de sincronização, resgata tais parâmetros para a viabilização do canal de *downlink*. Caso este armazenamento falhe de alguma forma, a SS inicia, continuamente, a procura de possíveis canais de *downlink* e realiza o armazenamento destes parâmetros para utilizações futuras.

Quando do término deste processo de sincronização física, a SS recebe pelo menos um DL-MAP. Continuamente a SS receberá DL-MAPs e mensagens DCD (*Downlink Channel Descriptor*) pelo canal sincronizado, com a finalidade de manter a conexão. Caso a SS pare de receber os mapas ou as mensagens citadas, a SS tenta restabelecer a sincronização através do processo já descrito.

Após a sincronização e a recepção dos mapas e mensagens DCD, a SS aguarda da BS por mensagens UCD. Estas mensagens contam com os parâmetros de transmissão dos canais de *uplink*. Estas mensagens são transmitidas periodicamente pela BS para todos os canais de *uplink* disponíveis.

Neste momento a SS verifica se os parâmetros recebidos pela mensagem UCD são adequados para o uso. Caso exista uma negativa, a SS irá procurar outro canal para o *downlink*. Caso positivo, a SS extrairá os parâmetros para o *uplink* e aguardará um novo DL-MAP para extrair o tempo de sincronização desta mensagem. Então a SS aguarda pelo UL-MAP para selecionar o canal e poder iniciar a transmissão *uplink*, de acordo com a MAC e o mecanismo de alocação de banda.

A sincronização da comunicação é garantida através da troca dos UL-MAPs e das mensagens UCD, pois quando existe a troca com sucesso existe sincronização [17] [09].

2.2.3 *Ranging* Inicial

Neste momento é iniciado o *ranging* inicial. *Ranging* é o processo de adquirir o momento correto, equivalente a cada SS, para a transmissão, e ajustar a potência alinhada a BS para receber os *frames* OFDM, mantendo a qualidade de comunicação entre eles. *Frames* OFDM são os quadros de camada física que multiplexam um ou mais MAC-PDUs, conforme descrito nas Subseções 2.1.4 e 2.1.5, respectivamente.

Após a SS realizar a sincronização de *downlink* e aprender as características de *uplink* através das mensagens UCD, ela recebe UL-MAPs e encontra os intervalos para realizar o *ranging* inicial. A BS aloca uma ou mais oportunidades de transmissão.

Para interfaces aéreas OFDM, quando ocorre a oportunidade de transmissão do *ranging* inicial, a SS envia uma mensagem RNG-REQ (*Ranging Request*), indicado como (1) na Figura 8. Quando a SS não recebe resposta a esta requisição, esta reenvia a RNG-REQ. Caso ela receba uma resposta contendo um *frame* com o mesmo número que a mensagem que fora enviada, ela considera que a transmissão não teve sucesso e implementa correções específicas descritas na RNG-RSP (*Ranging Response*), emitindo outra RNG-REQ com parâmetros modificados. Caso a resposta contenha um *MAC Address*, considera-se o sucesso da RNG-RSP, indicado como (3) na Figura 8.

Uma vez que a BS tenha recebido com sucesso a RNG-REQ, ela retornará uma mensagem RNG-RSP, indicado como (2) na Figura 8, usando o CID do *ranging* inicial. Dentro da mensagem RNG-RSP deve existir o CID básico designado para esta SS. Esta mensagem também contém informações sobre níveis de potência, freqüência e correções de tempo de transmissão.

Neste momento a BS envia mapas de *ranging* iniciais endereçados as SSs para completar o *ranging* inicial, indicado como (4) na Figura 8. Em caso de sucesso da mensagem RNG-RSP, o processo de *ranging* inicial está finalizado, indicado como (5) na Figura 8. Esta mensagem é trocada até que seja concluída com sucesso a fase de *ranging*.

Logo após a finalização do *ranging*, a SS informa a BS de suas capacidades básicas de transmissão através de uma mensagem SBC-REQ (*SS Basic Capability Request*). A BS responde com um SBC-RSP (*SS Basic Capability Response*) contendo informações de compatibilidade entre os dispositivos. A BS e a SS executam a autenticação e a troca de chaves entre os dispositivos e a BS registra a SS na rede. O registro é o processo pelo qual a SS envia uma mensagem REG-REQ (*Registration Request*) para a BS, com a finalidade de requisitar o registro na rede. A BS responde com uma mensagem REG-RSP (*Registration Response*), incluído um segundo CID de gerência, autorizando o tráfego na rede. Nesta mensagem também é informada a versão do IP. É a BS que inclui este parâmetro na mensagem REG-RSP, que, quando de sua ausência, é admitido a versão 4.

O *ranging* periódico permite a SS otimizar os parâmetros de transmissão para comunicação *uplink* com a BS. Durante a comunicação, a BS mantém um *slot* de tempo para cada SS realizar tal procedimento.

Caso o sinal esteja dentro dos limites aceitáveis e os dados transportados incluírem mensagens RNG-REQ, uma mensagem RNG-RSP é emitida com status de *sucess*. Se o sinal não estiver dentro dos níveis aceitáveis, a mensagem RNG-RSP deve incluir as correções apropriadas e o status será de *continue*. Caso o número de mensagens de correção estiver fora dos níveis aceitáveis de qualidade de sinal da SS, a BS enviará uma RNG-RSP com o status *abort*, e terminará o gerenciamento do *link* com a SS.

A SS se comportará de forma diferentes, de acordo com o status. Quando o status de RNG-RSP estiver como *continue*, a mensagem RNG-REQ deve ser incluída na rajada de transmissão. Quando o status estiver em *sucess*, a SS deve realizar manutenção na fila de dados *uplink*.

Assim, quando do processo da mensagem RNG-RSP, as correções PHY são implementadas [17] [09].

A Figura 7 é uma abstração lógica do processo de troca de mensagens entre a BS e SS para o processo de entrada na rede:

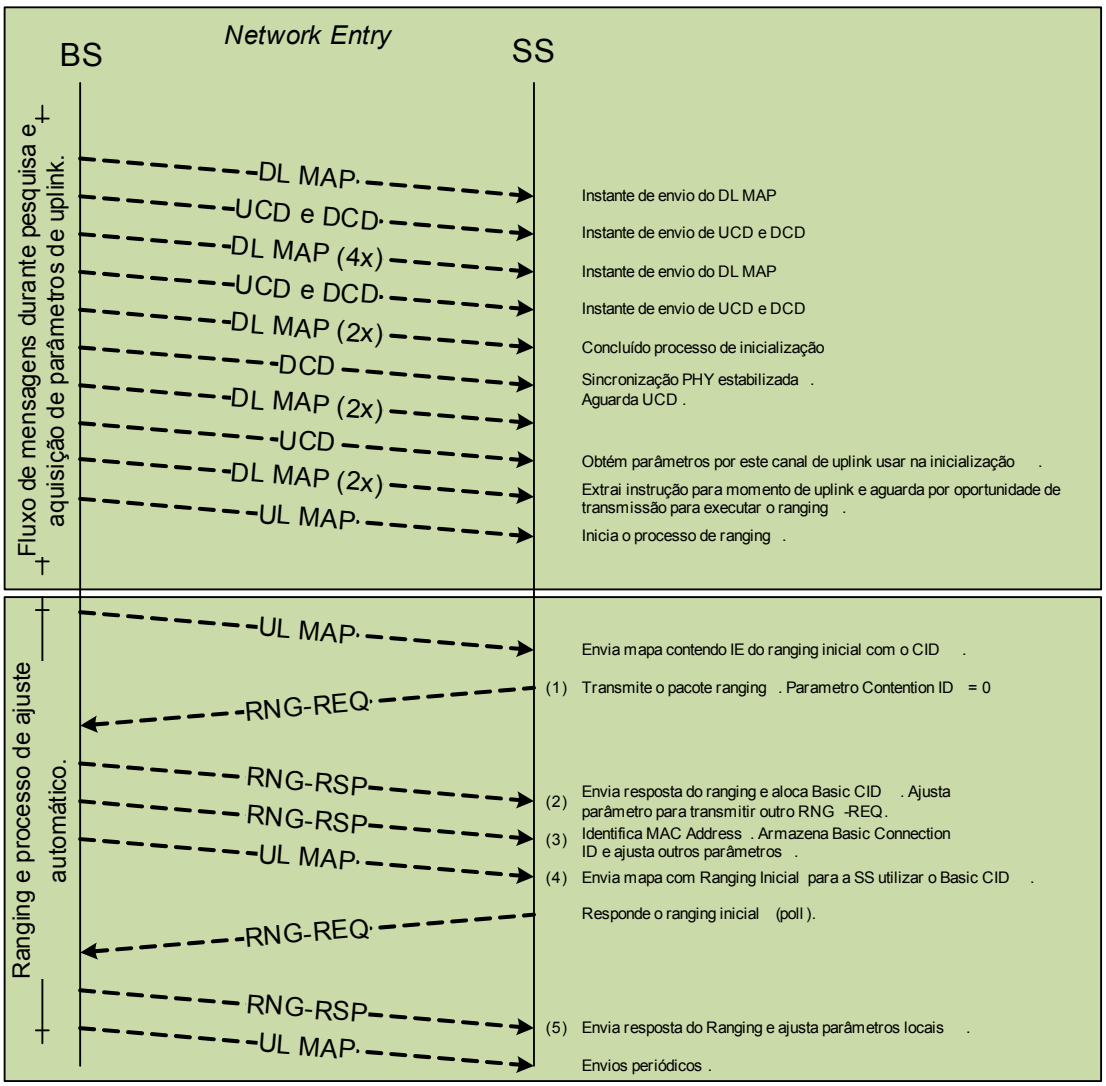


Figura 8: Abstração do processo de Network Entry [17].

2.3 Gerenciamento e Admissão de Conexões

O gerenciamento de conexões é responsável pela troca de mensagens DSC (*Dynamic Service Change*) e DSA (*Dynamic Service Addition*) que gerenciam os parâmetros de QoS. A requisição de *uplink* e o cronograma de concessão de banda, que serão descritos a seguir, também são monitorados e gerenciados. A BS provê à SS banda para o *uplink* e oportunidades para a requisição de banda. A concessão é relacionada aos parâmetros de QoS e o pedido da SS é ocasional, conforme a necessidade dos serviços, atendendo ao cabeçalho MAC e o *payload*. Cabe a SS, baseada nas informações da BS e o status da requisição feita, decidir por um novo pedido,

descarte ou o *backoff*. Neste último, é possível haver o adiamento dos pedidos de banda quando da existência de colisões de acordo com uma janela de transmissão, cujo tamanho é expresso como uma potência de 2. Colisões sucessivas levam ao aumento do tamanho das janelas.

O gerenciador de admissão na BS, recebe das SS o provisionamento de QoS, que são verificados, com a finalidade de assegurar tais parâmetros. As mudanças de parâmetros de QoS podem ser aprovados por este gerenciador, e cada mudança inclui requisição e decisão do controle de admissão e requisição de ativação de fluxo de serviços.

2.4 Gerenciamento de Banda

Conhecido como *BW Manager*, este bloco dá inicio ao processo de ajuste dos MAC-SDUs enfileirados de forma a melhor aproveitar a capacidade disponível no quadro de camada física que será construído.

Na direção de *downlink*, todas as decisões de alocação de banda são realizadas pela BS por CID, no qual não requer envolvimento da SS. Como as MAC PDUs são identificadas por CID, a BS destina os recursos, baseado nos requisitos de QoS, e indica estas alocações para a SS através de mensagens DL-MAP. Na direção de *uplink*, a SS requisita recursos utilizando um MAC PDU específico ou via *piggybacking*. Trocados os mapas, decide-se a necessidade de novo procedimento de ajuste ou finaliza alocação de banda no quadro de camada física atual [09].

A *WirelessMAN-OFDM PHY* suporta dois mecanismos de requisição de banda. Um dos mecanismos permite que a SS envie um cabeçalho de requisição de banda durante o REQ *Region-Full*, conforme indicado no item 6.3.6.1 de [17]. Esta transmissão consiste de um código de contenção modulado sobre um canal de contenção de quatro portadoras. A seleção do código de contenção é feito com igual probabilidade entre oito possíveis códigos. A seleção de canais de contenção é feito com igual probabilidade entre tempo/freqüência. Após a detecção, a BS prove uma alocação *uplink* para a SS transmitir uma requisição de banda MAC PDU e opcionalmente adicionar dados. O CID deve ser enviado em combinação com um OFDM

Focused_Contention_IE, o qual especifica o canal de contenção, código de contenção e a oportunidade de transmissão que foi usado pela SS.

2.5 Empacotamento e Fragmentação

Este processo é realizado de acordo com informações providas pelo Gerenciador de Banda (*BW Manager*) e, após o processo de ajuste das MAC-SDUs o resultado é passado para o *Per-CID Queuing Structure* [17].

O processo de empacotamento tem finalidade de agrupar múltiplos MAC-SDUs em um único MAC PDU. Este se faz através de atributos de conexão, que irão avaliar a necessidade de empacotamento, e se estes MAC-PDU terão tamanho fixo ou variável. O empacotamento só existirá se o MAC-PDU a ser criado tiver todas as informações dos MAC-SDUs envolvidos, caso contrário não acontecerá o empacotamento, pois, impossibilitará a desempacotamento do MAC-PDU criado. O processo de desempacotamento é obrigatório.

O processo de fragmentação é o processo pelo qual um MAC-SDU é dividido em um ou mais MAC-PDUs. Este processo permite o uso eficiente da banda disponível de acordo com os requisitos de QoS dos fluxos de serviço. A capacidade de fragmentação e montagem das MAC é obrigatória, e pode ser inicializada pela BS, quando do *downlink*, e pela SS, quando da *uplink*.

2.6 Suporte à Qualidade de Serviço

Oferecer qualidade de serviço, QoS, é o grande desafio das tecnologias emergentes, principalmente em redes sem fio.

Devido ao meio físico de propagação propício para elevadas taxas de erros, que podem, de alguma forma, comprometer a disponibilidade e a qualidade do sinal, se fazem necessárias técnicas capazes de minimizar e tornar viável este tipo de conexão. Algoritmos de QoS são requeridos para assegurar que o uso compartilhado de canais não resultem em falhas ou serviços degradados.

O primeiro passo para oferecer QoS é categorizar o tráfego em classes de serviços, onde são definidos os tipos de parâmetros de QoS necessários para cada classe.

Cada conexão é associada a uma classe de serviço que, por sua vez, é associada aos parâmetros de QoS. Estes parâmetros são gerenciados através das mensagens de diálogo DSA (*Dynamic Service Addition*) e DSC (*Dynamic Service Change*), como já mencionado na Seção 2.2.

Cinco classes de serviços são denominadas, conforme Tabela 5 [08]:

Tabela 5: Classes de Serviços suportadas pelo padrão.

Classe de Serviço	Aplicação	Parâmetros de QoS
UGS – *Unsolicited Grant Service*	VoIP	- Taxa máxima sustentada; - Máxima tolerância a latência; - Tolerância ao *jitter*;
rtPS – *Real-Time Polling Service*	Fluxos de Áudio e Vídeo	- Taxa mínima reservada; - Taxa máxima sustentada; - Máxima tolerância a latência; - Prioridade de tráfego;
ertPS – *Extended Real-Time Polling Service*	Voz com detecção de atividade (VoIP)	- Taxa mínima reservada; - Taxa máxima sustentada; - Máxima tolerância a latência; - Prioridade de tráfego; - Tolerância ao *jitter*;
nrtPS – *Non-Real-Time Polling Service*	FTP (*File Transfer Protocol*)	- Taxa mínima reservada; - Taxa máxima sustentada; - Prioridade de tráfego;
BE – *Best-Effort Service*	Transferência de Dados; *Browser* de Web	- Taxa máxima sustentada; - Prioridade de tráfego;

Os parâmetros de QoS citados na Tabela 5 são premissas para o funcionamento adequado de cada classe de serviço. De acordo com a prioridade e criticidade do tráfego, a classe de serviço é caracterizada.

A classe UGS suporta fluxos de dados em tempo real com pacotes de dados de tamanho fixo e envio em intervalos periódicos. Esta classe caracteriza-se pelo uso total da taxa destinada, pelo sensível tolerância a latência e pela baixa tolerância ao atraso de pacotes.

A classe rtPS é designada para suportar fluxos de dados em tempo real de pacotes de dados de tamanho variável. Esta classe caracteriza-se pela reserva mínima de taxa para garantir o tráfego, pelo uso total da taxa destinada, pelo sensível tolerância a latência e pela prioridade de tráfego quando da necessidade de competição.

A classe ertPS é utilizada para minimizar o uso de recursos em aplicações VoIP. Esta classe caracteriza-se pela reserva mínima de taxa para garantir o tráfego, pelo uso total da taxa destinada, pelo sensível tolerância a latência, pela prioridade de tráfego quando da necessidade de competição e pela baixa tolerância ao atraso de pacotes.

A classe nrtPS é designada para suportar fluxo de dados com tolerância de atraso e de tamanho variável. Esta classe caracteriza-se pela reserva mínima de taxa para garantir o tráfego, pelo uso total da taxa destinada, e pela prioridade de tráfego quando da necessidade de competição.

A classe BE é designada para suportar fluxos de dados que necessitam do mínimo de nível de serviço. Esta classe caracteriza-se pelo uso total da taxa destinada, e pela prioridade de tráfego quando da necessidade de competição.

Cada classe de serviço indicada acima, define parâmetros mínimos de banda, *delay* e *jitter* para prover a qualidade esperada em cada aplicação.

Durante as conexões, a BS e a SS negociam, de acordo com cada classe de serviço, com a finalidade de definir a banda necessária em relação à latência de resposta e a latência de propagação. Esta negociação se faz necessária para que cada classe de serviço supra, adequadamente, o serviço e o tráfego gerado por esta classe.

2.7 Segurança

Diferentemente de outros padrões de comunicações *wireless*, onde podemos citar 802.11 e suas variantes, as conexões IEEE 802.16 têm nativo em seu padrão o suporte a mecanismos de segurança necessários para oferecer confidencialidade e privacidade.

O padrão suporta diversos mecanismos de segurança, tais como a autenticação de usuários e dispositivos, protocolo de gerenciamento de chaves, encriptação de tráfego e gerenciamento de mensagens.

Mesmo considerando que os mecanismos para prover segurança em redes cabeadas são similares às redes sem fio, tais redes contam com falhas devido a infra-estrutura física e a possibilidade de intercepção das rajadas no espaço livre. Portanto, garantir a integridade dos dados trafegados e autenticar o emissor da mensagem, mecanismos de encriptação e identificação são nativos.

A subcamada de segurança conta com dois protocolos. O protocolo de encapsulamento, que visa encriptar os pacotes de dados e o protocolo de gerenciamento de chaves e privacidade (PKM), que tem a finalidade de prover a distribuição segura de chaves da BS e da SS [51].

O protocolo de encapsulamento é utilizado para encriptar pacotes de dados através da banda de acesso *wireless*. Este protocolo define o cenário suportado de criptografia, incluindo encriptação dos dados, autenticação de algoritmos e regras para aplicar estes algoritmos na MAC. Vale salientar que apenas o *payload* é encriptado.

O protocolo PKM usa certificado digital X.509, um algoritmo de chave pública RSA e um forte algoritmo de encriptação para realizar a troca de chaves entre a SS e a BS, num modelo cliente servidor. Primeiramente autentica-se a SS na BS, estabilizando um acesso secreto via chave pública de criptografia. Durante este processo, é usado um AK (*Authentication Key*) para assegurar a troca de chaves entre a SS e a BS, pois, tanto a SS quanto a BS, necessitam autenticar um usuário legítimo desta rede.

Este processo é iniciado pela SS, que envia um pedido de autenticação contendo o certificado X.509 do fabricante da SS. Esta mensagem é puramente informativa e a BS pode

ignorá-la. Posteriormente, a SS envia uma mensagem de requisição de autenticação para a BS. Então a BS valida as requisições da SS, determina o algoritmo de encriptação e o protocolo pode ser compartilhado com a SS, gerando um AK e enviando este para a SS.

Este processo de autenticação e autorização é necessário devido, como já citado anteriormente, as vulnerabilidades do meio de propagação. Assim, tenta-se minimizar a reprodução de mensagens copiadas de uma conexão legítima.

2.8 Aspectos Mercadológicos

Nesta seção, em síntese, estão relatadas as notícias publicadas na mídia impressa e digital dos últimos 2 anos. Serviram de subsídios para esta menção citações da utilização do WiMAX, dos investimentos destinados ao desenvolvimento de equipamentos e de testes de conceito.

A revista Info Exame e sua versão digital (http://info.abril.com.br), a seção de tecnologia do Universo On-Line (www.uol.com.br), e outros *sites* de discussão de telecomunicações (www.teleco.com.br, www.itweb.com.br, idgnow.uol.com.br), mostraram a situação atual da tecnologia no mercado nacional.

2.8.1 Mercado e Governo

As redes *Wireless Broadband* são preconizadas com o intuito de oferecer serviços específicos para cada tipo de cliente. Caracterizadas por altas velocidades de transmissão e vazão, mobilidade e ainda por oferecerem segurança, estas abrem a discussão e uma competição direta com as redes cabeadas.

As tecnologias 3G e 2,5G utilizadas para redes de telefones celulares, que tem como finalidade a entrega de pacotes de serviços de dados não em banda larga, não são competidores diretos das redes de banda larga sem fio. Ao contrário disto, certamente estas redes utilizarão o padrão IEEE 802.16 para melhorar os serviços oferecidos de telefonia móvel.

Estas redes oferecem diversas aplicabilidades, agregando valores e escalabilidade. Dentre estas características, podem-se citar topologias diversas e agregação de serviços.

Agregar serviços em qualquer padrão tecnológico demonstra a real inserção no mercado e, é notório, que WiMAX conta com tais características. Redes privadas utilizando o padrão, através de VPN (*Virtual Private Network*), são facilmente instaladas e geridas. Serviços de telefonia e conferência são suportadas facilmente, devido as características de segurança, criptografia e, principalmente, a redução dos custos oriundos deste tipo de serviço legado.

Na cidade mineira de Ouro Preto, considerada por alguns a primeira cidade digital do Brasil, foram instaladas antenas para atender toda a cidade em um projeto piloto da tecnologia. Esta cidade foi escolhida devido à sua geografia irregular e montanhosa, provando que a tecnologia é viável e está preparada para oferecer conectividade nos ambientes mais adversos. Em um teste de conceito da tecnologia nômade, uma Kombi foi adaptada para oferecer acesso a Internet nos pontos mais distantes e diferentes diariamente, mostrando que a tecnologia é um ótimo mecanismo de inclusão digital.

A iniciativa privada e os governos, em suas três esferas, já utilizam do WiMAX para realizar testes de conceito em diversos ambientes. A Prefeitura de São Paulo, capital do estado de São Paulo, através da PRODAM, seu departamento de informática, instalou um teste de conceito com duas finalidades. A primeira foi a de telemetria, onde o monitoramento de segurança de algumas áreas da cidade, envia imagens para uma central, com qualidade e rapidez. A outra finalidade foi a conexão de departamentos de saúde da periferia até as regionais.

Mundialmente, mais de 70 países contam com instalações e provas de conceito provendo acesso e, no Brasil, diversas frentes já investiram muitos reais em redes de acesso e estão, juntamente com o amadurecimento da tecnologia, mudando a realidade de locais geograficamente incompatíveis e longínquos.

As aplicabilidades do padrão 802.16 são inúmeras, tornando o padrão robusto e aplicável em diversos ramos da economia. Os valores agregados a esta tecnologia, como a mobilidade, segurança e interoperabilidade, fazem dos investimentos corporativos e governamentais viáveis e necessários.

2.8.2 Fabricantes, Equipamentos e Investimentos

Pioneira na fabricação e comercialização de equipamentos licenciados para conexões WiMAX, a *Alvarion*, www.alvarion.com, é uma empresa fundada em 1992 e desde 2000 está na NASDAQ. Após adquirir empresas de menor expressão, aumentou sua área de abrangência em conexões GSM, CDMA e WiMAX.

Com uma linha completa de equipamentos, a *Alvarion* conta com alguns parceiros de peso, como *Alcatel*, *Lucent*, *Siemens*, e está instalada em mais de 23 países como provedor de acesso banda larga.

Fabricante de diversos equipamentos, a *Alvarion* investe, juntamente com seus parceiros, em linhas e soluções integradas. Os equipamentos *BreezeMax 2,5* – para redes de 2,5 GHz –, o *Breezenet 100*, rádio ponto-a-ponto de 100 Mbps e o *BreezeMax Primary Voice Solution*, solução com duas portas de voz e uma de dados, integrada em um só equipamento, permite telefonia IP via rede WiMAX. De acordo com a companhia, existem boas perspectivas para soluções de 3,5 GHz no Brasil, que não tiveram andamento esperado, na realidade, em virtude do impasse relativo às licitações das freqüências.

A Intel e a Motorola oficializaram, em 2006, uma parceria para investimentos expressivos, de quase US$ 1 bilhão, para desenvolvimentos de *chips* WiMAX para notebooks e, juntamente com a universalização da telefonia celular, a Nokia espera começar a vender celulares compatíveis com a tecnologia de banda larga sem fio WiMAX em 2008. Atualmente, um computador pode acessar a Internet em alta velocidade via rede sem fio WiMAX apenas se estiver em uma posição fixa, mas a situação deve mudar com o utilização da versão móvel da tecnologia, sendo uma alternativa para as redes de telefonia de terceira geração (3G).

Em Mangaratiba (RJ), Belo Horizonte (MG) e Porto Alegre (RS) também já existem pontos de presença para acesso. Na última foram gastos R$ 3,5 milhões em investimentos para oferecer acesso nas áreas de convivência da cidade e departamentos governamentais. Este investimento, segundo especialistas, terá retorno em 18 meses.

A Intel, em parceria com instituições de ensino e empresas brasileiras, montou uma rede de Internet rápida sem fio em Parintins, cidade localizada em uma ilha do rio Amazonas, a cerca de 420 quilômetros de Manaus (AM). Segundo a companhia, a iniciativa faz parte de estratégia que prevê investimento de mais de US$ 1 bilhão de dólares no mundo para ampliar a inclusão digital nos próximos cinco anos. O projeto no Amazonas, fora realizado em parceria com CPqD, Embratel, Cisco, Proxim, Fundação Bradesco, Universidade Estadual do Amazonas, Universidade Federal do Amazonas e Universidade de São Paulo. A rede montada em Parintins, cidade mais conhecida por seu Festival Folclórico do Boi-Bumbá, conecta um centro de saúde, duas escolas públicas, um centro comunitário e a Universidade do Amazonas. A Intel informou que doou e instalou equipamentos para telemedicina para o centro de saúde e laboratórios de computação para os centros de ensino.

Em virtude do panorama descrito anteriormente, consultorias especializadas e reconhecidas realizam estudos profundos sobre a inserção desta tecnologia. Tais estudos revelam que a tecnologia tem o potencial para levar Internet em alta velocidade a aproximadamente 2,8 milhões de brasileiros até 2010. Deste total, cerca de 45% estariam concentrados na região Sudeste do país. O número equivale a 65% das conexões de Internet rápida atualmente instaladas no país — 4,364 milhões, segundo dados de pesquisa divulgada pela IDC Brasil em junho de 2006.

No mundo, de acordo com pesquisa da *Rethink Research*, os gastos mundiais com WiMAX pularão dos estimados 655 milhões de dólares em 2006 para cerca de 7,36 bilhões de dólares em 2009. Até 2009, serão cerca de 14,9 milhões de usuários usando WiMAX como banda larga padrão em casa ou no trabalho, de acordo com o estudo "WiMAX - *A Market Update* (2006-2007)", da consultoria RNCOS. A adoção em massa dará ao WiMAX penetração de 63% entre os serviços de banda larga e oferecerá às operadoras faturamento de US$ 13,8 bilhões de dólares mundialmente apenas com serviços, segundo a mesma pesquisa.

Para fomentar e incentivar o mercado brasileiro, o Ministro das Telecomunicações anunciou no final de 2006, a liberação de R$ 1 Bi para construção de redes banda larga WiMAX, e certamente impulsionarão o mercado para este padrão de comunicação.

A título de conhecimento e direcionamento, o governo federal brasileiro definiu um conjunto mínimo de premissas, políticas e especificações técnicas que regulamentam a utilização da Tecnologia da Informação e Comunicação (TIC) no governo federal, estabelecendo as condições de interação com os demais Poderes e esferas do governo e com a sociedade em geral. Esta arquitetura é chamada de e-PING, Padrões de Interoperabilidade de Governo Eletrônico. As áreas cobertas pelo e-PING estão segmentadas em Interconexão, Segurança, Meios de Acesso, Organização e Intercâmbio de Informações e Áreas de Integração para Governo Eletrônico.

Pode ser visto em www.governoeletronico.gov.br, nos detalhes da consulta pública 0013, que o padrão para Rede Metropolitana Sem Fio, que encontra-se em estudo, é o padrão IEEE 802.16.

3. PROPOSTA DE MODELOS DE SIMULAÇÃO

Este capítulo está organizado da seguinte forma: na Subseção 3.1 são explorados e comentados trabalhos prévios sobre o tema. Na Subseção 3.2 são apresentadas as discussões, pré-requisitos de modelagem e os desafios encontrados. Os resultados apresentados nas Subseções 3.1 e 3.2 foram previamente publicados em [06] e são aqui revisadas. Na Subseção 3.3 é apresentado o modelo proposto para uma célula WiMAX. Concluindo este capítulo, na Subseção 3.4 é apresentado o modelo proposto para o processo de *ranging* inicial numa célula WiMAX.

3.1 Trabalhos Anteriores

Em 2002, Ramachandran et. al. [36] desenvolveu um modelo de simulação do IEEE 802.16 para o software *OPNET Modeler*^{TM}. O *OPNET Modeler*^{TM} é um simulador *event-driven*, ou seja, baseado em eventos. A camada MAC do modelo foi adaptada de um modelo DOCSIS (*Data Over Cable Services Interface Specifications*) V1.1 [41] modelo disponível no *OPNET Modeler*^{TM}. Este modelo foi usado durante o processo de especificação do DOCSIS [43]. Entretanto, o DOCSIS foi desenvolvido para meio híbrido fibra-cabo coaxial. Por isso, os autores trocaram o modelo "*bus-based PHY*" do OPNET pelos modelos de rádio correspondentes. Neste trabalho os autores decidiram ignorar alguns recursos do *OPNET Modeler* e usaram o Matlab^{TM} [28] para "simular o efeito de várias outras coisas como *path loss* e *background noise*". Simulações no Matlab^{TM} foram usadas para popular tabelas de BER (*Bit Error Rate*) [42] no OPNET. O objetivo era avaliar o desempenho da MAC sobre diferentes modelos da PHY no *downlink*. O trabalho foi baseado na especificação IEEE 802.16a-2003^{TM}. O *Uplink* é modelado livre de erros e usando a modulação QPSK [42]. Somente o modo FDD é considerado. Um canal AWGN (*Aditive White Gaussian Noise*) foi usado para estimar a BER no *downlink* através de cálculos analíticos. A taxa de símbolos é constante. Nenhum código do tipo FEC [42] [34] foi usado. O modelo da MAC abrange inicialização (com sincronização e *ranging*), mapeamento, requerimentos e concessões de BW, requerimentos baseados em contenção, *scheduling* (somente classe UGS), fragmentação e empacotamento. Uma aplicação FTP foi utilizada para gerar tráfego TCP (*Transport Control Protocol*) e a topologia utilizada foi PMP com uma BS e uma SS.

Uma versão mais recente deste trabalho foi defendida em 2004 [35]. Nesta, os autores criaram um algoritmo RLC focado em reduzir o atraso fim-a-fim para aplicações em rede. A rede consiste de uma célula e uma BS (conectada à Internet) e várias SSs. Três modelos de propagação foram considerados: tipo 0, tipo 1 e tipo 2. O tipo 0 apresenta visada direta limpa, enquanto os tipos 1 e 2 representam cenários típicos sem visada direta com múltiplos percursos. O canal de transmissão foi implementado no Matlab™ usando um filtro FIR (*Finite Impulse Response*) [42] [34]. Os *PHY burst profiles* foram avaliados utilizando simulações Monte Carlo [22] em banda base no Matlab™. *Burst profiles* com a modulações QPSK e 16-QAM [42] [34], 64-QAM foram estudadas. Em adição ao trabalho anterior, a MAC abrange conexões, endereçamento e negociação de QoS. FTP e *streaming* de vídeo foram utilizadas como fontes de tráfego.

Em 2003, Wong e Evans et. al. [11] desenvolveram um modelo utilizando a interface aérea *WirelessMAN OFDM* para *LabVIEW™* (ambiente de desenvolvimento gráfico de fluxo de dados). O modelo opera em banda base e captura o comportamento do sinal no domínio do tempo. Para estimar o desempenho do sistema foi empregada uma simulação Monte Carlo [22] semi-analítica. Isso aproxima a mistura da análise analítica com a simulação Monte Carlo. O modelo inclui os blocos de transmissão OFDM [42] [34]: codificação/decodificação, moduladores/demoduladores OFDM, modelo de canal aéreo, estimativa e equalização de canal, e um testador de BER. Isto permite mudar os parâmetros do simulador durante a simulação, tais como prefixo cíclico, parâmetros do canal, técnica de estimativa do canal e símbolo da modulação. Um modelo de canal discreto baseado nos modelos SUI (*Stanford University Interim*) foi adotado [18] [34]. De acordo com os autores, o modelo de canal identifica "características de desvanecimento, espalhamento por atraso de múltiplo percurso, espalhamento *Doppler*, interferência co-canal e canal adjacente e fator de redução do ganho da antena". É pressuposto que o modulador/demodulador OFDM possua *clock* perfeito e sincronização de símbolo e quadro.

Outro trabalho focado na interface aérea *WirelessMAN OFDM* foi desenvolvida por Ghosh et. al. [14], em 2005. Nesse trabalho foi empregada a ferramenta Matlab™ para construir um modelo de rádio enlace em banda base entre a BS e a SS. O modelo inclui os seguintes blocos de transmissão OFDM: FEC, mapeamento de símbolos, codificador/decodificador Alamouti [03], moduladores/demoduladores OFDM, modelo de canal *Wireless* e canal *Multicarrier* e estimativa

de variância do ruído. Emprega modelo de canal *realistic* 3GPP (*Third Generation Partnership Project*) MIMO com desvanecimento seletivo [24] [01], que podem capturar a correlação de diferentes antenas em função do ângulo de chegada, separação e orientação das antenas e do ângulo de espalhamento. O modelo escolhe entre os modos PHY disponíveis baseado na SNR obtida para maximizar o fluxo de dados. Um fluxo médio por célula é estimado numericamente usando um perfil SINR (*Signal-to-Interference-plus-Noise-Ratio*). Este perfil possui "Reuso de freqüências, ganho e resposta das antenas da BS e da SS, números de setores por BS, distância entre BS, freqüência da portadora, e modelos de propagação".

Por outro lado, há vários trabalhos que estão concentrados principalmente na questão da MAC. Entre eles podemos destacar o trabalho de Redana, Lott e Capone 2004 [38]. Ele compara a eficiência da MAC para as topologias PMP e *Mesh* através de uma avaliação analítica do cabeçalho para *WirelessMAN OFDM*. O modelo analítico captura a estrutura do MAC PDU, a estrutura do quadro, parâmetros da transmissão OFDM (taxa de codificação e tamanho do bloco não codificado) e 6 modos da PHY (QPSK ½, QPSK ¾, 16-QAM ½, 16-QAM ¾, 64-QAM 2/3, 64-QAM ¾). Fragmentação e empacotamentos dos MAC SDUs não foram considerados. Foram desenvolvidas expressões fechadas para todos os modos da PHY, para o número de MAC PDUs no quadro e para a eficiência da MAC. Adicionalmente, uma simulação *event-driven* fora empregada para avaliar as derivações analíticas para a topologia *mesh*. A simulação foi feita em NS-2.

Louazel et. al. [25] também desenvolveu um modelo de simulação focado na questão da MAC. O modelo foi implementado em GloMoSim [28] e QualNet [40] simuladores de eventos discretos. Ambos simuladores foram baseados em linguagem PARSEC (*Parallel Simulation Environment for Complex Systems*) [10]. Um quadro foi desenvolvido para simular o IEEE 802.16 MAC e PHY focado na interface aérea *WirelessMAN SC*. O modelo da MAC abrange: TDD, PMP, inicialização, conexões, mapeamento, gerenciamento de QoS por estação, alocação fixa de BW, ATM e IP e DSA. O modelo da PHY abrange estrutura de quadro, sincronização, e parâmetros da interface aérea (freqüência, taxa de símbolos e codificação do canal). O modelo do canal é baseado nos parâmetros da interface aérea. Portanto, não há relatos sobre modulação e codificação. A rede pode ser composta por somente uma célula, duas células interconectadas ou uma rede de *backhaul* com várias células.

Hoymann [15], publicou um artigo em junho de 2005 que foca na interface aérea *WirelessMAN OFDM*. O artigo propunha um cenário com uma rede IEEE 802.16 multi-modo multi-usuário, que é explorada não somente analiticamente, mas também empregando simulação. Este cenário inclui um número de SS ativas, cada uma usando um modo possível da PHY. O autor calculou a área de cobertura de cada modo da PHY. É pressuposto uma densidade constante de SSs em uma célula operando na mesma taxa de dados. A largura de banda do sistema foi configurada para 20 MHz na faixa de 5GHz. A técnica TDD de duplexação foi utilizada.

O trabalho propõe um modelo analítico para avaliar o desempenho do sistema. Um modelo analítico do sistema foi implementado no Matlab™. Este modelo cobre as características das camadas MAC e PHY. O modelo da MAC cobre a estrutura do MAC PDU, estrutura de quadro, conexões, CRC, requisições de BW, símbolos e fragmentação do MAC PDU, enchimento de símbolos e mapeamento. De acordo com Hoymann, "as características do canal *wireless* não foram consideradas nesse modelo. A transmissão é pressuposta como livre de erros. O quadro MAC está totalmente preenchido". Primeiro o autor estimou a capacidade de diferentes modos PHY quando somente um usuário estava presente. E em seqüência, um cenário multi-modo, multi-usuário foi considerado.

Um simulador estocástico eventos discretos, que cobre simultaneamente as camadas MAC e PHY, foi desenvolvido na *RWTH Aachen University*. O SDL (*Specification and Description Language*) fora usado para modelar o protocolo de pilha do IEEE 802.16 e traduzir para código C++ através de um gerador de código. A camada MAC inclui CS. A camada PHY cobre transmissão em rajadas entre as SSs e a BS. O modelo da MAC cobre requisições de BW baseadas em contenção, UCD (*Uplink Channel Descriptor*), requisições e garantias de BW, *scheduling* (BE e nrtPS), *ranging* e modos da PHY. O modelo não cobre ARQ, UGS e rtPS *sheduling*. MPEG (*Moving Picture Experts Group*), Ethernet e CBR *stochastic* foram usadas como fonte de tráfego.

De acordo com Hoymann, "Baseado na perda de percurso da portadora, a interferência introduzida por outras estações e receptores de ruído, o canal calcula a SNR para um pacote em particular". Uma tabela é usada para converter um certo valor de SNR para um valor de BER e este para um taxa de erro de símbolo OFDM. A tabela foi povoada com os resultados de uma

outro simulador: *IKT-STRIKE link layer simulation chain* [16]. Ou seja, dois simuladores foram utilizados, um para simulação do protocolo (*SDL-Based Simulator*) e outro para simulação do sinal (*IKT-STRIKE*). O modelo do *link* de transmissão OFDM possui os blocos aleatórios, codificador/decodificador, modulador/demodulador OFDM, *interleaver* e um modelo de canal *wireless*, baseado no modelo SUI [18] ou AWGN. *Reed-Solomon* [34] e códigos convolucionais também estão disponíveis nesse modelo.

Assim como em [38], o NIST [32] também utilizou o simulador de redes NS-2 e avaliou o comportamento de uma rede WiMAX. Neste trabalho, as características abordadas para a simulação assemelham-se aos demais trabalhos discutidos, e aos parâmetros e funcionalidades deste trabalho, tanto na camada PHY, como da MAC. Os principais aspectos abordados pelo NIST contemplam uma interface física WirelessMAN-OFDM, a técnica de *duplexing* TDD, o gerenciamento de mensagens quando do processo de *network entry*, um padrão de organização de alocação de *uplink* para o registro de SS, de acordo com a requisição de banda, a fragmentação e remontagem de quadros. Não é discutido em [32] o processo de *ranging* periódico e ajuste de potência, o empacotamento e os erros de conexão.

O trabalho do NIST [32] ainda define diversas funcionalidades de gerenciamento de acordo com a norma. Quando da inicialização da BS são criadas 4 conexões, sendo, a *Initial Ranging*, *Padding*, *Broadcast* e AAS. Já a SS cria apenas a *Initial Ranging*, *Padding* e *Broadcast*. O processo de construção e transmissão de MAC PDUs é contemplado, bem como o processo de fragmentação. O processo de alocação de banda e requisição é previsto e a BS simula a alocação de *slots* para requisições de *ranging* inicial e de banda. Assim, quando do processo de *network entry*, a SS executa o *ranging* para ajustar a potência de transmissão.

Quanto a entrada de uma estação na rede, o trabalho do NIST [32] preocupa-se com o processo de pesquisa de um canal de *downlink*, com a obtenção dos parâmetros de transmissão, com o *ranging* inicial e o com registro na rede.

Outro trabalho que utiliza o NS-2 é proposto por Chen em [47]. Este trabalho realiza a simulação de uma rede WiMAX baseado numa topologia PMP. Modelando a camada MAC e uma interface física OFDMA, Chen simula o processo de *ranging* inicial. São cobertos os processos de identificação do canal de *downlink* a ser utilizado, de sincronização com a BS, de

obtenção dos parâmetros UCD, e da troca de mapas UL e DL. Chen define o valor dos parâmetros e descreve os valores utilizados durante o processo de simulação. Os parâmetros definidos por Chen também serviram de base para a realização da simulação deste trabalho. O processo de fragmentação e empacotamento fora, de forma simplista, definido e simulado em [47].

Num ambiente com 9 SSs para uma BS, Chen executa a requisição *ranging* e utiliza três tipos de fluxos de serviços para produzir tráfego na rede e colher resultados.

Para finalizar, podemos citar Narayana [30], que descreve e discute a existência de vulnerabilidades de segurança durante a fase de entrada na rede. Questões de segurança não são comumente abordadas, fazendo de [30], até então, um trabalho ímpar. Vale salientar que tal abordagem é de grande relevância para as simulações descritas acima, uma vez que impactará nos resultados, principalmente, de tempo de resposta.

3.2 Discussão, Pré-Requisitos e Desafios de Modelagem

Na seção anterior apresentou-se alguns dos atuais esforços para avaliar o desempenho do padrão IEEE 802.16d. Ghosh et. al. [14] e Wong et. al. [11] focaram no modelamento da camada PHY. Ambos desenvolveram um modelo detalhado do sistema de transmissão OFDM. Simulação no nível de sinal e formulação analítica foram usadas. Embora estes esforços sejam bastante úteis no entendimento e avaliação do comportamento da camada PHY, eles oferecem pouca informação sobre como a camada PHY impacta na camada MAC, ou até nos níveis superiores. Por outro lado, Louazel et. al. [25] e Redana et. al. [38] partiram na direção de modelar a camada MAC. A camada PHY é vista através de parâmetros. Entretanto, Hoymann [15] e Ramachandran et. al. [36] apostam que para avaliar completamente redes IEEE 802.16 é necessário considerar não apenas o modelo de protocolo da camada MAC, mas também o modelo do sistema de transmissão da camada PHY. Adicionalmente, estes trabalhos indicaram que um ponto crucial a ser considerado é como o modelo da camada PHY alimenta os modelos das camadas MAC e superiores. Nas subseções seguintes, apresenta-se uma discussão sobre como cada trabalho anterior considerou os principais aspectos da tecnologia. Também, apresenta-se o resultado de

um levantamento de quais são os pré-requisitos que devem ser considerados em um modelo WiMAX e os desafios que eles trazem. O objetivo é levantar os pontos relevantes que precisam ser contemplados em um modelo de simulação, visando permitir uma avaliação de desempenho o mais realista possível. Obviamente, em uma primeira versão, nem todos estes pré-requisitos poderão ser atendidos.

3.2.1 Topologias

A grande maioria dos trabalhos realizados considerou a topologia PMP. Redana et. al. [38] considerou a topologia *mesh* e propôs uma topologia PMP *multi-hop*. Mesmo sendo a topologia *mesh* opcional [18], ela aumenta consideravelmente a escalabilidade da rede. Então, ambas topologias deveriam ser consideradas num modelo completo de WiMAX. É desejável que a topologia da rede possa ser aumentada para capturar efeitos de redes grandes. Também, o modelo de rede deve ser escalonável. A partir dessas premissas, sugere-se implementar em uma primeira versão somente a topologia PMP. Isto porque a topologia *mesh* ainda é pouco utilizada na prática e apresenta um aumento significativo de complexidade no desenvolvimento de produtos.

3.2.2 Arquitetura

Tipicamente, apenas uma única célula é considerada. Louazel et. al. [25] desenvolveu duas células interconectadas e também uma rede *backhaul* com várias células. Apenas SSs de redes fixas têm sido modeladas. Nenhum dos trabalhos estudados modelou células *dual-mode* Wi-Fi e WiMAX ou redes interconectadas. Este é um dado tanto quanto curioso, já que as redes iniciais de WiMAX provavelmente irão operar juntamente com redes Wi-Fi. Portanto, modelos de tráfego agregado de Wi-Fi poderiam ser desenvolvidos para acelerar simulações ou facilitar formulações analíticas. Estes modelos poderiam ser usados para acelerar a avaliação de algoritmos de classificação de tráfego.

Em um primeiro momento, sugere-se que um modelo WiMAX possua somente uma célula, composta de uma BS e diversas SSs fixas. Entretanto, deve-se considerar uma saída desta rede para o restante da Internet. O motivo pelo qual não são consideradas estações móveis é que o

padrão que contempla mobilidade ainda não estava totalmente pronto na época em que este trabalho iniciou. Também não serão consideradas estações *dual-mode*, embora o modelo de SS que será proposto nas Seções 3.3 e 3.4 possam ser modificados para tanto.

3.2.3 Camada MAC

Nos trabalhos estudados a camada MAC foi modelada analiticamente e/ou através de simulação. Modelos MAC analíticos têm sido usados para calcular o tamanho das MAC PDUs, assim como os efeitos do empacotamento e fragmentação de MAC PDUs. Ainda, Redana et. al. [38] desenvolveu um modelo analítico para calcular a eficiência da MAC para topologias PMP e *mesh*, considerando o cabeçalho da MAC para modos PHY diferentes. Sumarizando, modelos MAC analíticos estão sendo usados essencialmente para determinar eficiência e vazão. Modelos de simulação MAC podem ser usados para cobrir aspectos mais amplos, onde formulações fechadas são complexas e difíceis de serem tratadas. Técnicas de simulações *event-driven* são preferidas para simulação de protocolo. As ferramentas empregadas nos trabalhos estudados são *OPNET Modeler*, GlomoSim/QualNet (usando linguagem Parsec) [28] [40] [10], ns-2 [23] e simulador baseado em SDL [15].

A seguir serão apresentadas as características dos trabalhos anteriores com relação a MAC e as justificativas para as soluções adotadas nos modelos propostos.

3.2.3.1 Gerenciamento de Conexões e Negociação de QoS

MPEG, Ethernet, CBR, FTP e *vídeo streaming* são empregados como fontes de tráfego do cliente da rede. Tanto Hoymann [15], quanto Louazel et. al. [25] implementaram um modelo responsável pelo controle dos fluxos de serviço. Neste último, um *Dynamic Service Addition* (DSA) foi implementado para criar e remover conexões de acordo com a necessidade de tráfego das SSs. No entanto, nenhuma negociação de QoS é feita. A dissertação de mestrado [35] cobre em linhas gerais a negociação de QoS.

Um modelo de cliente mais completo poderia ser desenvolvido, onde conexões são requeridas, criadas, modificadas e removidas, de acordo com padrões de tráfego real ou distribuições matemáticas. A Subseção 3.2.1 da referência [04] apresenta um modelo de cliente

ATM que poderia ser adaptado para se encaixar nesse requisito. Neste, para cada categoria de serviço, foi implementado um modelo que negocia um contrato de tráfego com a rede. Se a conexão é aceita, o modelo aloca largura de banda e espaço no *buffer* para a nova conexão. Além do gerenciamento de conexões e negociação de QoS, duas outras características não são contempladas pelos trabalhos discutidos, a classificação de tráfego e o PHS (supressão de cabeçalho de *payload*).

Um modelo mais completo com relação a estes aspectos é apresentado por Chen et. al. [47]. Este modelo abrange a manipulação de fluxos de serviço (SFIDs) e define os parâmetros de QoS de cada conexão. Estes aspectos são discutidos nesta dissertação na Subseção 2.1.9.2.

O modelo geral proposto cobrirá os aspectos de gerenciamento de SFIDs e CIDs, controle de admissão, alocação de recursos por SS e CID, e relacionamento com aspectos de transmissão.

3.2.3.2 Gerenciamento de Largura de Banda

Hoymann [15] implementou as classes de serviço BE e nrtPS, enquanto Ramachandran et. al. [35] [36] focou na classe UGS. Além disto, ambos trabalhos implementaram modelos de pedidos de largura de banda baseados em contenção. É recomendado que modelos mais completos capturarem o comportamento dinâmico por trás de pedidos e concessões de banda. Eklund et. al [12], provê na seção "*Bandwidth Requests and Grants*", uma boa discussão sobre como a SS pode manejar largura de banda. Modelos mais sofisticados poderiam capturar tais cenários para melhorar o entendimento e avaliação de desempenho das capacidades de gerenciamento de tráfego do IEEE 802.16.

O modelo proposto cobrirá os seguintes aspectos da requisição de banda para o *uplink* e *downlink* via *piggyback* e pedidos isolados; concessão de banda fixa para conexões UGS; concessão de banda via *polling* para as classes rtPS e nrtPS, configuração de mapas para refletir alocações realizadas; manutenção de rodízios de concessão de banda via *polling*; gerência de banda na SS, inclusive com *padding*. Maiores detalhes serão dados junto ao modelo geral proposto.

3.2.3.3 Duplexação e Mapeamento

O modo TDD é explorado em quase todos os trabalhos. A operação *WirelessMAN SC* FDD foi modelada por Ramachandran et. al. [35] [36]. É recomendável que a função de mapeamento seja contemplada no modelo, pois trata-se de um mecanismo interativo que afeta largura de banda usada e disponível.

No trabalho proposto será implementada a solução TDD, pois mantêm-se compatível com a maioria dos trabalhos já publicados. Quanto ao mapeamento serão consideradas as informações recebidas do gerenciamento de banda para preencher abstrações dos mapas UL-MAP e DL-MAP. O objetivo é capturar os principais fatores que impactam no desempenho da rede conforme as características do ambiente e da qualidade de serviço. A escolha da ordem de transmissão das MAC SDUs será feita também em função dos mapas.

3.2.3.4 *Ranging* Inicial e *Radio Link Control*

Alguns trabalhos relacionados ao *ranging* inicial [36] [15] [29] foram usados como referência de pesquisa sobre o funcionamento e parâmetros deste processo. As referências [09] e [29] fazem uma discussão sobre a importância do processo. Já [30] valida e especifica a existências de vulnerabilidades de segurança durante a fase de entrada na rede. A referência [47] cobre o processo de entrada na rede com a utilização do simulador ns-2. Vale salientar que nenhum destes estudos foca especificamente o processo de *ranging* inicial, apenas [32] cita tal processo.

O RLC motivou vários trabalhos anteriores na área. O objetivo era determinar como o desempenho do sistema e da rede variam quando as condições dos enlaces sem fio variam. Ramachandran et. al. [35] desenvolveu um algoritmo para reduzir atrasos de aplicações fim-a-fim dependendo do estado do enlace. Hoymann [15] e Redana et. al. [38] consideraram diversos modos da interface PHY, que são usados em modelos analíticos e de simulação. Esse aspecto deve ser modelado, uma vez que afeta o desempenho da tecnologia como um todo. Modelos analíticos podem determinar estocasticamente qual perfil é usado em cada SS. A troca de mensagens de *ranging* entre a BS e as SSs, e vice-versa, permite modelar com mais realidade esta funcionalidade. Este aspecto representa um desafio para desenvolvedores de modelos porque

integra modelos PHY e MAC. A troca do modo usado na PHY pode representar melhorias de desempenho na MAC.

De acordo com Ramachandran et. al. [35], "Tipicamente os indicadores de qualidade são a BER, a taxa de erro de quadro, o atraso fim-a-fim ou a vazão". Muitos algoritmos práticos de adaptação usam faixas de valores de relação sinal-ruído para definir regiões de operação para cada modo. Em [15] uma tabela é usada para converter um certo valor de SNR para um valor de BER, e então para uma taxa de erro de símbolo OFDM.

O modelo geral proposto prevê o monitoramento periódico das características do enlace e requisita sua modificação quando necessário. Mudanças na situação do canal poderão ser geradas a partir de modelos estatísticos. Os perfis de transmissão serão divulgados via *broadcast* nos mapas.

3.2.3.5 Segurança

Apenas um trabalho considerou e especifica a existências de vulnerabilidades. Narayana [30] discute esta possibilidade durante a fase de entrada na rede. Deste modo, um modelo capturando os aspectos chave neste assunto poderia ser incluído nos modelos de simulação. Entretanto, em nesta primeira versão o aspecto segurança também não será contemplado.

3.2.4 Camada PHY e Modelo de Integração

A maioria dos trabalhos focou o sistema WirelessMAN OFDM. Isto mostra o alto interesse nas interfaces aéreas baseadas em OFDM do IEEE 802.16. As ferramentas empregadas nos trabalhos estudados são Matlab^{TM} [28], LabVIEW e IKT-STRIKE *link layer simulation chain* [15]. Blocos do sistema de transmissão OFDM foram considerados nas referências [15] [11] [14]. O mesmo ocorreu para o modelo SC PHY [35] [36]. Esta abordagem melhora detalhes da camada PHY e pode capturar melhor o comportamento do sistema. Canais sem fio sofisticados têm sido usados em [35] [15] [38] [11] [14]. Ramachandram empregou um filtro FIR para construir três modelos de canais. Em [15] modelos SUI [18] e modelos AWGN foram usados. Gosh et. al [14] empregou um modelo realístico 3GPP MIMO [24].

Normalmente, estes trabalhos indicaram que um ponto chave a ser considerado em esforços de modelagem é como modelos de camada PHY alimentam modelos de camadas MAC. Isto é, como uma mudança no modo PHY poderia afetar a desempenho da MAC ou como a BER da interface aérea afeta a taxa de erro de MAC PDUs. Dois simuladores foram usados em Ramachandran et al. [35] [36] e Hoymann [15], um para cada camada. A simulação da camada MAC é afetada por meios de tabelas com resultados de simulações da camada PHY.

Nos modelos propostos serão utilizados modelos analíticos para a propagação dos sinais na camada física.

Mudanças na condição do canal poderão ser geradas utilizando distribuições estatísticas. A potência e o alcance do sinal até a SS serão modelados utilizando uma expressão analítica válida para OFDM. O resultado deste cálculo servirá de base para determinar qual o perfil será utilizado na PHY para *downlink*.

3.3 Modelo Geral de Simulação para uma Célula IEEE 802.16d

Nesta subseção é proposto um modelo de simulação que atende aos pré-requisitos de modelagem acrescentados na subseção anterior. Este modelo serve de base para o modelo específico implementado, que será apresentado na próxima subseção.

3.3.1 Estação Rádio Base

3.3.1.1 Visão Geral

A Figura 9 mostra a arquitetura proposta para a implementação da MAC na estação rádio base, chamada aqui de *Data/Control Plane* (DCP). O plano de dados e controle DCP é dividido em três seções: *Output Section* (OS), *Input Section* (IS) e *Control Section* (CS). A seção de *Output* constitui a porção da MAC na direção de transmissão (*Downlink*). A seção de *Input* constitui a porção da MAC na direção de recepção (*Uplink*). A seção *Control* estabelece um barramento de controle de todas as funcionalidades no DCP.

A *Output Section* é composta de diversos blocos que satisfazem as funcionalidades específicas e comuns da MAC, e da PHY, conforme atuação definida para cada bloco do modelo. Os pacotes são recebidos e preparados para a transmissão. Sob a gerência da *Control Section*, que gerencia a banda e os recursos disponíveis, o processo de adequação, empacotamento e fragmentação dos MAC PDU é modelado, levando tais pacotes para uma fila de acordo com a classe de serviço de cada um. Chegado o instante de remoção dos pacotes da fila, a seleção da retirada é feita em função dos mapas UL e DL, da gerência de banda e dos escalonadores de UL e DL. Após isto, os cabeçalhos das MAC SDUs são preenchidos finalizando a construção dos MAC PDUs. Na seqüência, estes MAC PDUs são utilizados pela PHY para preencher o *frame* físico e transportá-los até o destino.

Na *Input Section* são, novamente, na ordem inversa, lidos, analisados, montados e entregues numa fila de classe reversa até que, no instante certo, as MAC PDUs são processadas e entregues as camadas superiores.

Deste processo todo, pode-se verificar a relação entre as seções e, principalmente, a importância de cada um dos blocos definidos, na tentativa de prever e suportar todas as possibilidades de tráfego, garantindo a qualidade da comunicação da origem até o destino. Vale salientar mais uma vez que estes blocos foram analisados e remanejados até que conseguíssemos desenhar o melhor e mais eficiente modelo de simulação.

A *Control Section* é dividida nos blocos de inicialização, conexão, admissão, *ranging*, UL MAP *Manager*, DL MAP *Manager* e *Bandwidth Manager*. Estes blocos acumulam funções de gerência que atuam sobre todos os blocos das *Input* e *Output Sections*.

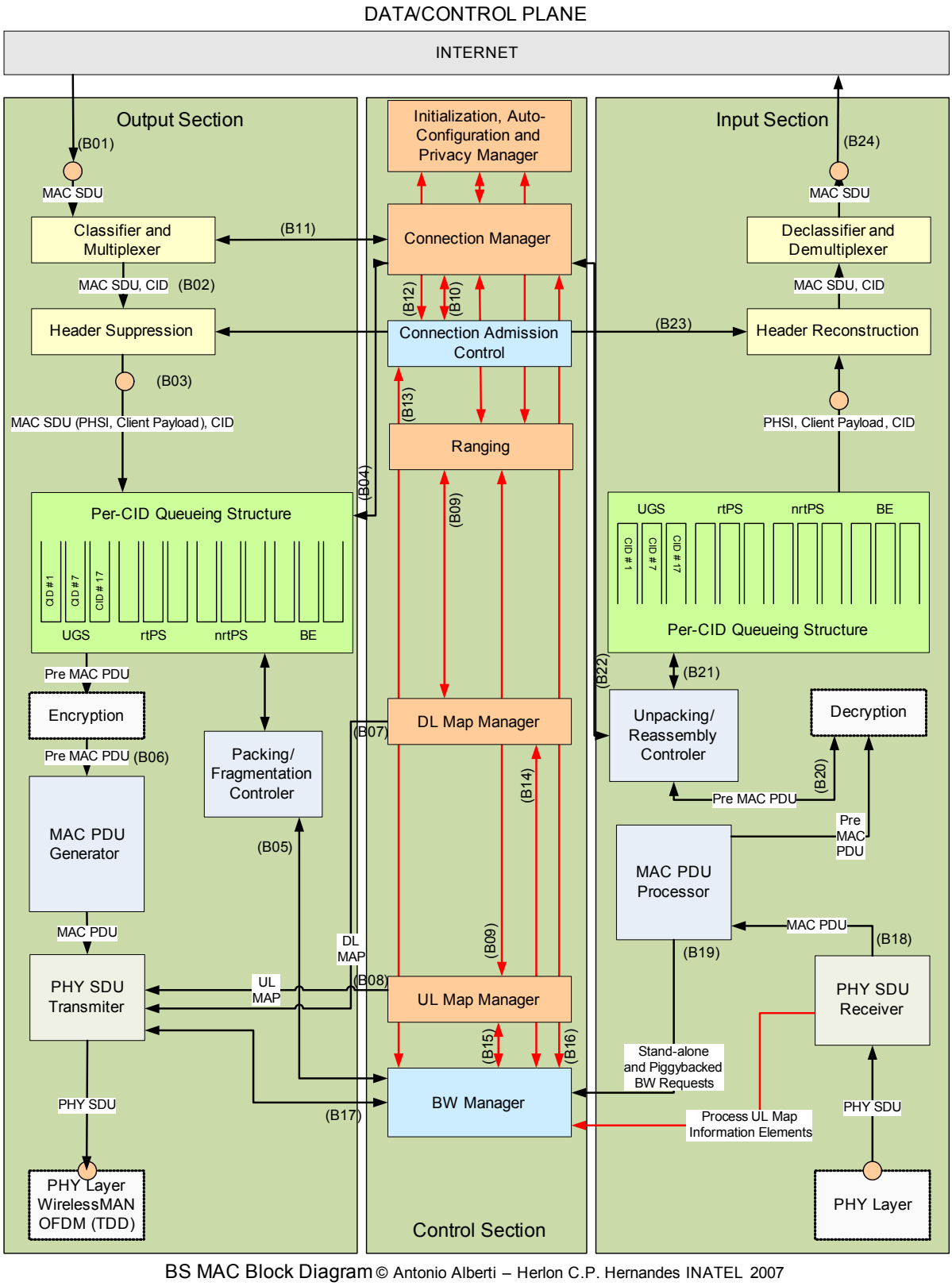


Figura 9: Plano de Controle da BS (ERB – Estação Rádio Base).

3.3.1.2 Output Section

A seção de saída possui diversos blocos que efetivam todas as tarefas relativas a direção de transmissão. Alguns destes blocos possuem interconexão com blocos da seção de controle (CS).

3.3.1.2.1 MAC

Os blocos presentes na MAC na seção de saída são:

• *Classifier and Multiplexer* – Este bloco faz a classificação e multiplexação do tráfego entrante (B01) na BS para transmissão às SSs. O objetivo do multiplexador é agregar o tráfego entrante em um único fluxo de tráfego agregado, caso necessário. Já o classificador associa cada tráfego entrante (agregado ou não) a uma conexão estabelecida na MAC. Esta conexão é identificada através de um CID (*Connection Identifier*). Este bloco recebe uma MAC_SDU e produz uma MAC SDU acrescida do CID (B02) da conexão a que a MAC-SDU pertence (MAC_SDU, CID);

• *Header Suppression* – Em algumas conexões é possível fazer a supressão do cabeçalho das MAC SDUs, com o objetivo da reduzir o tráfego transmitido na rede. Neste bloco é possível habilitar a compressão de cabeçalho por CID. Portanto, o bloco guarda o estado de compressão para cada CID existente na BS. O bloco recebe uma (MAC_SDU, CID) (B02). O bloco possui dois funcionamentos possíveis: com compressão ou sem compressão. Caso haja compressão, o bloco gera um MAC_SDU com campo PHSI (*Payload Header Suppression Index*) e informa o CID da conexão (C_MAC_SDU, CID). Caso não haja compressão, o bloco reenvia a MAC_SDU recebida intacta e informa o CID da conexão (MAC_SDU, CID) (B03). O algoritmo a ser utilizado na compressão é descrito no item 5.2.3.1 de [17]. A troca de mensagens DSC se dá entre este módulo da BS e o módulo *Header Reconstruction* da SS;

• *Per-CID Queuing Structure* – Este bloco armazena as MAC_SDUs que aguardam por processamento. Informações de classe de serviço poderão ser obtidas junto ao *Connection Manager* (B04). Para cada CID será implementada um fila lógica FIFO;

• *Packing/Fragmentation Controler* – Este bloco executa os processos de *packing* e *fragmentation*. Após o processo de ajuste das MAC_SDUs o resultado é passado para o *BW Manager* (B05).

O funcionamento deste bloco é descrito no algoritmo da Figura 10:

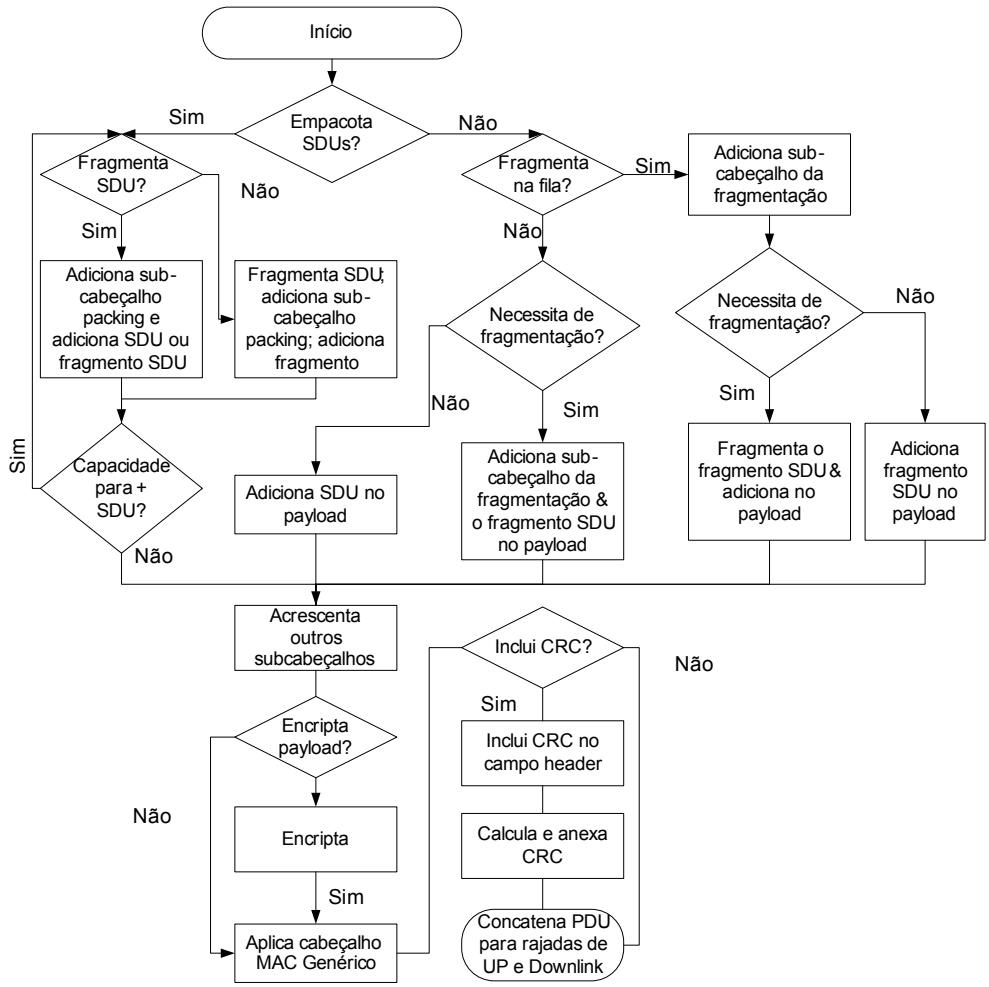


Figura 10: Algoritmo de controle de *Packing* e *Fragmentation*. Figura 24 de [17].

O bloco *Packing/Fragmentation Controler* contempla o *packing* e *fragmentarion* de pacotes de tamanho fixo e variável, entretanto com algumas ressalvas.

Para blocos de tamanho fixo, a fragmentação é proibitiva. Quando o processo de *packing* é realizado, o pacote MAC_PDU será formado por pacotes MAC SDU de tamanhos fixos, como indicado na Figura 11.

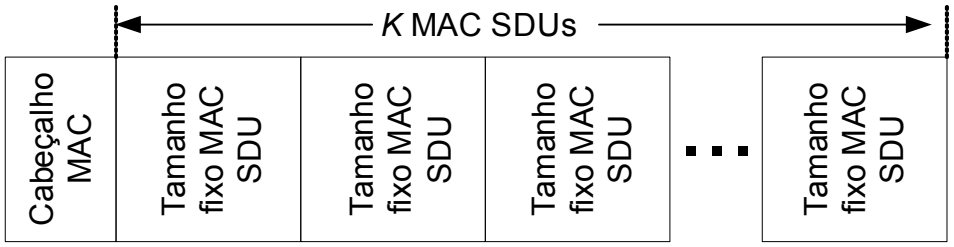


Figura 11: SDU de tamanhos fixos.

Para blocos de tamanho variável, o pacote MAC_PDU será formado por pacotes MAC_SDU de tamanhos variáveis. Para existir a identificação dos pacotes, é anexado em cada MAC_SDU um cabeçalho de *packing* – PHS (*Packing Header Subheader*), que contempla a informação de início e fim do respectivo pacote.

Quando existir a fragmentação é inserido um cabeçalho FSH – (*Fragmentation SubHeader*), indicando a continuidade e a seqüência do pacote MAC_SDU que sofreu a fragmentação. As Figura 12 e 13 são uma abstração deste processo. O uso de *packing* e *fragmentation* permite maior eficiência na interface aérea.

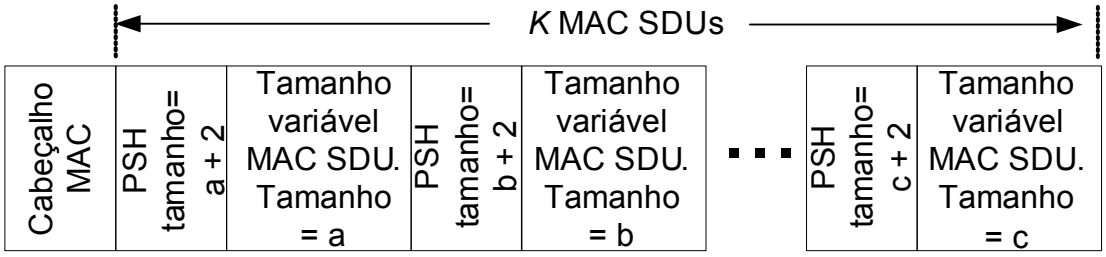


Figura 12: SDU de tamanho variável.

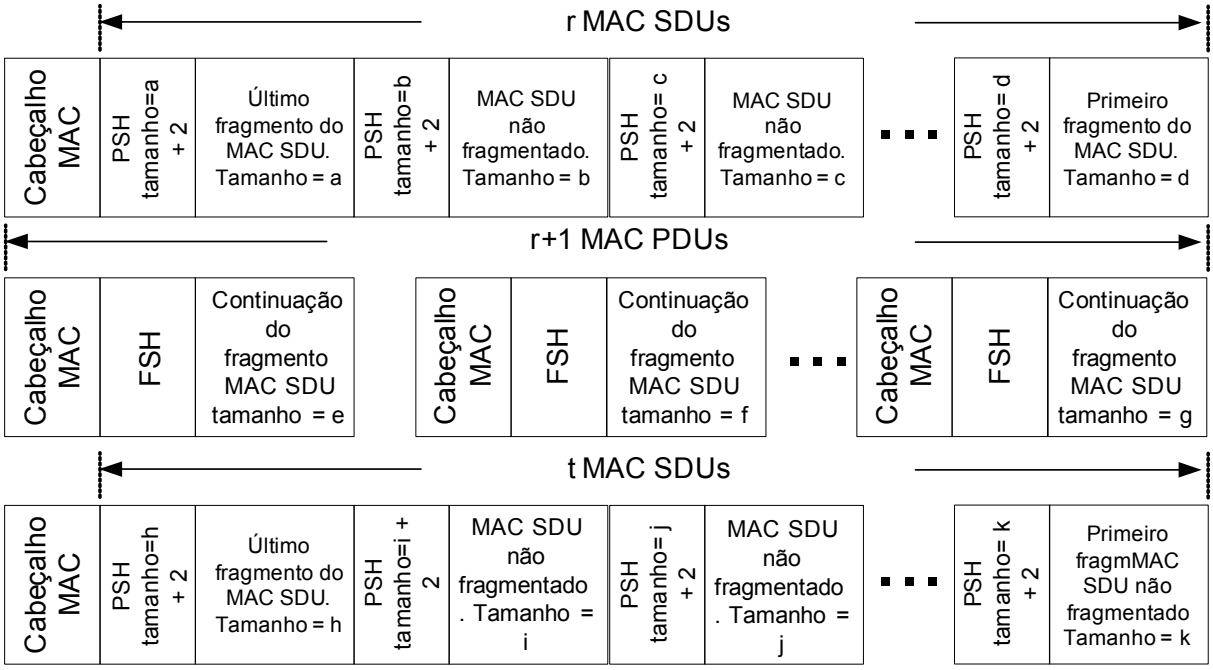


Figura 13: Cabeçalhos *Packing* e de fragmentação no MAC SDU E PDU.

Caso haja fragmentação, o bloco fragmenta a MAC_SDU recebida e transmite as diversas MAC_SDUs obtidas no processo, informando o CID de cada MAC SDU (MAC_SDU, CID). Neste caso, o tamanho dos fragmentos é definido em função da disponibilidade de banda alocada para cada CID no DL MAP. A informação de banda disponível no *BW Manager* também poderá ser utilizada para tomar a decisão do tamanho dos fragmentos. Se a banda disponível for menor que o tamanho do SDU, ele precisa ser fragmentado. Caso a fragmentação não esteja habilitada, isto é, com SDU de tamanhos fixos, o SDU permanece na fila até que ele possa ser transmitido sem fragmentação.

Caso não haja fragmentação, o bloco reenvia a MAC_SDU recebida intacta e informa o CID da conexão (MAC_SDU, CID).

Caso haja *packing* para uma determinada conexão, este bloco agrupará vários MAC_SDUs em um único MAC_PDU. Neste caso, o 2º *bit* do campo Tipo do cabeçalho genérico da pré MAC_PDU deverá ser configurado com 1 ou 0, indicando a existência ou não de um subcabeçalho de empacotamento no *payload*, respectivamente.

Caso haja *packing* e *fragmentation*, o 4º *bit* do campo Tipo do cabeçalho genérico da pré MAC_PDU deverá ser configurado com 1 ou 0, indicando se o presente subcabeçalho de empacotamento ou fragmentação é estendido ou não, respectivamente.

Por fim, este bloco configura o campo CID (*Connection Identifier*, 16 *bits*) do cabeçalho genérico da pré MAC_PDU.

• *Encryption* – Não será implementado nenhum algoritmo de encriptação do *payload*. Entretanto, este bloco configura o campo EC (*Encriptation Control*, 1 *bit*), presente no cabeçalho do pré MAC PDU, indicando que não houve encriptação (EC = 0) (B06).

• *MAC PDU Generator* – Este bloco é responsável por preencher os campos do cabeçalho do pré MAC PDU que ainda não tiverem sido preenchidos e, como indicado na Figura 14, estão definidos na Tabela 6:

Tabela 6: Campos do cabeçalho do pré MAC PDU na BS.

Nome do Campo	Tamanho	Descrição
HT (*Header Type*)	1 *bit*	Indica que se trata de um cabeçalho genérico (HT = 0)
EC (*Encriptation Control*)	1 *bit*	Configurado no bloco *Encryption*
Tipo	6 *bits*	Indica que tipo de carga está sendo carregada no *payload*. Os seguintes bits estão presentes:
	O 1º *bit*	Indica a existência de um subcabeçalho *de Grant Management no payload*. Não é usado pela ERB
	O 2º, 3° e 4° *bit*	Configurado no bloco *Packing/Fragmentation Controler*
	O 5º *bit*	Indica que o quadro possui no *payload* informações de relativas a retransmissão de quadros (ARQ). Será configurado para zero, indicando que o ARQ não está implementado
	O 6° *bit*	Indica a existência de um subcabeçalho de *Mesh* no *payload*. Será configurado para zero, indicando que esta topologia não será implementada
RSV (*Reserved*)	1 *bit*	*Bit* reservado para uso futuro
CI (*CRC Indicator*)	1 *bit*	Indica a existência (CI = 1) ou não (CI = 0) de um código CRC ao final do PDU. Estudos futuros mostrarão a viabilidade de implementação de CRC.
EKS (*Encriptation Key Sequence*)	2 *bits*	Indica qual chave foi usada para encriptar o quadro. Ausente caso o campo EC = 0
LEN (*Lenght*)	11 *bits*	Tamanho total da MAC PDU. O tamanho máximo de uma MAC PDU é 2048 bytes (2 Kbytes)
CID (*Connection Identifier*)	16 *bits*	Identifica a que conexão pertence a MAC PDU. Configurado no bloco *Packing/Fragmentation Controler*
HCS (*Header Check Sequence*)	8 *bits*	Seqüência de verificação do cabeçalho. Contém o código CRC quando o campo CI = 1

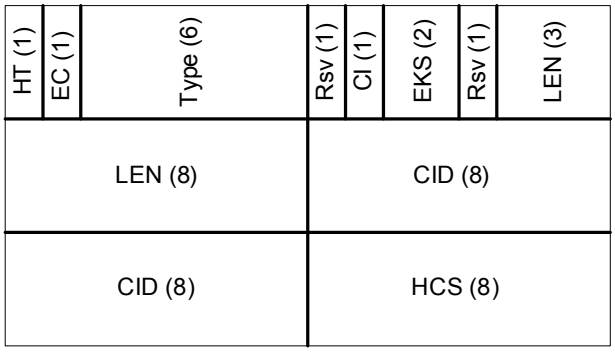


Figura 14: Cabeçalho do Pré-MAC PDU.

• *PHY SDU Transmiter* – É responsável pela criação do quadro de camada física. Recebe o DL MAP pronto do bloco *DL MAP Manager* (B07) e o UL MAP pronto do bloco UL Map *Manager* (B08). Também fornece detalhes sobre o quadro de camada física para os demais blocos de controle da BS. Conforme a Figura 15 serão considerados as seguintes porções do quadro de camada física *WirelessMAN OFDM*:

- *DL Subframe* – Será construída uma estrutura que capture todos os componentes deste subquadro. Ou seja: Preâmbulo, FCH, *DL Bursts* #1 até #m.

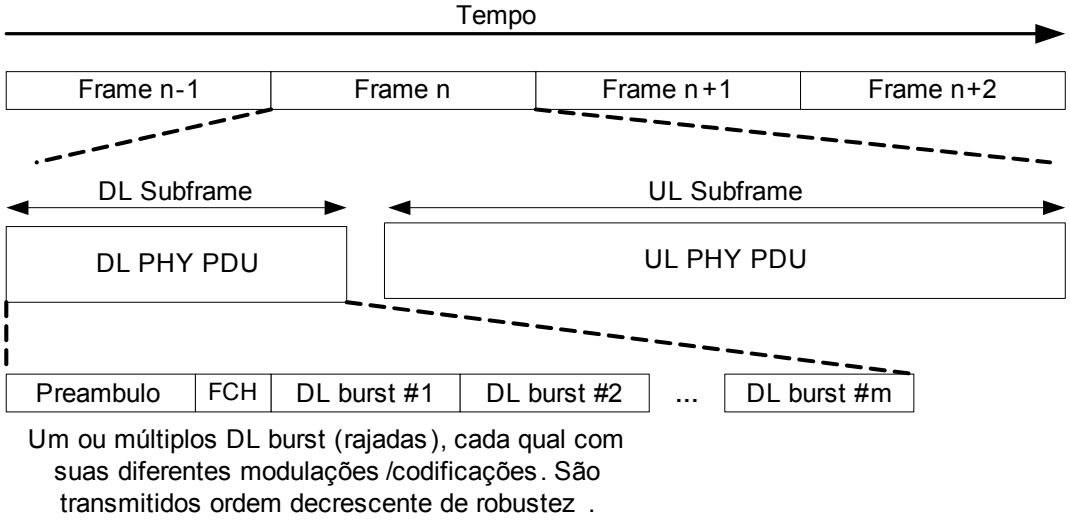


Figura 15: DL Subframe.

3.3.1.2.2 PHY

• *PHY Layer* – Este bloco contém uma abstração para a camada física *WirelessMAN OFDM*. Assim sendo, possui diversos parâmetros da camada física utilizados pela MAC.

3.3.1.3 Control Section

3.3.1.3.1 MAC

• *Initialization, Auto-Configuratiom and Privacy Manager* (IAPM) – É responsável pela troca de mensagens iniciais com uma instância do modelo de SS. Três mensagens são trocadas em três conexões distintas: a conexão básica, de alta prioridade e com baixa tolerância a atraso. As conexões primária e secundária, que enviam mensagens periódicas e toleram atrasos. Somente serão modelados os aspectos necessários para determinar como o fluxo de um determinado cliente será classificado para um certo CID. Aspectos de segurança não serão modelados. No momento que uma SS é inicializada, a conexão básica (CID básico) é inserida no CM (B25).

• *Ranging* – Implementa o RLC. Através do RLC (*Radio Link Control*) é monitorada periodicamente a qualidade do enlace e, se necessário, requisita a modificação do perfil e as características do perfil. Os perfis são divulgados via *broadcast* nos mapas (B09). Assim, quando estas informações forem necessárias, os outros módulos de controle buscam estas informações no módulo *Ranging*. Mudanças na condição do canal poderão ser geradas utilizando distribuições estatísticas. A potência e o alcance do sinal até a SS serão modelados utilizando uma expressão analítica para OFDM. O resultado deste cálculo servirá de base para determinar qual o perfil será utilizado na PHY para *downlink*. Com estas informações a BS diferencia e aplica os níveis de QoS necessários para cada SS. Também deverá implementar abstrações para os procedimentos de entrada na rede, tal qual descrito na Subseção 2.2.3.

• *Connection Manager* – É responsável por centralizar as decisões relativas a *service flows* e CIDs. Ela recebe os pedidos de fluxos de serviço das SSs e aciona o CAC (B10) para ativar ou não este fluxo. Se a decisão for favorável, o CM cria um mapeamento de SFID para CID, e configura este mapeamento no módulo *Classifier and Multiplexer* (B11) na direção de transmissão. Além disso, o CM armazena os parâmetros de QoS para o CID recém criado. No

momento que uma conexão básica é recebida, o CM avisa o *BW Manager* (B16) sobre esta nova conexão, para que esta entre na fila de *polling*.

• *Connection Admission Control* (CAC) – Decide, em função dos parâmetros de QoS, se um fluxo de serviço será admitido ou não. Também são utilizadas informações de banda disponível junto ao *BW Manager* (B13) e junto ao módulo de inicialização (B12), uma vez que a taxa máxima de transmissão depende do modo da PHY.

• *DL Map Manager* – É responsável por construir o DL MAP de acordo com informações recebidas do *BW Manager* (B14) e do *Ranging* (B09), e retirar as pré MAC SDUs da fila na ordem adequada. Será feita uma abstração para o mapa de *downlink* contendo a ordem de alojamento das MAC_PDUs dentro da porção DL do quadro de camada física. Todos os instantes de tempo serão calculados.

• *UL Map Manager* – É responsável por construir o UL MAP de acordo com informações recebidas do *BW Manager* (B15) e do *Ranging* (B09). Envia para a camada PHY o UL MAP para transporte *uplink* (B08). Adequa os UL MAPs conforme as características do ambiente/QoS, recebidos do *BW Manager* e do *Ranging*. Todos os instantes de tempo de transmissão no *uplink* serão determinados.

• *BW Manager* – Bloco de controle fundamental na BS. Atua em duas frentes:

- Na concessão de banda para as conexões e SSs. As requisições de *uplink* e *downlink*, bem como um cronograma de concessão de banda são monitorados e gerenciados. A BS provê à SS banda para o *uplink* e oportunidade para a requisição de banda. A concessão é relacionada aos parâmetros de QoS, portanto consultas serão feitas ao *Connection Manager* (B16). Os pedidos da SS dependem da classe de escalonamento, conforme descrito no modelo da SS. O modelo suportará os *requests* individuais e via *piggyback*.

Polling é o processo no qual a BS aloca para a SS banda específica para que novas requisições de banda possam ser feitas. O processo de *polling* deve ser implementado conforme o algoritmo da Figura 16:

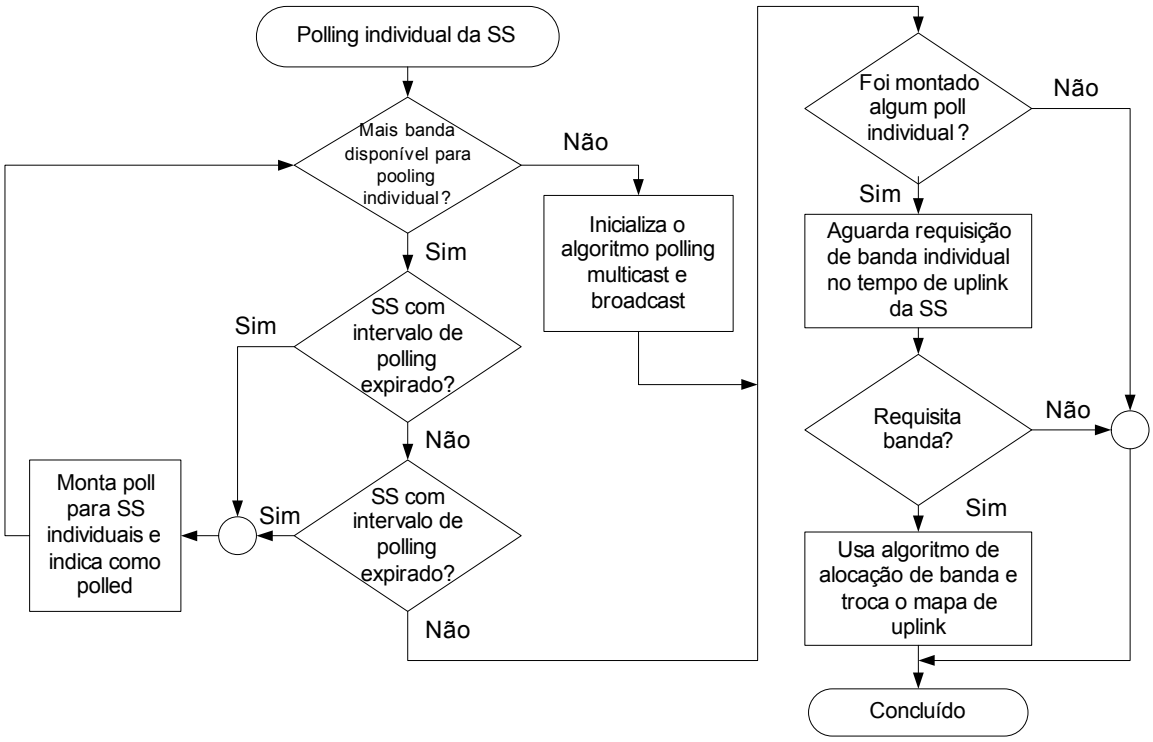


Figura 16: Algoritmo para o *polling*. Figura 38 de [17].

A BS é que decide quando uma SS será convidada a solicitar banda, conforme dito no item 6.3.7.4.3.1 de [17]. A BS mantém um rodízio das estações que recebem banda via *polling*, contendo, inclusive, o intervalo de tempo entre cada disponibilização. O processo de disponibilização inicia com a BS verificando se existe banda disponível para *polling*. Em caso afirmativo, a BS verifica qual a estação que mais precisa do *polling* no momento. Esta estação será agraciada com banda através da configuração do *Data Grant IE* no UL MAP para o CID Básico. Embora esta banda seja disponibilizada para que uma SS específica possa fazer nova requisição, esta estação pode utilizar a banda para outros fins, ou até

inutilizá-la com *padding*, como descrito 6.3.3.7 de [17]. As requisições que aproveitarem este momento devem enviar MAC PDUs com o cabeçalho de requisição de banda. SSs que tenham conexões UGS não devem ser agraciadas via *polling*, pois podem utilizar a banda desta conexão para enviar requisições via *piggyback*. Mesmo que a BS tenha agraciado uma determinada estação com banda via *polling*, mediante o algoritmo anterior, esta banda pode ser removida. A decisão final só é tomada após a finalização de requisições individuais e via *piggyback*. Ou seja, o *polling* tem menos prioridade na decisão e só é finalizado após todos os pedidos de banda individuais e via *piggyback* sejam processados. No processo de inicialização o módulo *BW Manager* pode ser informado pelo *Connection Manager* sobre uma nova SS (B16) e colocá-la no rodízio de banda via *polling*.

- Na definição da porção de *downlink* do quadro PHY. É ele que dá inicio ao processo de ajuste das MAC_SDUs enfileiradas de forma a melhor aproveitar a capacidade disponível no quadro de camada física que será construído no *PHY SDU Transmiter*. O processo de ajuste é feito pelo bloco *Packing/Fragmentation Controler*. Após receber o resultado dos processos de *packing* e *fragmentation*, decide se é necessário novo procedimento de ajuste ou finaliza alocação de espaço no quadro de camada física atual. Ordena o *DL Map Manager* para construir mapa de acordo com decisões tomadas e retirar as pré MAC SDUs da fila na ordem adequada. Envia ao *UL Map Manager* (B15) informações sobre as características a serem seguidas para o tráfego *uplink* na camada PHY. Este bloco obtém informações do formato dos quadros de camada física junto ao bloco *PHY SDU Transmiter* (B17).

3.3.1.4 Input Section

A seção de entrada possui diversos blocos que efetivam todas as tarefas relativas a direção de recepção na BS. Alguns destes blocos possuem interconexão com blocos da seção de controle (CS).

3.3.1.4.1 PHY

• *PHY SDU Receiver* – Fornece detalhes sobre a porção de *uplink* do quadro de camada física para os demais blocos de controle da BS. Conforme Figura 17, serão considerados as porções do quadro de camada física *WirelessMAN OFDM*:

• *UL Subframe* – Serão armazenados e considerados os intervalos de tempo disponíveis para: *contention slot for initial ranging*, *contention slot for BW requests* e *UL PHY Bursts* #1 até k. Também serão considerados as requisições de banda das SSs, tanto individuais, quanto em *piggyback*.

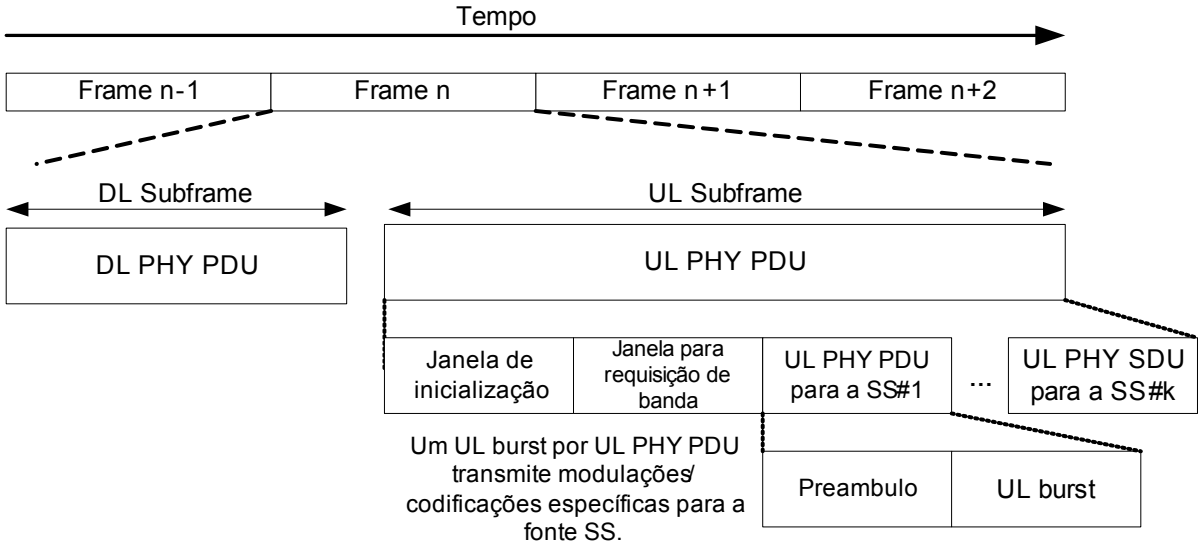


Figura 17: UL Subframe.

3.3.1.4.2 MAC

• *MAC PDU Processor* – Recebe do *PHY SDU Receiver* (B18) os MAC PDUs e realiza a leitura dos campos: HT e Tipo (1º *bit*). Se HT = 1 trata-se de requisição de banda individual. Se for igual a zero, trata-se de um cabeçalho genérico. O 1º *bit* do Tipo será lido para verificar a existência de um subcabeçalho de gerência de banda. No caso de existir algum pedido de banda, as informações recebidas são enviadas para o *BW Manager* (B19). Na teoria, através do campo HCS realiza-se a verificação da integridade via CRC. Após o resultado desta verificação, avalia a necessidade de pedido de retransmissão. Através do campo EKS identifica a chave de decriptação

a ser utilizada para este processo. Neste modelo não serão utilizados os recursos que envolvem EKS e HCS. No caso de se tratar de uma MAC PDU de dados envia para o módulo *Decryption*.

• *Decryption* – Na teoria, através da chave identificada no *MAC PDU Processor*, executa a decriptação e envia o Pré-MAC PDU para o *Unpacking/Reassembly Controler* (B20). Vale salientar que este módulo será implementado vazio; Futuras implementações poderão fazer uso deste módulo.

• *Unpacking/Reassembly Controler* – Realiza o processo de desempacotamento dos PDUs e o processo de remontagem das MAC SDUs. O processo de desempacotamento é acionado caso o 2º *bit* do campo Tipo esteja configurado com 1. Caso exista *packing* e *fragmentation* o 4º *bit* do campo Tipo será configurado com 1. Também será necessário processar o campo CID do MAC PDU. Antes de enviar os fragmentos iniciais e intermediários a *Per-CID Queueing Structure* (B21), verifica junto ao *Connection Manager* (B22) a classe de serviço a que as MAC SDUs pertencem. Fragmentos iniciais e intermediários são armazenados na *Per-CID Queueing Structure*.

• *Per-CID Queueing Structure* – Organiza com vistas aos CIDs as MAC SDUs conforme a classe de serviço que aguardam pelo último fragmento para serem remontadas. No momento em que o último fragmento for recebido, a MAC SDU é reconstruída a partir da leitura dos fragmentos armazenados na *Per-CID Queueing Structure* e acrescido do último fragmento recém recebido. Quem aciona este processo é o módulo URC (B21). Esta MAC SDU é enviada ao módulo *Header Reconstruction*.

• *Header Reconstruction* – Reconstrói as MAC_SDUs conforme as informações recebidas do módulo *Header Suppression* (B23);

• *Declassifier and Demultiplexer* – Através do CID do MAC_SDU envia para o modelo Internet visando o levantamento de desempenho da comunicação de *uplink*. Coleta estatísticas de desempenho na direção de *uplink*.

3.3.2 Estação do Assinante (SS)

A Figura 18 mostra a arquitetura prevista para a SS.

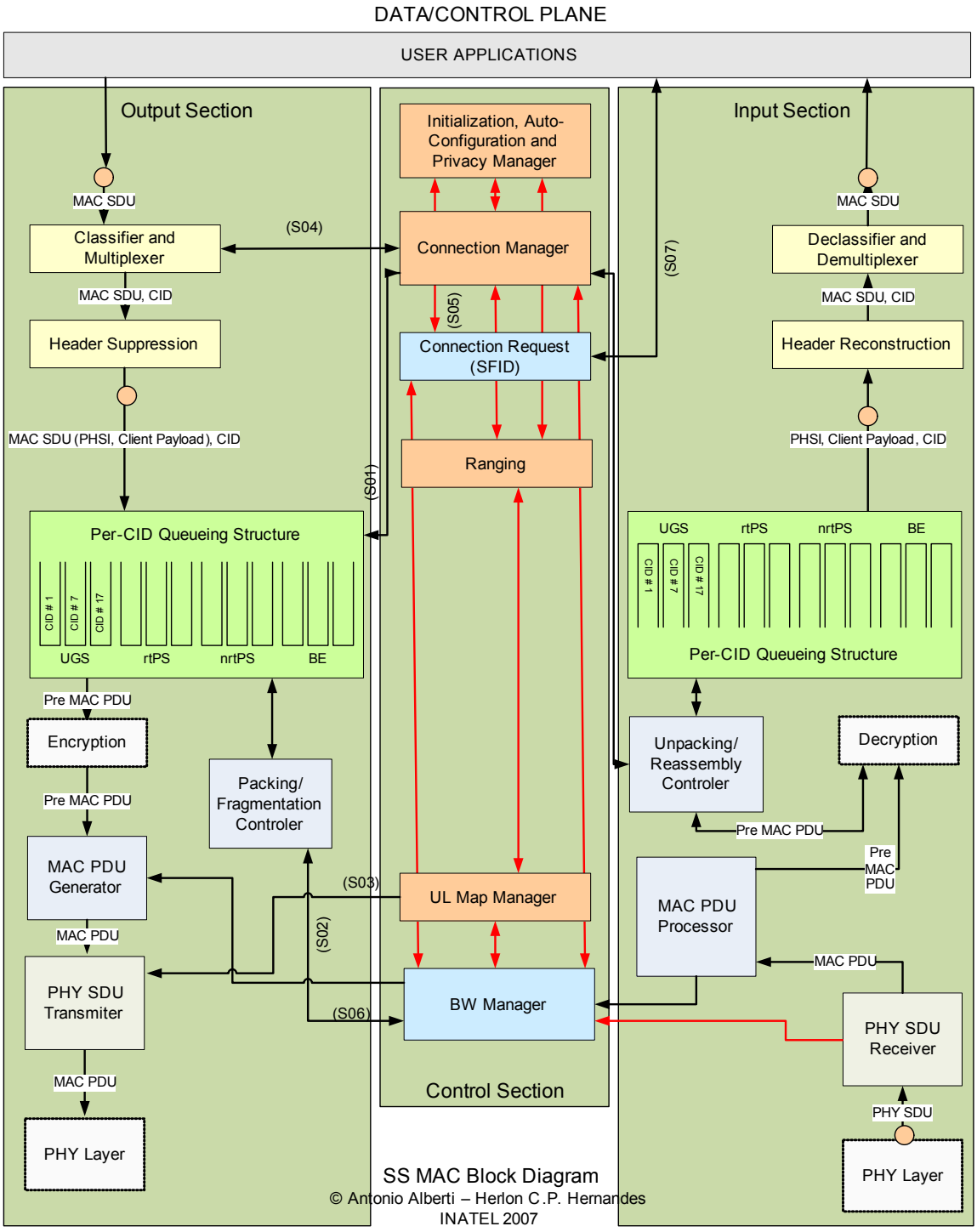


Figura 18: Plano de Controle da Estação do Assinante (SS).

Nesta versão somente serão considerados os serviços de *http* e *voip*, conforme implementação feita no módulo *User Applications*.

3.3.2.1 Output Section

• *Classifier and Multiplexer* – Este bloco faz a classificação e multiplexação do tráfego entrante na SS para transmissão à BS. O objetivo do multiplexador é agregar o tráfego entrante à um único fluxo de tráfego, caso necessário. Já o classificador associa cada tráfego entrante (agregado ou não) a uma conexão estabelecida na MAC. Esta conexão é identificada através de um CID (*Connection Identifier*). Este bloco recebe uma MAC_SDU e produz uma MAC_SDU acrescida do CID da conexão a que a MAC pertence (MAC_SDU, CID);

• *Header Suppression* – Em algumas conexões é possível realizar a supressão do cabeçalho das MAC_SDUs, com o objetivo da reduzir o tráfego transmitido na rede. Neste bloco é possível habilitar a compressão de cabeçalho por CID. Portanto, o bloco guarda o estado de compressão para cada CID existente na SS. O bloco recebe uma (MAC_SDU, CID). O bloco possui dois funcionamentos possíveis: com compressão ou sem compressão. Caso haja compressão, o bloco gera uma MAC_SDU com campo PHSI (*Payload Header Suppression Index*) e informa o CID da conexão (C_MAC_SDU, CID). Caso não haja compressão, o bloco passa adiante a MAC_SDU recebida intacta e informa o CID da conexão (MAC_SDU, CID);

• *Per-CID Queuing Structure* – Este bloco armazena as MAC_SDUs que aguardam por processamento. Informações de classe de serviço poderão ser obtidas junto ao *Connection Manager* (S01). Para cada CID será implementada uma fila lógica FIFO;

• *Packing/Fragmentation Controler* – Este bloco executa os processos de *packing* e *fragmentation*. Após o processo de ajuste das MAC_SDUs o resultado é passado para o *BW Manager* (S02).

O controle do processo de *packing*, de MAC_SDUs em um único MAC_PDU, é realizado por CID, guardando o estado de *packing* para cada CID.

O controle do processo de fragmentação de MAC_SDU em várias MAC_SDUs também é realizado para cada CID. O funcionamento deste bloco fora descrito no algoritmo apresentado na BS.

Caso haja fragmentação, o bloco fragmenta a MAC_SDU recebido e transmite as diversas MAC_SDUs obtidas no processo, informando o CID de cada MAC SDU (MAC_SDU, CID). Neste caso, o tamanho dos fragmentos é definido em função da disponibilidade de banda alocada para cada CID de acordo com *BW Manager* da SS. A informação de banda disponível no *BW Manager* também poderá ser utilizada para tomar a decisão do tamanho dos fragmentos. Se a banda disponível for menor que o tamanho do SDU, ele precisa ser fragmentado. Caso a fragmentação não esteja habilitada, isto é, com SDU de tamanhos fixos, o SDU permanece na fila até que ele possa ser transmitido sem fragmentação.

Caso não haja fragmentação, o bloco envia a MAC_SDU recebida intacta e informa o CID da conexão (MAC_SDU, CID).

Caso haja *packing* para uma determinada conexão, este bloco agrupará várias MAC_SDUs em um único MAC_PDU. Neste caso, o 2º *bit* do campo Tipo do cabeçalho genérico da pré MAC_PDU deverá ser configurado com 1 ou 0, indicando a existência ou não de um subcabeçalho de empacotamento no *payload*, respectivamente.

Caso haja *packing* e *fragmentation*, o 4º *bit* do campo Tipo do cabeçalho genérico da pré MAC_PDU deverá ser configurado com 1 ou 0, indicando se o presente subcabeçalho de empacotamento ou fragmentação é estendido ou não, respectivamente.

Por fim, este bloco configura o campo CID (*Connection Identifier*, 16 *bits*) do cabeçalho genérico da pré MAC_PDU.

• *Encryption* – Não será implementado nenhum algoritmo de encriptação do *payload*. Entretanto, este bloco configura o campo EC (*Encriptation Control,* 1 *bit*), presente no cabeçalho do pré MAC_PDU, indicando que não houve encriptação (EC = 0).

• *MAC PDU Generator* – Este bloco é responsável por preencher os campos do cabeçalho do pré MAC_PDU, como indicado na Tabela 7, que ainda não tiverem sido preenchidos:

Tabela 7: Campos do cabeçalho do pré MAC PDU na SS.

Campo	Tamanho	Descrição
HT (*Header Type*)	1 *bit*	Indica que se trata de um cabeçalho genérico (HT = 0)
EC (*Encriptation Control*)	1 *bit*	Configurado no bloco *Encryption*
Tipo (6 *bits*)	6 *bits*	Indica que tipo de carga está sendo carregada no *payload*. Os seguintes *bits* estão presentes:
	O 1° *bit*	Indica a existência de um subcabeçalho *de Grant Management* no *payload*. Não é usado pela BS
	O 2°, 3° e 4° *bit*	Configurado no bloco *Packing/Fragmentation Controler*
	O 5° *bit*	Indica que o quadro possui no *payload* informações de relativas a retransmissão de quadros (ARQ). Será configurado para zero, indicando que o ARQ não está implementado.
	O 6° *bit*	Indica a existência de um sub-cabeçalho de *Mesh* no *payload*. Será configurado para zero, indicando que esta topologia não será implementada.
RSV (*Reserved*)	1 *bit*	*Bit* reservador para o futuro
CI (*CRC Indicator*)	1 *bit*	Indica se existe (CI = 1) ou não (CI = 0) um código CRC ao final da PDU. Estudos futuros mostrarão a viabilidade de implementação de CRC
EKS (*Encriptation Key Sequence*)	2 *bits*	Indica qual chave foi usada para encriptar o quadro. Ausente caso o campo EC = 0
LEN (*Lenght*)	11 *bits*	Tamanho total da MAC PDU. O tamanho máximo de uma MAC PDU é 2048 bytes (2 Kbytes)
CID (*Connection Identifier*)	16 *bits*	Identifica a que conexão pertence a MAC PDU. Configurado no bloco *Packing/Fragmentation Controler*
HCS (*Header Check Sequence*)	8 *bits*	Seqüência de verificação do cabeçalho. Contém o código CRC quando o campo CI = 1

• *Transmission Buffers* – Armazena as MAC_PDUs prontas para transmissão e as transmite de acordo com controle de tempo enviado pelo módulo *UL Map Manager* (S03);

3.3.2.2 Control Section

• *Inicialization, Auto-Configuration and Privacy Manager* – Na fase de inicialização, troca mensagens através das conexões de gerência com BS; Também inicia o procedimento de entrada na rede, conforme descrito na seção 2.2.1.

• *Connection Manager* – É responsável por gerenciar CIDs fornecidos pela BS. Configura o mapeamento SFID para CID no módulo *Classifier and Multiplexer* (S04) na direção de transmissão dentro da SS. Além disso, o CM armazena os parâmetros de QoS para o CID recém criada;

• *Connection Requester* (SFID) – Atua na geração de pedidos de fluxos de serviço que são enviados diretamente ao módulo CM da SS (S05), que posteriormente envia para o módulo CM da BS. Se o fluxo for aceito, ou seja, tornar-se ativo, a SS inicia o envio de tráfego de pacotes de acordo com o tipo de fluxo aceito. Isto é feito através do envio de um controle ao módulo *User Applications*. Além disto, avisa o módulo *Connection Manager* da SS que uma nova conexão foi aceita. Atua também na geração/manutenção dos parâmetros de QoS de cada fluxo.

• *Ranging* – Atua na medição da potência e do alcance do sinal até a BS. Serão modelados utilizando uma expressão analítica para OFDM. O resultado deste cálculo servirá de base para determinar qual o perfil será utilizado na PHY para *uplink*. Mudanças na condição do canal poderão ser geradas utilizando distribuições estatísticas. Através da troca de mensagens periódicas (*periodic ranging*) a BS é avisada sobre a mudança do perfil de *uplink*; Realiza também o *ranging* inicial;

• *UL Map Manager* – Recebe o UL MAP da BS e determina o momento em que cada MAC_PDU armazenada no *Transmission Buffers* será retirada da fila e enviada para a BS;

• *BW Manager* – Atua na negociação de banda com a BS. Cabe a SS, baseada nas informações recebidas da BS e na situação atual das requisições feitas, decidir a necessidade de uma nova requisição após a negação primária, e, em caso afirmativo, quando serão feitas. Na Seção 2.3 está explicado o funcionamento deste bloco. A SS poderá fazer requisições de banda individuais ou via *piggyback*. Dependendo da classe de escalonamento, requisições de banda serão feitas usando os mecanismos previstos nos itens 6.3.6.1 e 6.3.6.3 de [17]. No caso de repetir pedidos periodicamente, a SS deverá manter o intervalo de tempo adequado em função do tipo de tráfego gerado. As primeiras requisições serão feitas usando o mecanismo de contenção para OFDM, que define uma região para pedidos de banda no *UL subframe*. As requisições posteriores serão enviadas junto as MAC_PDUs. Para tanto, o *BW Manager* da SS envia os controles necessários ao módulo *MAC_PDU Generator* (S06). O processo de requisição e concessão de banda via MAC_PDUs na SS é modelado conforme o algoritmo:

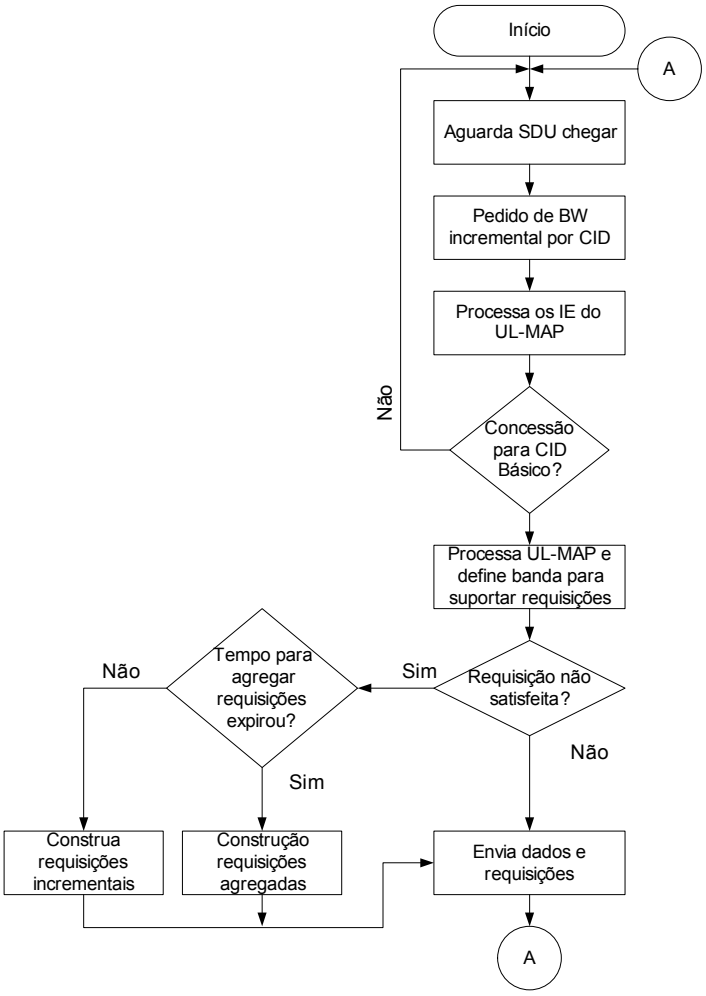


Figura 19: Algoritmo de concessão e requisição de banda [17].

Este algoritmo é iterativo e utilizado para conceder banda no *uplink*, portanto não envolve os módulos *downlink*. A decisão de concessão ou não é feita sob demanda toda vez que um SDU é recebido. Isto implica na leitura dos IEs (*Information Elements*) do UL MAP contendo as concessões já feitas. Em caso negativo, a requisição é descartada. As concessões são IEs que fazem parte do UL MAP. Cada IE contém o CID básico da SS que obteve a concessão, o tempo inicial que a estação pode transmitir e a duração da transmissão autorizada, conforme item 8.3.6.3 de [17]. Tanto o tempo de início, quanto a duração são em múltiplos de símbolos OFDM. O processo de atendimento de concessões deve ser implementado por quadro de camada física.

3.4 Modelo Específico de Simulação para o Processo de Ranging Inicial em uma Célula WiMAX

Nesta subseção é proposto e detalhado o modelo específico de simulação para o processo de *ranging* inicial. Aqui estão detalhados sucintamente os processos, tabelas e eventos que irão gerar o resultado descrito no Capítulo 4. Os valores dos parâmetros aqui descritos estão baseados, principalmente, em [17], [15], [09].

3.4.1 Ferramenta de Simulação Utilizada

O modelo foi implementado em um simulador de eventos discretos que ainda encontra-se em desenvolvimento. Entretanto, as funcionalidades necessárias a implementação deste trabalho estão totalmente funcionais. A concepção e validação do modelo específico para o simulador de eventos foi feita em conjunto com o orientador, que realizou a implementação do mesmo em C++. O orientador também é responsável pela implementação do simulador de eventos.

Neste simulador os modelos de simulação são construídos a partir de um único objeto chamado bloco (*Block*). A razão para isto é que, tanto os modelos quanto as funções, utilizarão a técnica de eventos discretos para operar. Dentro de cada bloco existirão blocos dependentes que executarão tarefas pré-definidas.

A ferramenta tem uma fila de eventos para executar processos. Cada bloco possui diversos processos internos derivados das instâncias dos objetos, no qual implementam ações que devem ser executadas quando da execução de um evento. Portanto, cada evento tem um tempo de execução e identificação de processos de origem e destino, relacionada as tarefas modeladas. Cada evento indica qual é o próximo processo que pode ser executado. Cabe ao processo, agendar novos eventos de acordo com o seu estado atual.

A ferramenta também tem uma estrutura de dados chamada *Table*. As tabelas são utilizadas para auxiliar no armazenamento de informações gerais temporárias e permanentes de cada bloco. Uma tabela é um dicionário duplo que suporta o armazenamento de qualquer tipo de dado. As informações armazenadas são acessadas a partir de dois índices, chamados de chaves. A

primeira chave armazena várias segundas-chaves, que por sua vez dão acesso as informações e parâmetros utilizados durante a simulação.

3.4.2 Visão Geral

Com o intuito de simular o processo de *ranging* inicial, é modelado e implementado este processo para uma célula WiMAX. Neste processo são detalhados os blocos, parâmetros, tabelas e eventos necessários para a extração de resultados para análise e servirão de subsídio para outros trabalhos. Na Figura 20 estão detalhados os blocos, processos e eventos existentes e desenvolvidos no trabalho de simulação proposto:

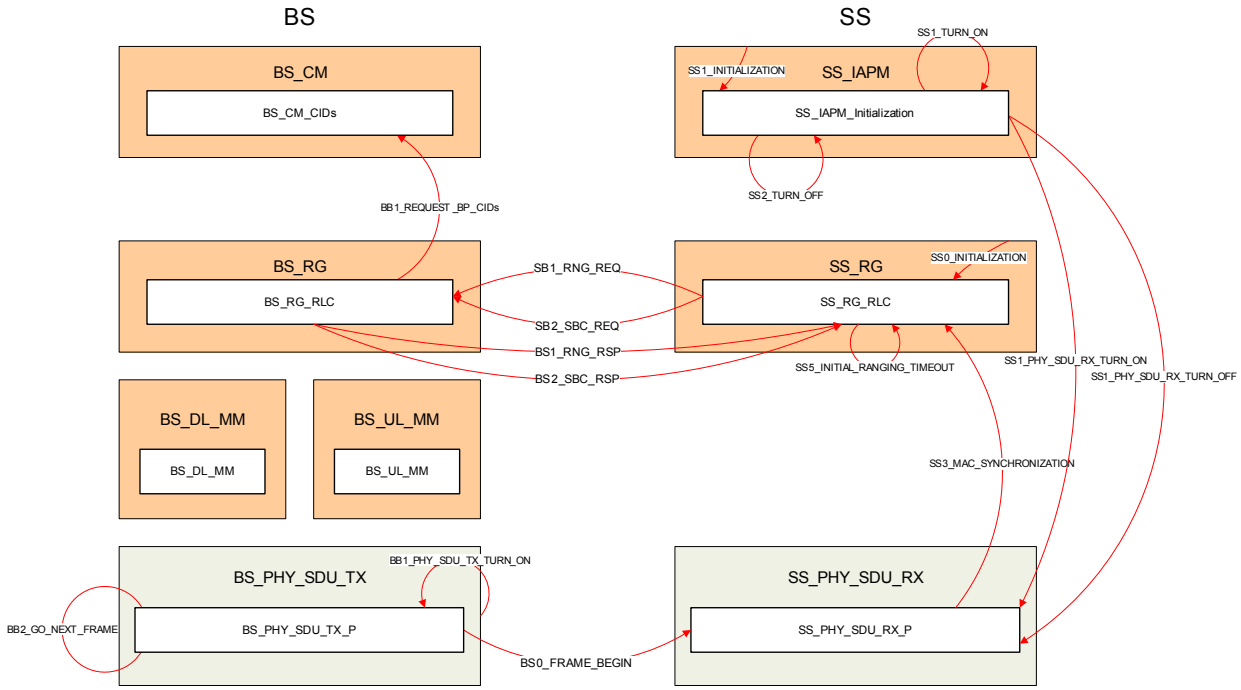


Figura 20: Simulação: Abstração do processo de *ranging* inicial [05].

Uma descrição destes componentes será feira nas próximas subseções. É importante salientar que o modelo específico é estruturado a partir do modelo geral, conforme Seção 3.3 e que as tabelas aqui utilizadas ou são abstrações do padrão IEEE 802.16d ou tabelas auxiliares desenvolvidas para facilitar e acelerar a tarefa de modelamento.

3.4.3 BS – *Base Station* (Estação Rádio Base)

Tem a função de representar uma BS WiMAX.

3.4.3.1 Dados privados

Os dados privados do bloco que implementa a BS no simulador são indicados na Tabela 8.

Tabela 8: Simulação: Dados privados da *Base Station*.

Nome:	**Valor Default:**	**Descrição:**
Name	"BS"	Nome da instância da BS.
Frame_Begin_Time	0	Guarda o instante de tempo em que começa um *frame* de camada física.
Frame_Number	0	Número do quadro PHY em transmissão.

3.4.3.2 Parâmetros

Os parâmetros indicados na Tabela 9 são variáveis utilizadas para representar a BS, contém parâmetros da célula WiMAX a ser simulada. Estes parâmetros foram cuidadosamente definidos a fim de capturar as características mais relevantes ao modelo específico.

Tabela 9: Simulação: Parâmetros da *Base Station*.

Chave 0:	**Chave 1:**	**Chave 2:**	**Valor Default:**	**Descrição:**
"BS_Parameters"	"Value" ou "Description"	MAC_Address	Valor definido de acordo com regra IEEE.	Endereço MAC de 48 *bits* da BS.
		X_Location	0	Abscissa da BS em metros.
		Y_Location	0	Ordenada da BS em metros.
		Bandwidth	2e+07	Largura de banda usada na PHY OFDM.
		Sampling_Frequency	2.33333e+07	Freqüência nominal (Fs) do OFDM. Calculado a partir de 7/6**Bandwidth*.
		DL_Subframe_Duration	0,5	Porcentagem do DL *Subframe* em função da duração do quadro de camada física.

Tabela 09: Simulação: Parâmetros da *Base Station*. (Continuação)

		UL_Subframe_Duration	0,5	Porcentagem do UL *Subframe* em função da duração do quadro de camada física.
		Physical_Slots	171.42857 ns	Duração de um *slot* físico (PS) conforme item 10.3.3.2 de [17]. Vale 4/Fs segundos.
		Maximum_Transmit_Power	63.5	A potência máxima que pode ser usada.
		FFT_Size	256	Para a *WirelessMAN-OFDM* vale sempre 256.
		Duplexing	"TDD"	Técnica de *duplexing* em uso.
		Next_Frame_Begin	0	Guarda o tempo de início do próximo quadro PHY de acordo com o relógio da BS.
		Frame_Duration	0,005	Duração do quadro de acordo com o campo "Frame_Duration_Code" da Tabela "BS_Channel" com Chave 1 "DCD". Em segundos.

3.4.3.3 Eventos

Como relatado em 3.4.1, este simulador irá gerar resultados a partir de eventos hierarquicamente organizados. Tais eventos irão gerir e incrementar os dados privados e parâmetros pré-definidos e gerar resultados para análise.

3.4.3.3.1 BS_CM – *Base Station Connection Manager*

O bloco BS_CM_CIDs tem a função de gerenciar os identificados de conexão, os CIDs. A Tabela 10 é uma abstração do armazenamento dos CIDs na BS e nas SSs e, vale salientar, que estes campos são adaptados para a execução da simulação, assim, alguns campos indicados não serão encontrados no padrão.

Tabela 10: Simulação: Abstração do armazenamento de CIDs na BS e nas SSs.

Abstração usada para guardar os CIDs na BS e nas SSs.				
Chave 0:	Chave 1:	Chave 2:	Valor Default:	Descrição:
"BS_CIDs"	#n, onde n é um número inteiro único usado para identificar este CID.	"Type"	"USER_CID"	Descreve o tipo de CID. "USER_CID" é CID alocado para um ou mais fluxos da SS. "BASIC_CID" é CID básico e "PRIMARY_CID" é CID primário. Este campo não existe no padrão.
		"SS"	#n, onde n é o número inteiro único usado para identificar uma dada SS.	Identifica o número da instância da SS.

Neste bloco, BS_CM_CIDs, o evento BB1_REQUEST_BP_CIDs (*SS Name*) terá a função de escolher um CID básico e um CID primário para a SS identificada através do *SS Name*. Após a definição destes, grava tais CIDs, na tabela "BS_CIDs" como "BASIC_CID" e "PRIMARY_CID", respectivamente. Estes CIDs poderão ser obtidos pelas SSs a partir de consultas a tabelas.

3.4.3.3.2 BS_RG – *Base Station Ranging*

Este bloco tem a função de monitorar a qualidade do enlace entre a BS e a SS. Armazenados nas Tabelas 11 e 12, os parâmetros das mensagens UCD e DCD são utilizados pelas SSs para determinar as características dos canais de *uplink* e *downlink*, respectivamente.

Tabela 11: Simulação: Parâmetros das mensagens UCD.

Abstração para a Tabela 349 de [17]: UCD *common channel encodings*. Abstração para a Tabela 352 de [17]: UCD PHY-*specific channel encodings* – WirelessMAN-OFDM.				
Chave 0:	Chave 1:	Chave 2:	Valor *Default*:	
"BS_Channel"	"UCD"	"BW_Request_Size"	10	
		"RG_Request_Size"	24	
		"Frequency"	5875000	

Conforme definido na Tabela 11 (referente as mensagens UCD), o campo "BW_Request_Size" define a duração em unidades de *slots* físicos (PSs) em que as SSs podem

transmitir requisições de banda usando CSMA. O campo “RG_Request_Size” define a duração de *slots* físicos (PSs) em que as SSs podem transmitir mensagens RNG_REQ. Estes campos têm o tamanho de 16 *bits* e estão definidos conforme item 4.2 de [15]. O campo “Frequency” tem o tamanho de 32 *bits* e indica o canal de *uplink* em kHz utilizado.

A Tabela 12 contém dados referentes às mensagens DCD.

Tabela 12: Simulação: Parâmetros das mensagens DCD.

Abstração para a Tabela 358 de [17]: DCD *channel encodings*.				
Chave 0:	Chave 1:	Chave 2:	Valor *Default*:	
“BS_Channel”	“DCD”	“BS_EIRP”	30	
		“TTG”	1	
		“RTG”	1	
		“RSS_IR_max”	-75	
		“Frequency”	5875000	
		“BS_ID”	Igual ao parâmetro “MAC_Address” da BS.	
		“Frame_Duration_Code”	2	

O campo “BS_EIRP” refere-se ao *Effective Isotropic Radiated Power* e é definido em múltiplos de 1 dBm. Está definido com o tamanho de 16 *bits* conforme item 4.1 de [15]. O campo “TTG” refere-se ao *Transmit/receive transition gap* em múltiplos de *slots* físicos (PSs). O campo “RTG” refere-se ao *Receive/transmit transition gap* e ambos são definidos com 8 *bits*. O campo “RSS_IR_max” refere-se ao *Receive Signal Strength* na BS utilizado no processo de *ranging* inicial. Este é definido em múltiplos de 1 dBm. O campo “Frequency” é um campo de 32 *bits* que define a freqüência central do *downlink* em kHz. O campo “BS_ID” é um campo de 48 *bits* que identifica a BS e, por fim, o campo “Frame_Duration_Code”, através de 8 *bits*, define a duração do quadro de camada física OFDM. Esta informação é retirada da tabela 232 de [17].

Com o intuito de associar as SS aos *UL-Burst* e *DL-Burst Profiles*, foram criadas tabelas para o relacionamento destes perfis.

Para *UL Burst Profile* a Tabela 13 descreve os campos existentes para identificar cada perfil.

Tabela 13: Simulação: Associação das SS às UL *Burst Profile*.

Tabela Criada para Associar SSs e ULBPs.				
Chave 0:	**Chave 1:**	**Chave 2:**	**Valor *Default*:**	
"SS_ULProfiles"	#n, onde n é um número inteiro único usado para identificar este registro.	"SS"	#n, onde n é um número inteiro único usado para identificar a SS.	
		"CID"	0	
		"ULBP_Index"	Valor conforme Tabela "BS_ULBPs"	
		"Type"	"INITIAL_RANGING"	
		"Current_Power"	30	

O campo "SS" identifica a SS e o campo "CID" identifica a conexão que está usando o perfil na SS. O campo "ULBP_Index" identifica o perfil de *uplink* em uso, de acordo com a Tabela 14, que será descrita a seguir. O campo "Type" descreve o tipo de perfil. Neste campo o valor "INITIAL_RANGING" é usado para o perfil de transmissão durante a fase de *ranging* inicial. Este perfil permanece disponível mesmo quando a SS está desligada. Para operação em regime, este campo adota o valor "OPERATIONAL". Finalizando, o campo "Current_Power" armazena a potência em uso no perfil em dBm.

Para *DL Burst Profile* a única modificação com relação a tabela *UL Burst Profile* é a substituição do campo "ULBP_Index" pelo campo "DLBP_Index".

Tabela 14: BS_ULBP – Perfil de *Uplink*.

Abstração para a Tabela 356 do padrão: UCD *burst profile encodings – WirelessMAN-OFDM*. Abstração para a Tabela 234 do padrão: OFDM *Uplink_Burst_Profile format*.				
Chave 0:	Chave 1:	Chave 2:	Valor Default:	
"BS_ULBPs"	UIUC	"PHY_Mode"	20	
		"Last_Modified"	0	

O campo "PHY_Mode", 8 *bits* identifica o valor do campo *FEC Code Type* de acordo com o padrão. Os valores permitidos podem ser encontrados na Tabela 356 de [17]. O valor 20 indicado, refere-se à um perfil indefinido. O campo "Last_Modified" identifica o instante em segundos da última modificação feita no registro.

A Tabela 15, logo a seguir, identifica o perfil de *downlink* sugerido as SSs.

Tabela 15: BS_DLBP – Perfil de *Downlink*.

Abstração para a Tabela 359 de [17]: *DCD PHY-common burst profile encodings*. Abstração para a Tabela 362 de [17]: *DCD burst profile encodings – WirelessMAN-OFDM*. Abstração para a Tabela 233 de [17]: *OFDM Downlink_Burst_Profile format.*				
Chave 0:	Chave 1:	Chave 2:	Valor Default:	
"BS_DLBPs"	DIUC	"Frequency"	0	
		"PHY_Mode"	20	
		"DIUC_EXIT"		
		"DIUC_ENTRY"		
		"Last_Modified"	0	

O campo "Frequency", de 32 *bits*, indica a freqüência na direção de *downlink* em kHz. O campo "PHY_Mode", de 8 *bits*, identifica o valor do campo *FEC Code Type* de acordo com o padrão. Os valores permitidos podem ser encontrados na Tabela 356 de [17]. O valor 20 indicado, refere-se à um perfil indefinido.

O campo "DIUC_EXIT", de 8 *bits*, indica o CINR (*Carrier to Interference and noise ratio*) acima do qual um perfil menos robusto deve ser usado. O campo "DIUC_ENTRY" indica o CINR acima do qual um perfil menos robusto deve ser usado. Tanto no "DIUC_EXIT", quanto no "DIUC_ENTRY" os valores a eles atribuídos são dados em múltiplos de 0,25 dB e na faixa de 0 a 63,5 dB. Em [17], a Figura 81 pode oferecer maiores detalhes.

O campo "Last_Modified" indica o instante em segundos da última modificação feita neste registro.

Identificados os parâmetros necessários para a simulação do ambiente, são modeladas as mensagens trocadas entre os dispositivos quando do processo de *ranging* inicial.

Na Tabela 16, o campo "Type", de 8 *bits*, identifica o tipo de mensagem de gerência que está sendo trocada. O campo "Total_Length" identifica o tamanho total em *bits* da mensagem transmitida. O campo "ULProfiles_Index" identifica o perfil de *uplink* usado para transmitir a mensagem, de acordo com a tabela "SS_ULProfiles" da BS.

Neste bloco alguns eventos se revezam durante a simulação, utilizando-se dos parâmetros e dados privados anteriormente descritos para a execução dos processos. Desta forma, os eventos

executados pelo RLC da BS e SS serão identificados e comentados. Inicialmente, tem-se o evento BB0_INITIALIZATION, que cria os eventos deste processo.

Tabela 16: Simulação: Formato da mensagem RNG_REQ.

Abstração para a Tabela 19 de [17]: RNG-REQ *message format*.				
Chave 0:	**Chave 1:**	**Chave 2:**	**Valor Default:**	
"RNG-REQ_M".	#n, onde n é um número inteiro único usado para identificar este registro.	"Type"	4	
		"Total_Length"	Usar tamanho default definido no padrão.	
		"ULProfiles_Index"	Valor conforme Tabela "SS_ULProfiles" da BS"	

O evento SB1_RNG_REQ verifica o quão adequada está a potência usada pela SS. Este processo é realizado a partir do perfil de *ranging* inicial utilizado pela SS, informação esta encontrada na tabela "SS_ULProfiles". Concluída esta verificação, pode-se obter três resultados. Caso o perfil utilizado no *ranging* esteja adequado, inicia-se a fase de definição dos CIDs básico e primário por meio do evento BB1_REQUEST_BP_CIDs. Cria-se um perfil operacional na Tabela "SS_ULProfiles" com tipo "OPERATIONAL" a partir do perfil usado no *ranging* e agenda-se o evento BS1_RNG_RSP para o instante atual acrescido do valor [UL_Subframe_Duration * Frame_Duration], indicando que a fase de *ranging* acabou. Outro resultado que pode ser encontrado é a modificação do perfil de *ranging* inicial junto a Tabela "SS_ULProfiles". Por fim, este evento pode nada fazer, pois o sinal com potência usado na mensagem RNG_REQ seria tão fraco que não fora recebido com sucesso na BS. Neste caso, ocorrerá *timeout* na SS, e esta fará alterações no perfil.

O evento BB1_REQUEST_BP_CIDs solicita os CIDs básico e primário para a SS junto ao processo BS_CM. O evento BS1_RNG_RSP avisa a SS que o processo de *ranging* inicial foi finalizado.

O evento BB2_RLC periodicamente realizará a monitoração do enlace. Os intervalos entre os monitoramentos são dados pelo parâmetro RLC_Period da BS. Caso a qualidade da comunicação com alguma SS no *uplink* estiver deteriorado, este evento alterará o perfil operacional na Tabela "SS_Profiles" com o tipo "OPERATIONAL". O *ranging* periódico não é implementado nesta versão do trabalho.

O evento SB2_REQUEST_DL_PROFILE_CHANGE decidirá se a requisição de mudança de perfil de *downlink* será realizada. Caso positivo, irá alterar o perfil operacional na Tabela "SS_DLProfiles" com o tipo "OPERATIONAL".

O evento SB2_SBC_REQ assume que a SS suporta as decisões tomadas pela BS. Neste caso, o evento BS2_SBC_RSP é acionado e indica que a fase de negociação de capacidades básicas está finalizada.

3.4.3.3.3 BS_PHY – Base Station PHY SDU Transmiter

O bloco *BS PHY – Base Station PHY SDU Transmiter* conta com 3 eventos. O evento BB1_INITIALIZATION cria o evento BB0_GO_NEXT_FRAME. Este evento determina o avanço para um novo quadro de camada física. Trata-se de um evento em laço que executa o processo BS_PHY_SDU_TX_P no instante 0 (zero) e sucessivamente a cada intervalo de tempo com valor igual a duração de um quadro de camada física indicado no campo "Frame_Duration" da Tabela "BS_Parameters". Este evento também agendará o evento BS0_FRAME_BEGIN. O evento BS0_FRAME_BEGIN informa para todas as SS da rede que um novo quadro de camada física está sendo iniciado. Desta forma, cada SS obterá o sincronismo de tempo em relação a BS.

3.4.4 *Subscriber Station*

Tem a função de representar uma SS WiMAX.

3.4.4.1 Parâmetros

A Tabela 17 identifica e agrupa os parâmetros básicos referentes a localização e identificação de uma SS. Os parâmetros referentes ao atraso de propagação também são definidos nesta tabela, e levados em consideração durante a simulação, tentando criar um ambiente mais próximo da realidade.

Tabela 17: Simulação: Parâmetros da SS.

Chave 0:	Chave 1:	Chave 2:	Valor Default:	Descrição:
"SS_Parameters"	"#n", onde n é um número inteiro único usado para identificar este registro.	"MAC_Address" (500)	Valor fixo definido de acordo com regra IEEE.	Endereço MAC de 48 *bits* da SS.
		"X_Location" (1000)	Valor fixo entre 0 e 1000 metros	Abscissa da SS em metros.
		"Y_Location" (1000)	Valor fixo entre 0 e 1000 metros.	Ordenada da SS em metros.
		"Type"	"FIXED"	Descreve o tipo de SS. As opções são: "FIXED" e "MOBILE".
		"Timing_Offset"	5.6568 µs	Diferença de relógio com a BS.
		"Propagation_Delay"	5.6568 µs	Atraso de propagação entre SS e BS em segundos.
		"Propagation_Path"	1414.2135	Distância entre SS e BS em metros.

3.4.4.2 Eventos

3.4.4.2.1 SS_IAPM – Subscriber Station Initialization, Auto Configuration and Privacy Management

Na Tabela 18 estão identificados os parâmetros referentes ao modo e tempo de sincronização da SS em função da BS. Os dois parâmetros relativos a períodos foram definidos empiricamente, enquanto os dois últimos parâmetros foram configurados a partir de [17].

Tabela 18: Simulação: Parâmetros do evento SS_IAPM.

Chave 0:	Chave 1:	Chave 2:	Valor Default:	
"SS_IAPM_Parameters"	"#n", onde n é um número inteiro único igual ao índice da instância do bloco IAPM.	"Status"	0	
		"Mean_ON_Period"	1800 segundos como média da distribuição exponencial negativa.	
		"Mean_OFF_Period"	7200 segundos como média da distribuição exponencial negativa.	
		"PHY_Syncronization_Period"	7	
		"MAC_Syncronization_Period"	4	

O campo "Status" pode receber o valor 0 (zero) ou 1 (um), indicando que a SS está desligada ou ligada, respectivamente. O campo "Mean_ON_Period" indica a média de tempo, em segundos, em que a SS permanece ligada. O campo "Mean_OFF_Period" indica a média de tempo, também em segundos, em que a SS permanece desligada. O campo

“PHY_Syncronization_Period” indica o número de quadros de camada física necessários para o processo de sincronização da camada PHY e *power-up* da SS. O campo “MAC_Syncronization_Period” indica o número de quadros de camada física necessários para a sincronização da camada MAC. Estas duas informações estão baseadas na Tabela 114 de [17].

Neste bloco dois eventos são necessários. O evento SS1_TURN_ON liga a estação. A estação permanecerá ligada durante o período de tempo definido pelo parâmetro “Mean_ON_Period”, como indicado anteriormente. Após a ligação da estação, esta agendará o evento SS1_PHY_SDU_RX_TURN para o processo SS_PHY_SDU_RX.

O evento SS2_TURN_OFF desliga a estação. A estação permanecerá desligada durante o período dado pelo parâmetro “Mean_OFF_Period”. Também enviará o evento SS1_PHY_SDU_RX_TURN_OFF.

3.4.4.2.2 SS_RG_RLC

Este bloco tem a função de monitorar e enviar a requisição de mudança de perfil do enlace, quando necessário. Da mesma forma que nos outros blocos, utiliza-se de dados privados, parâmetros e eventos para este processo. O “Initial_Ranging_Status” é um dado privado que indica a conclusão da fase de *ranging* inicial. O valor padrão é 1 (um), que indica a finalização do processo. 0 (zero) indica que não. O “RNG_REQ_Time” indica o instante de tempo em que a mensagem RNG_REQ deve ser enviada à BS.

Os parâmetros deste bloco estão indicados na Tabela 19.

Tabela 19: Simulação: Parâmetros de SS_RG_RLC.

Chave 0:	**Chave 1:**	**Chave 2:**	**Valor Default:**	
“SS_RG_RLC_ Parameters”	“#n”, onde n é um número inteiro usado para identificar este registro.	“RLC_Period”	10^{-3}	
		“Initial_Ranging_Timeout”	0,2	

O campo “RLC_Period” indica, em segundos, os intervalos entre as verificações da qualidade de enlace. O campo “Initial_Ranging_Timeout” indica o intervalo de tempo para uma

nova tentativa de *ranging* inicial. Este parâmetro está em conformidade com a Tabela 342 de [17].

Os eventos relacionados a este bloco estão diretamente relacionados ao processo de *ranging*. O evento SS0_INITIALIZATION cria os demais eventos deste processo.

O evento SS3_MAC_SYNCRONIZATION aguarda a sincronização MAC da SS. O número de quadros necessários para a sincronização da MAC é dado pelo parâmetro "MAC_Syncronization_Period". A sincronização é obtida a partir da contagem de um certo número de quadros PHY. Assim, é calculado o instante de tempo em que será iniciado o quadro PHY imediatamente após a sincronização da MAC (t0). Este evento também é responsável por calcular a potência a ser utilizada na transmissão do *ranging* inicial. O cálculo é realizado a partir dos campos presentes na Tabela "BS_Channel" com Chave 1 igual a "DCD".

O cálculo considera a potência das mensagens recebidas da BS no início do quadro. Para tanto, deve-se considerar o perfil *default* usado pela BS para transmitir estas mensagens para a SS. Esta informação é obtida através da Tabela "SS_DLProfiles" e os resultados dos cálculos são registrados na Tabela "SS_ULProfiles".

A potência usada na primeira transmissão é calculada de acordo com o item 6.3.9.5.1 de [17] e é baseado na seguinte fórmula:

$$P_{TX_IR_MAX} = EIRxP_{IR,\max} + BS_EIRP - RSS \qquad \textbf{(1)}$$

Onde, $EIRxP_{IR,\max}$ e BS_EIRP são obtidos de uma mensagem DCD. RSS é a potência de transmissão da BS medido pela SS. $EIRxP_{IR,\max}$ é a máxima potência isotrópica equivalente recebida da BS. Esta potência é computada como:

$$EIRxP_{IR,\max} = RSS_{IR,\max} - GANT_BS_Rx \qquad \textbf{(2)}$$

Onde, $RSS_{IR,\max}$ é a potência do sinal recebido na saída da antena (BS), presente na mensagem DCD, e $GANT_BS_Rx$ é o ganho da antena. BS_EIRP é o a potência isotrópica equivalente irradiada da BS. Esta potência é computada

$$BS_EIRP = P_{Tx} + GANT_BS_Tx \qquad \textbf{(3)}$$

Onde, P_{Tx} é a potência transmitida pela BS e $GANT_BS_Tx$ é o ganho da antena (BS). A máxima potência transmitida é limitada pela equação **(1)**.

Ainda sob responsabilidade do evento SS3_MAC_SYNCRONIZATION, a perda de percurso (*path loss*), é calculada com base na seguinte fórmula, derivada da fórmula de Friis [09]:

$$PL = 20\log f + 20\log d + 32{,}44 \text{ dB} \qquad \textbf{(4)}$$

Onde, **f** é o canal de freqüência em MHz e **d** é a distância em quilômetros entre a BS e a SS.

Seja **k** um valor aleatório inteiro uniformemente distribuído entre 1 e o valor dado pelo campo "RG_Request_Size" da Tabela "BS_Channels" com Chave 1 igual a "UCD". O instante de tempo de uma requisição de *ranging* inicial é calculado como:

$$RNG_REQ_Time = t0 + \text{“DL_Subframe_Duration”} + (\text{“TTG”} + k) * \text{“Physical_Slot”} \qquad \textbf{(5)}$$

Um evento SB1_RNG_REQ é agendado para este instante de tempo com objetivo de verificar se haverá sucesso no *ranging* inicial. Agenda-se também o evento SS5_INITIAL_RANGING_TIMEOUT de acordo com parâmetro "Initial_Ranging_Timeout". Note que o *Timing offset* é subtraído e depois adicionado no RNG_REQ_Time, pois a sincronização PHY já foi concluída.

Outro evento deste bloco é o SB1_RNG_REQ que verifica se o processo de *ranging* inicial terá êxito. O evento BS1_RNG_RSP altera o dado privado "Initial_Ranging_Status" para 0 (zero), indicando que a SS terminou a fase de *ranging* inicial. Concluído este processo, dá início a fase de negociação de capacidades através do agendamento do evento SB2_SBC_REQ.

Concluindo os eventos relacionados a este bloco, o evento SS5_INITIAL_RANGING_TIMEOUT verifica se a resposta ao *ranging* inicial foi recebida com sucesso. Em caso negativo, aumenta a potência de transmissão, ajusta o perfil usado no *ranging* inicial e envia novo evento SB1_RNG_REQ, cujo tempo é calculado da mesma forma que no evento SB1_RNG_REQ. Caso positivo, não faz nada.

3.4.4.2.3 SS_PHY_SDU_RX – Subscriber Station PHY SDU Receiver

Este bloco é uma abstração simplória da camada PHY da SS. Possui um contador que mantém o número de quadros de camada física recebidos após a SS ser ligada. Este contador é o dado privado "PHY_Frames_Counter".

O evento SS1_PHY_SDU_RX_TURN_ON serve para criar o evento BS0_FRAME_BEGIN.

O evento BS0_FRAME_BEGIN informa para a SS que um novo quadro de camada física está sendo iniciado. Calcula o atraso de propagação até a BS utilizando os parâmetros "X_Location" e "Y_Location" da SS. Este valor é atualizado o dado privado "Timing_Offset".

Se o dado privado "Initial_Ranging_Status" estiver indicado com o valor 0 (zero), verifica se o dado privado "PHY_Frame_Counter" é igual ao parâmetro "PHY_Syncronization_Period". Em caso positivo, o sincronismo da camada PHY é dado como alcançado e o evento SS3_MAC_SYNCRONIZATION é enviado ao processo SS_RG_RLC. Caso os valores sejam diferentes, aguarda o próximo evento BS0_FRAME_BEGIN.

De acordo com o item 6.3.9.1 de [17] a PHY da SS avisa a MAC da SS que a sincronização PHY foi obtida. Logo, o instante de agendamento do evento SS3_MAC_SYNCRONIZATION contabiliza o tempo necessário para a sincronização da camada física.

O evento SS1_PHY_SDU_RX_TURN_OFF remove o evento BS0_FRAME_BEGIN.

Elencados todos os blocos, eventos, parâmetros e tabelas existentes no modelo específico de simulação, no próximo capítulo estão apresentados os resultados obtidos junto ao simulador, já descrito anteriormente. Os parâmetros aqui elencados foram submetidos ao simulador para uma execução seqüencial.

4. RESULTADOS OBTIDOS COM O MODELO ESPECÍFICO

A validação do modelo é feita através da análise de uma seqüência de eventos entre uma única SS e a BS. O objetivo é verificar se o funcionamento descrito na Subseção 3.4 está de acordo com as funcionalidades previstas no padrão [17]. Isto é feito a partir da análise das ações executadas e dos seus relativos instantes de tempo, bem como através da verificação de valores de parâmetros conforme previstos no padrão e artigos de referência.

A Figura 21 mostra uma tela capturada do simulador durante a simulação do evento BS0_FRAME_BEGIN quando a sincronização da PHY é alcançada e executa-se o primeiro evento de sincronização da MAC (SS3_MAC_SYNCHRONIZATION).

Efetuando-se uma leitura linear da figura supracitada, pode-se verificar a execução do evento BB2_GO_NEXT_FRAME no instante de tempo 35 ms, referente ao processo BS_PHY_SDU_TX_P do bloco BS_PHY_SDU_TX. Este processo agenda dois novos eventos: BB2_GO_NEXT_FRAME para executar o processo BS_PHY_SDU_TX_P no instante 0,04 segundos e o evento BS0_FRAME_BEGIN para executar o processo SS_PHY_SDU_RX_P no instante 0,035 segundos.

Na seqüência, o evento BS0_FRAME_BEGIN é executado. É possível se visualizar a definição do atraso de propagação (Timing_Offset), do campo “Initial_Ranging_Status” cujo valor é 1 (um), como indicado na Subseção 3.4.4.2.2. Também é possível se visualizar que a sincronização PHY fora concluída e o número de quadros que foram necessários para a conclusão desta etapa foi 7.

No instante 0,035 segundos o evento SS3_MAC_SYNCRONIZATION é executado no processo SS_RG_RLC do bloco SS_RG. Pode-se identificar as variáveis indicadas na seção anterior e as variáveis auxiliares utilizadas para o processo de sincronização da MAC. Ainda de acordo com a Subseção 3.4.4.2.2, as variáveis necessárias para o cálculo da potência de transmissão são definidas. É agendada a execução do evento SB1_RNG_REQ no instante 57,50 milissegundos, e as variáveis e dados privados são declarados. Pode-se observar os campos oriundos da Seção 3.4.3.3.2. Ainda linearmente, identifica-se a potência irradiada pela BS (BS_EIRP), a potência esperada pela BS (RSS_IR_max), a freqüência, a distância entre os

dispositivos, a variável DLPL, utilizada para cálculo da perda de percurso, a variável RSS, que é a máxima potência que a SS pode transmitir (PTX_IR_MAX), a potência corrente da SS, a potência esperada pela BS e as atualizações nos campos deste processo. Vale salientar que, por definição, o modelo inicia a transmissão aquém do valor máximo possível.



Figura 21: Simulação: Tela da ferramenta quando a sincronização PHY é alcançada e agenda-se final da sincronização MAC.

A Figura 22 mostra que no instante 50 milissegundos é executado o evento BS0_FRAME_BEGIN do processo SS_PHY_SDU_RX_P e bloco SS_PHY_SDU_RX.. O atraso de propagação permanece o mesmo, uma vez que a SS não se movimenta ao longo da simulação. O contador "PHY_Frames_Counter" continua sendo incrementado de acordo com execução da simulação.

No instante 55 milissegundos, quando da execução do evento BB2_GO_NEXT_FRAME, é possível se visualizar novamente o agendamento do par de eventos BB2_GO_NEXT_FRAME, para o instante 60 ms, e BS0_FRAME_BEGIN, para o instante 55 ms, da mesma forma que ocorrido no instante 35 ms. Logo em seguida, ainda no instante 55 ms, o evento BS0_FRAME_BEGIN é novamente executado.

No instante 57,501 milissegundos, como agendado no instante 35 milissegundos, é executado o evento SB1_RNG_REQ. Mais um vez é possível se verificar o processo e o bloco acionados a partir deste evento. A perda de percurso é calculada utilizando-se a expressão (4): ULPL = 110,83 dBm. A potência do sinal recebido é calculada em -105 dBm. Neste ponto, o processo BS_RG_RLC verifica a necessidade de incremento de potência, objetivando alcançar uma potência ótima de transmissão na SS. O modelo decide que é necessário incrementar a potência, pois os valores neste momento apresentados não alcançaram o limiar de qualidade definido em -95 dBm. Por definição para este simulador, o ajuste de potência é dado em intervalos de 5 dBm e o limite de qualidade de recepção da BS é de -95 dBm. Sendo assim, estes são os valores que limitam esta simulação.

Na seqüência, é agendada uma nova execução do evento BS1_RNG_REQ no instante 61,85 milissegundos, que encaminhará à BS uma nova requisição de *ranging* inicial. Observe que o valor 61,85 milissegundos é um valor uniformemente distribuído entre 60 milissegundos, que é o inicio deste quadro na BS, e 62,5 ms, que é o final da porção de *downlink* deste quadro PHY.

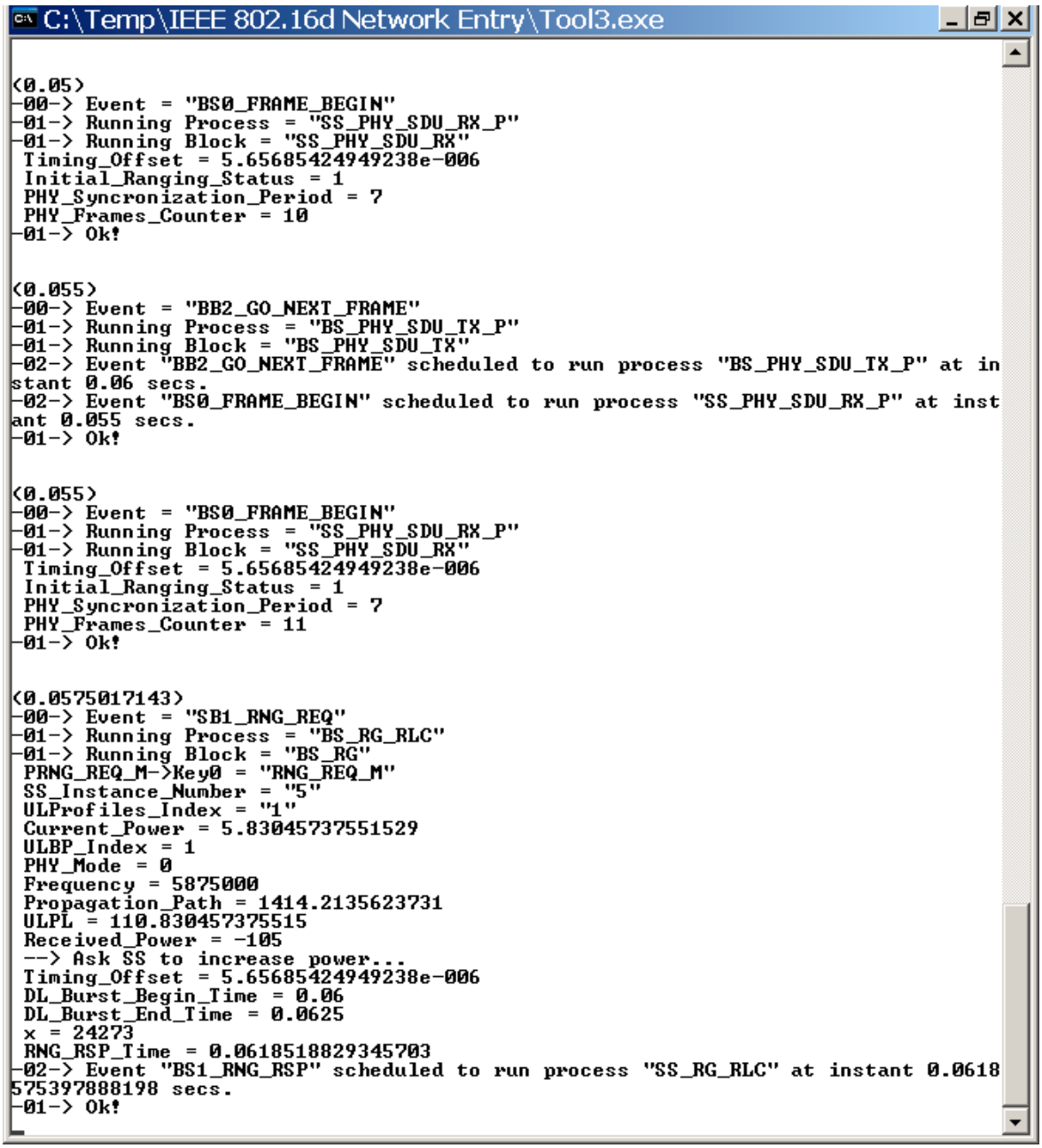


Figura 22: Simulação: Tela da ferramenta quando primeira requisição RNG-REQ é processada na BS.

A Figura 23 mostra a primeira resposta RNG-RSP processada na SS, conforme agendamento mostrado na Figura 22. Novamente, os eventos BB2_GO_NEXT_FRAME e BS0_FRAME_BEGIN são executados. No instante 61,85 milissegundos, as variáveis do processo SS_RG_RLC são recalculadas para que, um incremento na potência da SS seja

realizado. O ajuste de potência é feito em 5 dBm, como mostra a variável "Power_Level_Adjust". O evento SB1_RNG_REQ é agendado para ser executado no instante 64,36 milissegundos, conforme fórmula (5). Mais uma vez a BS analisará a qualidade da recepção para que o processo de *ranging* inicial seja concluído.



Figura 23: Simulação: Tela da ferramenta quando primeira resposta RNG-RSP é processada na SS.

A Figura 24 mostra o instante em que a última RNG-RSP de incremento da potência corrente é processado na SS e o instante em que o nível de potência desejado foi alcançado pela SS, finalizando o processo de *ranging* inicial. É possível se visualizar no instante 70,49 milissegundos a última vez em que é efetuado o incremento da potência (5 dBm) com a finalidade de se chegar a potência ajustada. No instante 73 milissegundos é possível se visualizar que a potência ajustada de transmissão da SS e a potência ajustada de recepção na BS foram alcançadas. Com 20,83 dBm de transmissão na SS e -90 dBm de recepção na BS o modelo concluiu que a potência de transmissão da SS foi ajustada adequadamente. Isto é mostrado a através da expressão "*UL Power is Ok*".

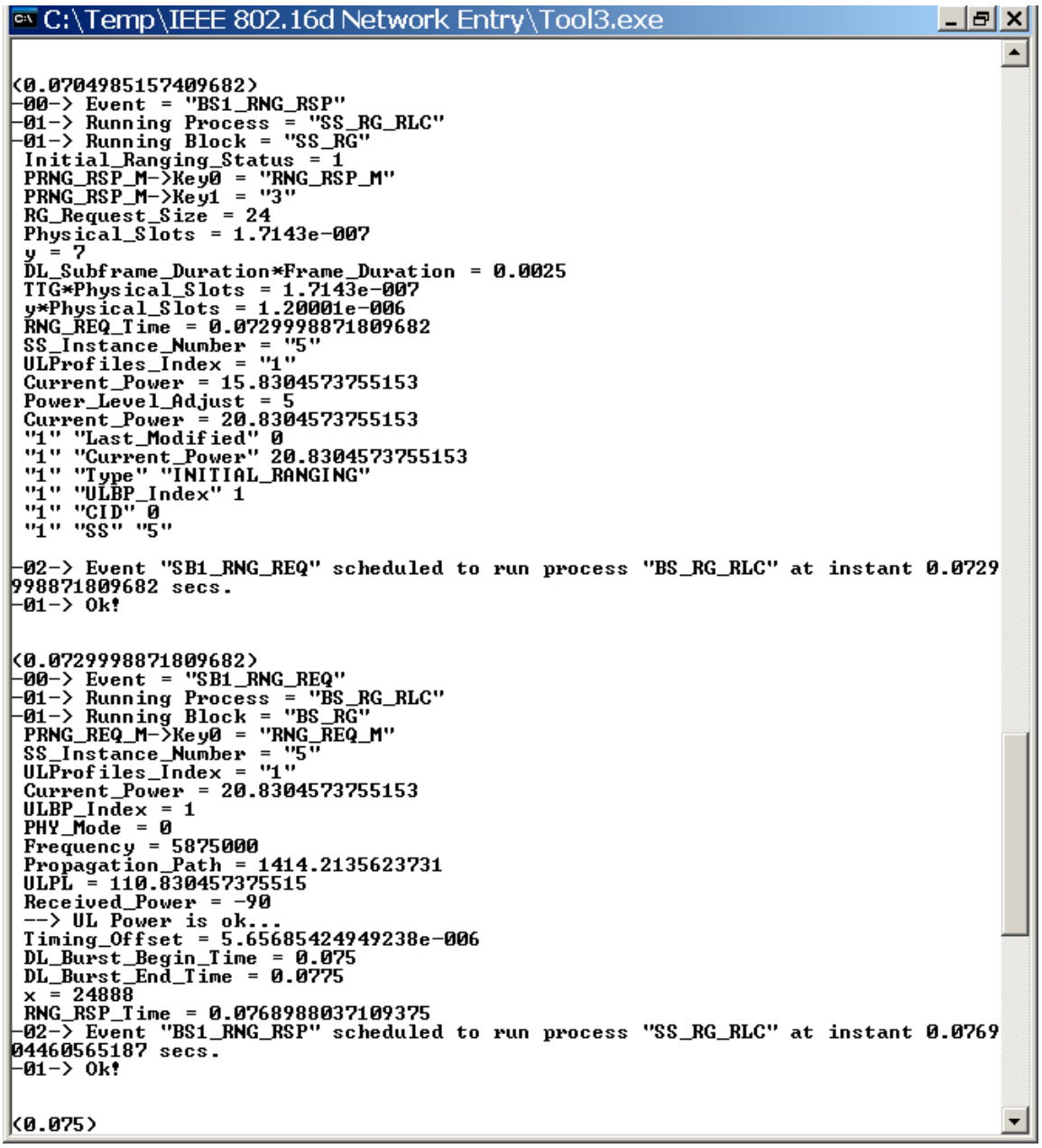


Figura 24: Simulação: Tela da ferramenta quando: a) última resposta RNG-RSP processada na SS antes de se atingir a potência adequada. b) potência adequada atingida na BS.

É importante salientar que os valores de tempo indicados nas figuras anteriores são variáveis quando de uma segunda simulação, uma vez que são utilizadas variáveis aleatórias, perfazendo assim, um universo de resultados possíveis. Ainda assim, é notório que os valores irão alterar ligeiramente os resultados, mas manter-se-ão as ações e suas conseqüências em cada etapa da entrada de uma SS na rede.

Para melhorar o entendimento da execução dos eventos, são apresentadas nas próximas tabelas um sumário de todas as principais ações executadas até 0,1 segundos, que é o tempo total de simulação necessário para a comprovação de funcionamento. Em cada linha destas tabelas, estão identificados os tempos gastos para a execução e resposta dos eventos envolvidos. Começa-se pelos eventos processados durante a etapa de sincronização da PHY, conforme mostrado na Tabela 20.

Tabela 20: Simulação: Eventos durante fase de sincronização da PHY.

Tempo (ms)	Evento	Processo chamado	Ação executada
0	BB1_PHY_SDU_TX_TURN	BS_PHY_SDU_TX_P	BS inicia o transmissor PHY;
0	SS1_INITIALIZATION	SS_IAPM_INITIALIZ.	SS cria eventos;
0	SS0_INITIALIZATION	SS_RG_RLC	SS cria eventos;
0	BB2_GO_NEXT_FRAME	BS_PHY_SDU_TX_P	Avança para um novo frame na camada PHY;
0	SS1_TURN_ON	SS_IAPM_INITIALIZ.	Inicia SS;
0	SS1_PHY_SDU_RX_TURN_ON	SS_PHY_SDU_RX_P	SS inicia o receptor PHY. Sincronização PHY é iniciada;
0,5	BB2_GO_NEXT_FRAME	BS_PHY_SDU_TX_P	Avança para um novo frame na camada PHY;
0,5	BS0_FRAME_BEGIN	SS_PHY_SDU_RX_P	BS informa a SS que um novo frame PHY começou. Quando a SS recebe este evento, este computa o atraso de propagação;
10 – 30	-	-	Aqui existem 5 eventos consecutivos, BS0_FRAME_BEGIN e BB2_GO_NEXT_FRAME, referentes a 5 frames PHY;
35	BB2_GO_NEXT_FRAME	BS_PHY_SDU_TX_P	Avança para um novo frame na camada PHY;
35	BS0_FRAME_BEGIN	SS_PHY_SDU_RX_P	A sincronização PHY é concluída;

No processo de sincronização da MAC, indicado na Tabela 21, os seguintes eventos foram processados:

Tabela 21: Simulação: Eventos durante fase de sincronização da MAC.

Tempo (ms)	Evento	Processo chamado	Ação executada
35	SS3_MAC_SYNCHRONIZATION	SS_RG_RLC	SS inicia a sincronização MAC. Esta é finalizada 4 frames PHY a frente;
40 – 50	-	-	Aqui existe 3 eventos consecutivos, BS0_FRAME_BEGIN e BB2_GO_NEXT_FRAME, referentes a 3 frames PHY;
55	BB2_GO_NEXT_FRAME	BS_PHY_SDU_TX_P	Avança para um novo frame na camada PHY;

Tabela 21: Simulação: Eventos durante fase de sincronização da MAC. (continuação)

55	BS0_FRAME_BEGIN	SS_PHY_SDU_RX_P	A Sincronização MAC é concluída. O evento SB1_RNG_REQ é agendada para executar BS_RG_RLC no RNG_REQ_Time. A primeira transmissão de potência da SS foi 5,83 dBm. A perda de percurso foi calculada como 110,83dBm;

Durante a fase de *ranging* inicial, indicados na Tabela 22, os eventos processados foram:

Tabela 22: Simulação: Eventos durante fase *ranging* inicial.

Tempo (ms)	Evento	Processo chamado	Ação executada
57,50	SB1_RNG_REQ	BS_RG_RLC	BS recebe a primeira mensagem RNG_REQ. A potência recebida fora estimada em -105dBm. Este valor está abaixo de -95dBm, o qual é o alvo da potência recebida na BS. A BS pergunta se a SS quer aumentar a potência em +5dBm. BS agenda o evento BS1_RNG_RSP para executar o processo SS_RG_RLC no instante 61,85 milissegundos;
60	BB2_GO_NEXT_FRAME	BS_PHY_SDU_TX_P	Avança para um novo frame na camada PHY;
60	BS0_FRAME_BEGIN	SS_PHY_SDU_RX_P	BS informa a SS que um novo frame PHY fora iniciado;
61,85	BS1_RNG_RSP	SS_RG_RLC	SS ajusta a potência em +5dBm e transmite uma nova mensagem RNG_REQ no mesmo frame PHY. A potência foi calculada em 10,83 dBm;
64,36	SB1_RNG_REQ	BS_RG_RLC	BS envia uma nova mensagem RNG-REQ. O sinal recebido é -100dBm. Novamente a BS decide que a potência não é suficiente. BS agenda o evento BS1_RNG_RSP para executar o processo SS_RG_RLC no instante 67,31 milissegundos;
70	BB2_GO_NEXT_FRAME	BS_PHY_SDU_TX_P	Avança para um novo frame na camada PHY;
70	BS0_FRAME_BEGIN	SS_PHY_SDU_RX_P	BS informa a SS que um novo frame PHY fora iniciado;
70,49	BS1_RNG_RSP	SS_RG_RLC	SS ajusta a potência em +5dBm e transmite uma nova mensagem RNG_REQ no mesmo frame PHY. A potência foi calculada em 20,83045dBm;

Tabela 22: Simulação: Eventos durante fase *ranging* inicial. (Continuação)

72,99	SB1_RNG_REQ	BS_RG_RLC	BS envia uma nova mensagem RNG-REQ. O sinal recebido é -90dBm. A potência está OK. BS agenda o evento BS1_RNG_RSP para executar o SS_RG_RLC no instante 0,0769044 segundos. BS envia RNG_RSP com SS MAC Address e Ranging_Status = 3, o qual significa que o processo de ranging inicial fora concluído com sucesso;
75	BB2_GO_NEXT_FRAME	BS_PHY_SDU_TX_P	Avança para um novo frame na camada PHY;
75	BS0_FRAME_BEGIN	SS_PHY_SDU_RX_P	BS informa a SS que um novo frame PHY fora iniciado;
76,90	BS1_RNG_RSP	SS_RG_RLC	SS finaliza o processo de ranging inicial e agenda o evento SB2_SBC_REQ para executar o processo BS_RG_RLC no instante 77,62 milissegundos;

Durante a negociação das capacidades, indicados na Tabela 23, os eventos processados foram:

Tabela 23: Simulação: Eventos durante fase de negociação de capacidades.

Tempo (ms)	Evento	Processo chamado	Ação executada
77,62	SB2_SBC_REQ	BS_RG_RLC	BS retorna um evento BS2_SBC_RSP para indicar que a fase de negociação de capacidades foi concluída. É assumido que a SS suporta as decisões tomadas pela BS;
80	BB2_GO_NEXT_FRAME	BS_PHY_SDU_TX_P	Avança para um novo frame na camada PHY;
80	BS0_FRAME_BEGIN	SS_PHY_SDU_RX_P	BS informa a SS que um novo frame PHY fora iniciado;
81,93	BS2_SBC_RSP	SS_RG_RLC	SS recebe uma mensagem RNG_RSP indicando que a fase de negociações chegou ao fim.

Os resultados obtidos e apresentados nas Tabelas 21, 22, 23 e 24 são ilustrados graficamente nas Figuras 25 e 26. Neste desenho são facilmente identificadas as execuções de eventos, bem como, as mensagens MAC trocadas entre a SS e a BS. Mostra-se a partir do instante 0 (zero) as fases de sincronização PHY e MAC, e a partir de 55 milissegundos o processo de *ranging* inicial. Na Figura 25 o processo de obtenção de um canal de *downlink* e a obtenção de parâmetros de transmissão é ilustrado.

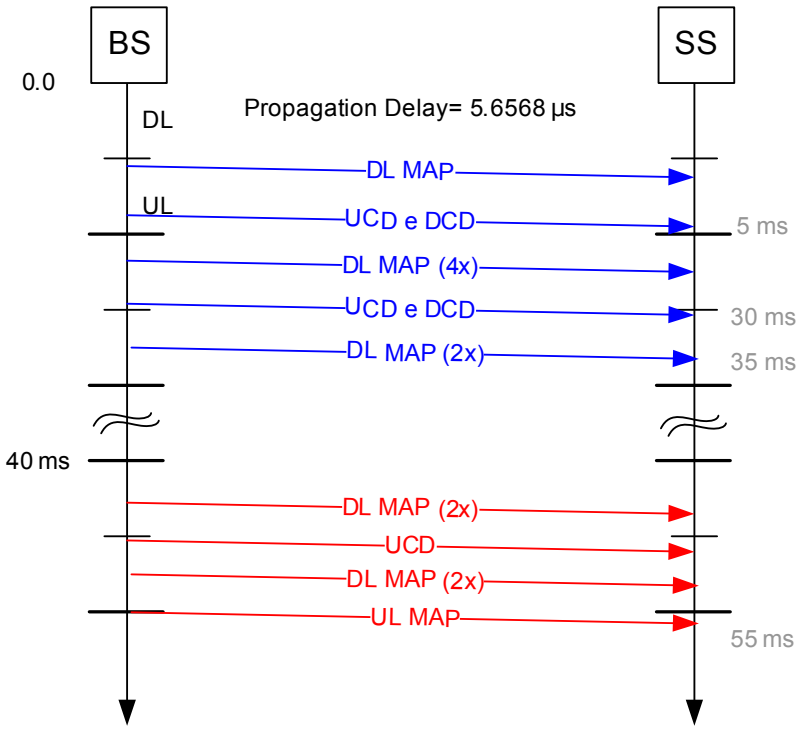


Figura 25: Simulação: Resultados da simulação antes do *ranging* inicial.

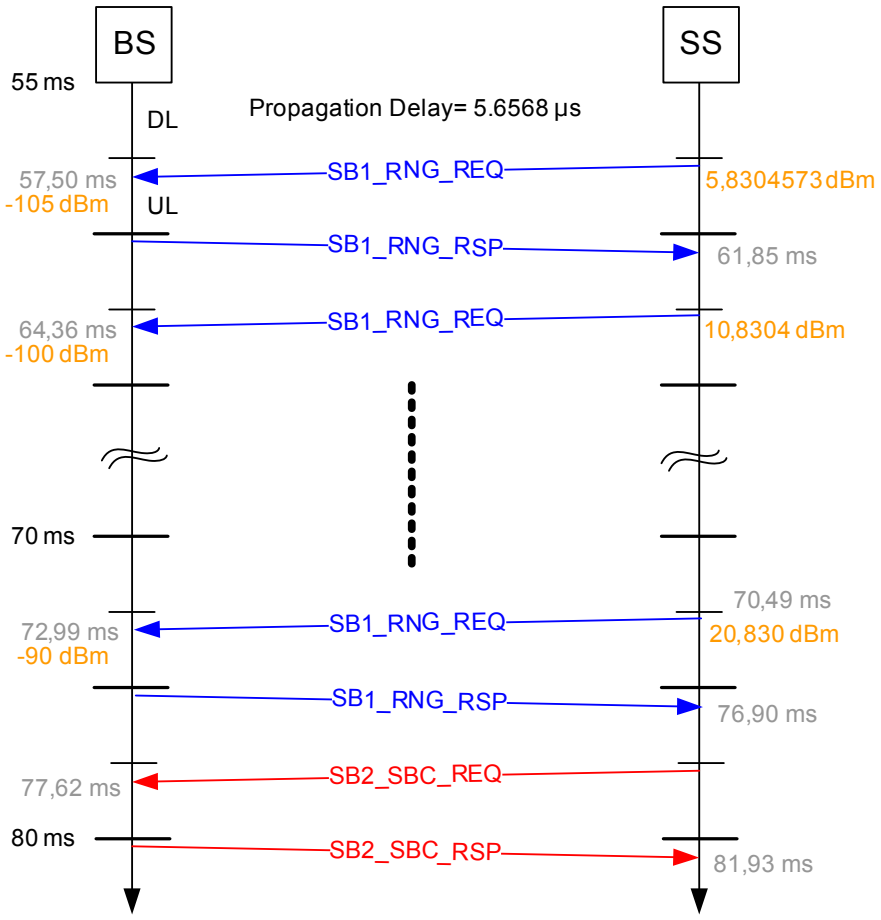


Figura 26: Simulação: Resultados da simulação durante as fases de *ranging* inicial e negociação de capacidades.

Na Figura 26 os marcos grandes são as abstrações do início dos *subframes* PHY de *downlink* e, os marcos pequenos, referem-se aos *subframes* de *uplink*. Foi considerada a operação TDD, como já citado anteriormente. A SS inicia a transmissão considerando o atraso de propagação. Desta forma, a BS receberá o *frame* no instante adequado, efetivamente, à SS em questão. Ou seja, a diferença de tempo devido a propagação dos símbolos OFDM é computada. O gráfico de resultados demonstra que o *ranging* inicial é iniciado no *uplink* do décimo primeiro *frame* PHY, aos 57,50 milissegundos, e finaliza no instante 77,62 milissegundos, no qual está sendo transmitindo pela BS o décimo quinto *frame* PHY. Portanto, é gasta 4 *frames* PHY neste processo. Assim, fica claro que fora necessário 15 *frames* para que o processo de entrada na rede

fosse finalizado. Este valor pode ser ainda maior se a SS necessitar ajustar a potência em escala de +1dBm, a fim de satisfazer o valor de potência desejado pela BS.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 Sumário das Atividades

Para que este trabalho fosse realizado e uma visão clara do funcionamento desta tecnologia fosse levantada, sob a égide da norma, foram pesquisados, estudados e analisados diversos trabalhos acadêmicos e da indústria.

Durante 24 meses, desde a definição do tema deste trabalho, o processo de extração de definições, detalhes e premissas de funcionamento, problemáticas particulares deste tipo de comunicação foram exploradas, até chegar a definição de um modelo de funcionamento, que nos deu subsídios suficientes para propor dois modelos de simulação inéditos.

Primeiramente, um minucioso levantamento das tecnologias *wireless* disponíveis no mercado, e suas particularidades técnicas, físicas e de comunicação formaram uma bibliografia de pesquisa e consulta inicial.

A partir desta bibliografia, formada pela norma, livros e artigos científicos, escritos ao redor do mundo, foi feito um levantamento dos pré-requisitos, desafios e soluções de modelamento que poderiam ser utilizados no desenvolvimento de um modelo de simulação geral para a tecnologia. Os resultados deste levantamento, apresentados nas Subseções 3.1 e 3.2, guiaram a especificação de um modelo que capturasse as principais funcionalidades envolvidas na comunicação entre as estações rádio base (BS) e as estações de assinantes (SS).

Este modelo geral cobre diversos aspectos presentes nas duas camadas do modelo de referência de protocolos da tecnologia. Em particular, foram modelados os procedimentos executados tanto na subcamada de convergência específica, quanto na subcamada de convergência comum. A interface aérea para OFDM também foi estudada e modelada de forma simplificada.

Dentre as funcionalidades da subcamada MAC específica foram utilizados na concepção do modelo: classificação de tráfego, supressão de cabeçalho, adaptação das MAC-SDUs, inicialização, autoconfiguração, controle de admissão e procedimentos de entrada na rede.

Dentre os procedimentos da subcamada MAC comum foram utilizados na concepção do modelo: alocação e escalonamento dinâmico de recursos de transmissão, estabelecimento e manutenção de conexões, construção, empacotamento e fragmentação de MAC PDUs, ajuste adaptativo das técnicas de transmissão e a negociação de QoS, oferecendo suporte à qualidade de serviço para o tráfego das estações.

Nenhum procedimento da subcamada MAC de segurança, responsável pela criptografia, autenticação e proteção contra acessos não autorizados, foram modelados. Entretanto, o suporte a diversos mecanismos de segurança, tais como a autenticação de usuários e dispositivos, protocolo de gerenciamento de chaves, encriptação de tráfego e gerenciamento de mensagens pode ser incorporado ao modelo, bastado popular os blocos previstos para estas funcionalidades.

Dentre as funcionalidades da camada física OFDM, este trabalho detalhou as características desta forma de multiplexação. Quando da implementação, a sincronização e manuseio da camada PHY fora abstraída de forma simples e seus resultados e características estão elencadas no capítulo anterior.

Delimitadas as características de funcionamento de cada funcionalidade existente no padrão, foi discutida, exaustivamente, a proposta de arquitetura geral de simulação. Quando da identificação de cada bloco, fluxo e ligação de funcionalidades, foi definido o melhor lugar para sua colocação e atuação, gerando assim, um plano de controle de conexão, gerência e adaptação, dividido em 3 seções. As seções foram divididas e chamadas de *Output Section*, *Control Section* e *Input Section*.

Definido o plano de controle de comunicação da estação rádio base e da estação de assinante foi desenvolvido, implementado e simulado, conforme descrito na Subseção 3.4, um modelo especifico para as quatro primeiras fases do procedimento de entrada na rede de uma SS. Neste esforço conjunto, a definição de blocos, eventos e processos, deu origem a uma especificação para a implementação do modelo em um simulador de eventos discretos usando a linguagem C++.

O procedimento conhecido como *network entry*, que é composto pelos processos de obtenção de canais de transmissão, obtenção dos parâmetros de transmissão, o *ranging* inicial e a

negociação de capacidades, foi simulado com o intuito de identificar o comportamento dos dispositivos fixos em uma célula WiMAX.

O processo de *ranging* inicial, que faz parte de um dos procedimentos da entrada na rede, só é concluído quando a potência ideal de comunicação é alcançada e aceita pela BS e SS. Este processo é a premissa para a comunicação efetiva, de troca de informações, entre a BS e a SS.

Desta simulação, são extraídas algumas análises e aspectos positivos de funcionamento da tecnologia IEEE 802.16d que podem, de diversas formas, contribuir para o entendimento, aprimoramento e continuidade deste trabalho.

5.2 Principais Contribuições

Todo trabalho científico de pesquisa tem como principal finalidade contribuir para o crescimento tecnológico mundial. Servem de embasamento para implementações acadêmicas, que por sua vez, contribuem para as implementações industriais e comerciais.

Este trabalho teve como principal contribuição a análise do processo de entrada na rede, ou *network entry*. Este processo que, aparentemente, é simples e rápido, apenas se conclui após diversas fases e análises de parâmetros pré-definidos realizados tanto pela BS quanto pela SS.

Análises realizadas entre a BS e a SS resumem-se no processamento e troca de mensagens de controle e características de propagação, tais como localização, necessidade dos dispositivos, visada, etc. Estas mensagens têm como finalidade a sincronização das camadas PHY e MAC dos dispositivos, oferecendo um meio confiável e de qualidade para a comunicação entre eles.

O controle e ajuste de potência realizado entre os dispositivos, levando em consideração as diversas variáveis físicas e lógicas de funcionamento, nos mostra a complexidade do processo de sincronização e ajuste, mostrando que as técnicas de multiplexação, modulação e *duplexing* são variáveis diretamente responsáveis pelo cenário robusto de comunicação resultante.

Embora os resultados técnicos relativos ao procedimento de entrada na rede sejam iniciais, uma vez que os modelos de propagação e de sincronização PHY utilizados podem ser melhorados, este trabalho produziu um modelo inovador, flexível e modular, onde futuros

desenvolvimentos podem ser facilmente acrescentados. Salienta-se portanto, as contribuições no que diz respeito a como modelar uma tecnologia tão complexa como o IEEE 802.16d.

Diversos pré-requisitos e desafios levantados na Subseção 3.1 foram contemplados na especificação do modelo geral, bem como do modelo específico.

5.3 Sugestões para Trabalhos Futuros

No decorrer de 2 anos, período dedicado ao desenvolvimento deste trabalho, diversas discussões nasceram para o entendimento do funcionamento do padrão. Dentre eles, incluem o refinamento do processo de sincronização PHY e MAC, modelos OFDM e o processo de ajuste de potência.

Focado nestes itens, e neste trabalho, que implementa o processo de *ranging* inicial entre a BS e a SS, pode-se elencar diversos pontos, a fim de melhorar, complementar e enriquecer o modelo aqui proposto.

O desenvolvimento de um modelo semi-analítico OFDM, com o intuito de simular a presença de diversas SSs na célula WiMAX, onde o número de variáveis individuais multiplicasse e, conseqüentemente, a dificuldade de simular tal ambiente, o processo de ajuste de potência é um desafio para as próximas implementações.

Como descrito na Seção 3.2.3.5, as premissas e técnicas de segurança não foram consideradas em nenhum dos trabalhos de simulação já publicados. Portanto, o desafio agora é implementar um modelo com diversas SSs na célula WiMAX e considerar o suporte aos diversos mecanismos de segurança, tais como a autenticação do usuário e dispositivos, protocolos de gerenciamento de chaves e a encriptação de tráfego.

Como já descrito anteriormente, o processo de ajuste de potência é complexo e de vital importância para a qualidade do enlace *wireless* IEEE 802.16d. Embasado no simulador em desenvolvimento, o processo de ajuste de potência pode ser melhorado. Já implementado no *ranging* inicial, o processo de *ranging* periódico ajustará a potência das estações de acordo com o

SLA. É necessário também incluir os ajustes de freqüência e de tempo iniciais. O suporte para mobilidade também poderia ser explorado em trabalhos futuros.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[01] 3GPP, *"3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Spatial channel model for Multiple Input Multiple Output (MIMO) simulations (Release 6)"*, Technical Report 25.996 V6.1.0. Currently available on www.cwc.oulu.fi/home/coursedata/fleury/25996-610.pdf.

[02] AHMAD, Aftab; XIN, Chengshun; HE, Feng; MCKORMIC, Michael, *Multimedia performance of IEEE 802.16 MAC,* Computer Science Department, Norfolk State University;

[03] ALAMOUTI, S.M., *"A Simple Transmit Diversity Scheme for Wireless Communications"*, IEEE J. Select. Areas Commun., vol. 16, no. 8, pp. 1451–1458, Oct. 1998;

[04] ALBERTI, A.M., Maurício L. Bottoli, Gean D. Breda, Leonardo de S. Mendes, *"Modeling and Simulation of ATM Traffic Management"*, 37th ANSS, IEEE Computer Society, April 2004, pp. 273-281;

[05] ALBERTI, Antonio Marcos, QUINELATO, Fábio Magnanini, HERNANDES, Herlon Clayton Paggi, "*A Simplified Simulation Model for Initial Ranging in IEEE 802.16d WirelessMAN-OFDM*", Submetido ao 41th Annual Simulation Simposium – ANSS, 2008.

[06] ALBERTI, Antônio Marcos; CHAN, Rodrigo Adolfo; NAVES, Sanzio, "A QUALITATIVE COMPARISON OF APPROACHES FOR IEEE 802.16 PERFORMANCE EVALUATION", MPRG 2006.

[07] ALVARION LTD, *Standards versus Proprietary Solutions – The Case for WiMAX Industry Standarts*, 2005;

[08] ALVARION, *Understanding the Radio Technologies of Mobile WiMAX and their effect on network deployment optimization*, 2006;

[09] ANDREWS, Jeffrey G.; GHOSH, Arunabha; MUHAMED, Rias, *Fundamentals of WiMAX – Undestanding Broadband Wireless Networking*, Pearson Education, INC, 2007;

[10] BAGRODIA, R. Meyer; TAKAI, M.; CHEN, Y.; ZENG, X.; MARTIN, J.; PARK, B.; SONG, H., *"Parsec: A Parallel Simulation Environment for Complex Systems"*, Computer, Vol. 31(10), October 1998, pp. 77-85;

[11] DOYLE, Alden J.; HAN, Kyungtae; NADKARIN, Suvid; SESHADRINATHAN, Kalpana; SIMHA, Raghuveer; WONG, Ian C., *"Performance Evaluation of the IEEE 802.16a Physical Layer using Simulation"*, Project Report. Currently available on http://www.ece.utexas.edu/~wireless/EE381K11_Spring03/projects/9.3.pdf

[12] EKLUND, Carl, Nokia Research Center; MARKS, Roger B., National Institute of Standards and Technology; STANWOOD, Kenneth L., Ensemble Communications Inc; WANG, Stanley, Ensemble Communications Inc., *IEEE 802.16: A Technical Overview of the WirelessMAN Air Interface for Broadband Wireless Access*, IEEE Communications Magazine, 2002;

[23] FALL, K.; K. Varadhan, "ns notes and documentation," The VINT Project, UC Berkeley, LBL, USC/ISI, and Xerox PARC, 1999. Currently available on http://www.isi.edu/nsnam/ns/doc/

[13] FONG, Bernard, Auckland University of Technology; ANSARI, Nirwan, New Jersey Institute of Technology; FONG, A.C.M., Nanyang Technological University; HONG, G.Y., Massey University; RAPAJIC, Pedrag B., University of New South Wales, *On the scalability of Fixed Broadband Wireless Access Network Deployment*, 2004, IEEE Radio Communications;

[14] GHOSH, Arunabha; WOLTER, David R.; ANDREWS, Jeffrey G.; CHEN, Runhua, *"Broadband Wireless Access with WiMax/8O2.16: Current Performance Benchmarks and Future Potential"*, IEEE Communications Magazine, February 2005;

[15] HOYMANN, Christian, *"Analysis and Performance Evaluation of the OFDM-Based Metropolitan Area Network IEEE 802.16",* Elsevier Computer Networks, Vol. 49, 2005;

[16] HUTTER, A.; HOYMANN, C.; WATCHTER, B.; CIANCA, E.; CASSIAU, N., *"Advanced Link Level Techniques for Broadband MIMO Metropolitan Area Networks"*, Seventh International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC), 2004;

[17] IEEE, IEEE Std 802.16TM-2004 (Revision of IEEE Std 802.16-2001), *IEEE Standard for local and metropolitan area network, Air Interface for fixed Broadband Wireless Access Systems,* 2004.

[18] IEEE, *IEEE Working Group 16, "IEEE 802.16 Parte 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems"*, 24 de Junho 2004;

[19] INTEL COMMUNICATION, *Orthogonal Frequency Division Multiplexing,* 2004;

[20] INTEL MAGAZINE, *IEEE 802.16 Wireless MAN Specification Accelerates Wireless Broadband Access*, 2003;

[21] INTEL, *Undestanding Wi-Fi and WiMAX as Metro-Access Solutions*, 2004;

[22] JERUCHIM, M. C.; BALADAN, P.; SHANMUGAN, K. S., *"Simulation of Communication Systems: Modeling, Methodology, and Techniques"*, Kluwer Academic, 2000;

[24] KERMOAL, Jean Philippe; SCHUMACHER, Laurent; PEDERSEN, Klaus Ingemann; MOGENSEN, Preben Elgaard; FREDERIKSEN, Frank, *"A Stochastic MIMO Radio Channel Model With Experimental Validation"*, IEEE JSAC, Vol. 20, Nº. 6, 2002;

[25] LOUAZEL, Benoît, *"Implementation of IEEE 802.16a in GloMoSim/QualNet"*, M.Sc. Thesis, Dublin City University, 2004;

[26] MALINI, Renzo Q.; GARCIA, Anilton S.; BUDRY, Amaury K., *QoS Architecture and Simulation Modeling to Support Distributed Multimedia Services in the IEEE 802.16d*

Standard;

[27] MARKS, Roger B., *IEEE 802.16 Standards Crystallize the Fixed Broadband Wireless Access Industry*, National Institute of Standards and Technology, 2001;

[28] MATHWORKS, Inc., Matlab Product Description. Currently available on http://www.mathworks.com/products/.

[29] NAIR, Govidan; CHOU, Joey; MADEJSKI, Tomasz; PERYCZ, Krzysztof; PUTZOLU, David; SYDIR, Jerry, *IEEE 802.16 Medium Access Control and Service Provisioning*, Intel Communications Group;

[30] NARAYANA, Prasad; CHEN, Ruiming; ZHAO, Yao; CHEN, Yan; FU, Zhi, Motorola Labs USA; ZHOU, Hai, Northwestern University, *Automatic Vulnerability Checking of IEEE 802.16 WiMAX Protocols through TLA+*;

[31] NAVES, Sanzio Guilherme; CHAN, Rodrigo Adolfo; ALBERTI, Antonio Marcos, *WiMAX – IEEE 802.16: Estudo da tecnologia e requisitos para modelamento e simulação*; Instituto Nacional de Telecomunicações – Inatel;

[32] NIST - National Institute of Standards and Technology, *The Network Simulator NS-2 NIST add-on IEEE 802.16 model (MAC+PHY)*, June 2007;

[33] OHRTMAN, F., *Wimax HandBook – Building 802.16 Wireless Network*, MCGraw-Hill Trade, 2005, 320p;

[34] PROAKIS, John, *"Digital Communications"*, McGraw-Hill Science/Engineering/Math; 4 edition, 2000;

[35] RAMACHANDRAN, Shyamal, *"Link Adaptation Algorithm and Metric for IEEE Standard 802.16"*, M.Sc. Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, 2004;

[36] RAMACHANDRAN, Shyamal; BOSTIAN, Charles W.; MIDKIFF, Scott F., *"Performance Evaluation of IEEE 802.16 for Broadband Wireless Access"*,

OPNETWORK, 2002;

[37] RAMACHANDRAN, Shyamal; BOSTIAN, Charles W.; MIDKIFF, Scott F., *Performance Evaluation of IEEE 802.16 for Broadband Wireless Access,* Center for Wireless Telecommunications, Virginia Tech;

[38] REDANA, Simone; LOTT, Matthias; CAPONE, Antonio, *"Performance Evaluation of Point-to-Multi-Point (PMP) and Mesh Air-Interface in IEEE Standard 802.16a"*, Proc. of IEEE VTC Fall 2004, September 2004;

[39] RIBEIRO, J.A.Justino, *Propagação das Ondas Eletromagnéticas*, 1º Edição, São Paulo, 2004, 392 p.;

[40] SCALABLE Network Technologies, QualNet products. http://www.scalable-networks.com/products/download.php

[41] SCTE DSS 00-05, "Data-Over-Cable Service Interface Specification (DOCSIS) SP-RFIv1.1-I05-000714, Radio Frequency Interface 1.1 Specification", July 2000.

[42] SKLAR, Bernard, "*Digital Communications: Fundamentals and Applications"*, 2nd Edition, Prentice Hall, 2001;

[43] SUNDELIN, Andrew; SATER, Glen; SALMAN, Taylor, "*802.16 MAC Layer Modeling: A Common Simulation Framework"*, IEEE 802.16.1 MAC Task Group Call for Contributions on MAC Layer Modeling, 2000;

[44] SWEENEY, Daniel, *Wimax Operator´s Manual – Building 802.16 Wireless Networks*, Apress, 2004, 240p.;

[45] TANENBAUM, Andrew S., *Redes de Computadores*, 4º Edição, Rio de Janeiro, Campus, 2003, 955 p.;

[46] THATTIL, Beena; GICHORA, Tabitha, *QoS Support in IEEE 802.16 Broadband Wireless Access Systems;*

[47] TSAI, Frank Chee-Da, Networks and Multimedia Institute, Institute for Information Industry; CHEN, Jenhui, Department of Computer Science and Information Engineering Chang Gung University, Kweishan, Taoyuan, Taiwan, R.O.C.; CHANG, Chiang-Wei; LIEN, Wei-Jen; HUNG, Chih-Hsin; SUM, Jui-Hsiang, *The Design and Implementation of WiMAX Module for ns-2 Simulator*;

[48] UNKER, Juhn; BOUDREAU, Elizabeth Bramson, *Demystifying WiMAX*, Pyramid Research, 2003;

[49] WIMAX FORUM*, Mobile WiMAX – Part I: A Technical Overview and Perfomance Evaluation. Prepared on Behalf of the WiMAX Forum*, February 2006;

[50] WIMAX FORUM, *Mobile WiMAX – Part I: A Technical Overview and Performance Evaluation*, August 2006;

[51] XU, Sen; MATTHEWS, Manton; HUANG, Chin-Tser; *Security Issues in Privacy and Key Management Protocols of IEEE 802.16*, Department of Computer Science and Engineering, University of South Carolina, Columbia, USA, 2006;