

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE INFORMÁTICA
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM TECNOLOGIAS, GERÊNCIA E SEGURANÇA
DE REDES DE COMPUTADORES

EDUARDO SCHOBERTH DAMIANI

WiMax IEEE 802.16 como Suporte para Acesso de Banda Larga

Trabalho de Conclusão apresentado como requisito parcial para a obtenção do grau de Especialista em Tecnologias, Gerência e Segurança de Redes de Computadores.

Prof. Dr. Juergen Rochol
Orientador

Prof. Sérgio Luis Cechin
Coordenador do Curso

Porto Alegre, novembro de 2008.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Reitor: Prof. Carlos Alexandre Netto

Vice-reitor: Prof. Rui Vicente Oppermann

Pró-Reitor de Pós-Graduação: Prof. Aldo Bolten Lucion

Diretor do Instituto de Informática: Prof. Flávio Rech Wagner

Coordenador do PPGC: Profa. Luciana Porcher Nedel

Bibliotecária-Chefe do Instituto de Informática: Beatriz Regina Bastos Haro

AGRADECIMENTOS

À minha esposa Fabiana pela dedicação, companheirismo e força nos momentos em que eu precisava estudar e queria velejar.

Aos meus filhos Andreo, Enzo e Bruno, que mesmo ainda faltando alguns meses para o seu nascimento já irradiam sua alegria e vontade de viver.

Ao Prof. Juergen, por sua disponibilidade, paciência, conhecimento e bom humor, que nos foi oferecido durante todo o curso, e principalmente durante a execução deste trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	6
LISTA DE FIGURAS	9
LISTA DE TABELAS	10
RESUMO.....	11
ABSTRACT.....	13
1 INTRODUÇÃO	13
1.1 Motivação	13
1.2 Objetivos.....	14
1.3 Organização do Trabalho	15
2 TECNOLOGIAS PARA ACESSO EM BANDA LARGA	16
2.1 Digital Subscriber Line	16
2.2 Cable Modem	17
2.3 Acesso de Banda Larga WiFi ou IEEE 802.11	19
2.4 Acesso de Banda larga WiMax ou 802.16.....	20
2.5 Acesso de Banda Larga 3G.....	24
2.6 Comparativo entre as tecnologias 802.11, 802.16 e 3G	25
3 A CAMADA FÍSICA DO PADRÃO IEE 802.16	28
3.1 Single Carrier (SC).....	29
3.2 Single Carrier Adaptativo (SCa)	32
3.3 OFDM.....	33
3.4 OFDMA e SOFDMA.....	34
4 A CAMADA MAC DO IEEE 802.16.....	36
4.1 Estrutura geral da camada MAC.....	36
4.1.1 Sub-Camada de Convergência (CS).....	36
4.1.2 Sub-Camada de Parte Comum.....	37
4.1.3 Sub-camada de Segurança.....	38
4.2 Características de mobilidade	38
4.3 Arquitetura de QoS do WiMax.....	39
5 O MERCADO BRASILEIRO PARA ACESSOS WBA	43
5.1 Serviços de WBA fixos e móveis.....	43

5.2 Características do WBA do WiFi 802.11.....	43
5.3 Características do WBA do WiMax.....	44
5.4 Características do WBA brasileiro.....	44
6 CONCLUSÕES	46
OBRAS CONSULTADAS	47

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

16-QAM	<i>16 - Quadrature Amplitude Modulation</i>
256-QAM	<i>256 - Quadrature Amplitude Modulation</i>
3D	<i>Third Generation</i>
3G	Terceira Geração
3GPP	<i>Third Generation Partnership Project</i>
64-QAM	<i>64 - Quadrature Amplitude Modulation</i>
AAS	<i>Adaptative Antenna System</i>
ADSL	<i>Asymmetric Digital Subscriber Line</i>
AMPS	<i>Advanced Mobile Phone System</i>
AP	<i>Access Point</i>
BD	Banco de Dados
BE	<i>Best Effort</i>
BPSK	<i>binary phase shift keying</i>
BR	<i>Bandwidth Request</i>
BSA	<i>Basic Service Area</i>
BSS	<i>Basic Service Set</i>
CBR	<i>Constant Bit Rate</i>
CDMA	<i>Code Division Multiple Access</i>
CI	<i>CRC Indicator</i>
CID	<i>Connection IDentifier</i>
CID	<i>Connection ID</i>
CIR	<i>Committed information rate</i>
CPE	<i>Customer Permission Equipament</i>
CPqD	Centro de Pesquisa e Desenvolvimento
CRC	<i>Cyclic Redundancy Check</i>
DAMA	<i>Demand Assigned Multiple Acces</i>
DiffServ	<i>Differentiated Services</i>
DS	<i>Differentiated Service</i>
DSCP	<i>Differentiated Service Code Point</i>
DSLAN	<i>Digital Subscriber Line Access Multiplexer</i>

DSP	<i>Digital Signal Processor</i>
EC	<i>Encryption Control</i>
EDGE	<i>Enhanced Data rates for GSM Evolution</i>
EKS	<i>Encryption Key Sequence</i>
ErtPS	<i>Extended real-time Polling Service</i>
ESS	<i>Extended Service Set</i>
EV-DO	<i>Evolution-Data Optimized</i>
FBSS	<i>Fast Base Station Switching</i>
FDD	<i>Frequency Division Duplexing</i>
FDM	<i>Frequency-Division Multiplexing</i>
FEC	<i>Forward Error Correction</i>
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i>
GPRS	<i>General Packet Radio Service</i>
GPS	<i>Global Navigation Satellite System</i>
GSM	<i>Global System for Mobile communications</i>
HCS	<i>Header Check Sequence</i>
HHO	<i>Hard Handover</i>
HSDPA	<i>High-Speed Downlink Packet Access</i>
HSPA	<i>High Speed Packet Access</i>
HSUPA	<i>High-Speed Uplink Packet Access</i>
HT	<i>Header Type</i>
IBSS	<i>Independent Basic Service Set</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronic Engineers</i>
IETF	<i>Internet Engineering Task Force</i>
IntServ	<i>Integrated Services</i>
ISP	<i>Internet Service Provider</i>
LAN	<i>Local Area Network</i>
LEN	<i>Length</i>
LOS	<i>Line Of Sight</i>
MAC	<i>Media Access Control</i>
MAN	<i>Metropolitan Area Network</i>
MDHO	<i>Macro Diversity Handover</i>
MIMO	<i>Multiple Input-Multiple Output</i>
MPEG	<i>Motion Picture Experts Group</i>
MS	<i>mobile station</i>
NLOS	<i>Non Line Of Sight</i>
nrtPS	<i>non real-time Polling Service</i>
OFDM	<i>Orthogonal Frequency-Division Multiplexing</i>

OFDMA	<i>Orthogonal Frequency-Division Multiplexing Access</i>
PAN	<i>Personal Area Network</i>
PDU	<i>Payload Data Unit</i>
PHS	<i>Packet Header Suppression</i>
PLC	<i>Power Line Communications</i>
PSTN	<i>Public Switched Telephone Network</i>
QoS	<i>Quality of Service</i>
QPSK	<i>Quadrature Phase shift keying</i>
RF	<i>Rádio frequência</i>
RFC	<i>Request For Comments</i>
RSVP	<i>ReSerVation Protocol</i>
RTG	<i>Receive/Transmit Transition Gap</i>
rtPS	<i>real-time Polling Service</i>
SDU	<i>Service Data Unit</i>
SFID	<i>Service Flush IDentifier</i>
SOFDMA	<i>Scalable Orthogonal Frequency-Division Multiplexing Access</i>
SSID	<i>Service Set Identifier</i>
SSTG	<i>Subscriber Station Transition Gap</i>
TDD	<i>Time Division Duplexing</i>
TDMA	<i>Time Division Multiple Access</i>
ToS	<i>Type Of Service</i>
TTG	<i>Transmit/Receive Transition Gap</i>
UFRGS	<i>Universidade Federal do Rio Grande do Sul</i>
UGS	<i>Unsolicited Grant Service</i>
UMTS	<i>Universal Mobile Telecommunications System</i>
VoIP	<i>Voice over Internet Protocol</i>
WAN	<i>World Area Network</i>
WBA	<i>Wireless Broadband Access</i>
WCDMA	<i>Wideband Code Division Multiple Access</i>
WDS	<i>Wireless Distribution System</i>
WiFi	<i>Wireless Fidelity</i>
WiMax	<i>Worldwide Interoperability for Microwave Access</i>

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Aplicações do 802.16	13
Figura 2.1: Espectro utilizado pelo ADSL	15
Figura 2.2: Topologia da rede ADSL	16
Figura 2.3: Cabo coaxial em conector “F”	16
Figura 2.4: Espectro do sinal no cabo	17
Figura 2.5: Topologia <i>cable modem</i> e CATV	17
Figura 2.6: Exemplo de rede Ad-hoc	18
Figura 2.7: Exemplo de rede Infra-estrutura	19
Figura 2.8: Exemplo de uma rede ESS	19
Figura 2.9: CPE WiMax	20
Figura 2.10: Velocidades e modulações adaptativas	21
Figura 2.11: Antena Setorial de uma BS	21
Figura 2.12: Antena direcional	22
Figura 2.13: Antena Omnidirecional	22
Figura 2.14: Estimativa de crescimento dos assinantes WiMax	23
Figura 2.15: Dispositivo 3G iPhone	24
Figura 2.16: Exemplo de Integração 802.11 e 802.16	25
Figura 3.1: Camadas dos níveis físicos e enlace	27
Figura 3.2: Modulações do 802.16	28
Figura 3.3: Exemplo de implantação de <i>Single Carrier</i>	28
Figura 3.4 : Duplexação por Divisão em Frequencia	29
Figura 3.5: Duplexação por Divisão no Tempo	29
Figura 3.6: Sub-quadro de <i>Downlink</i> TDD	30
Figura 3.7: Sub-quadro de <i>Downlink</i> FDD	30
Figura 3.8: PDU de <i>downlink</i> , sub-camada de convergência de transmissão	31
Figura 3.9: Sub-quadro de <i>uplink</i>	31
Figura 3.10: Sub-portadoras OFDM	32
Figura 3.11: Estrutura do simbolo OFDM no tempo	32
Figura 3.12: Tipos de Sub-portadoras do OFDM	33
Figura 3.13: Quadro OFDM	33
Figura 3.14: Sub-canais no OFDMA	34
Figura 4.1: Cabeçalho MAC Genérico	36
Figura 4.2: Cabeçalho MAC de requisição de Banda	36
Figura 4.3: <i>Handover</i>	37
Figura 4.4: Representação do efeito <i>Doppler</i>	38
Figura 4.5: Mecanismo de QoS	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Padronizações do padrão 802.16	19
Tabela 2.2: Bandas licenciadas e não licenciadas	22

RESUMO

As tecnologias de redes contemporâneas, tendem a utilizar-se cada vez mais de sistemas sem fio em substituição aos sistemas à cabo.

O IEEE, organismo internacional responsável por definir normas técnicas utilizadas como referência pelos fabricantes em sistemas de telecomunicações, possui diversas padronizações que são utilizadas em aplicações de redes sem fio, desta forma participando do desenvolvimento destas tecnologias. Desde os sistemas PAN como por exemplo o *Bluetooth* ou IEEE 802.15, passando pelas LANs como 802.11, e também as redes metropolitanas ou MAN com o padrão 802.16, até chegar às redes WAN com a proposta do 3G e a padronização do 802.20.

Dentre estas tecnologias, destaca-se o Padrão IEEE 802.16, conhecido como WiMAX acrônimo de *Worldwide Interoperability for Microwave Access*.

Este padrão proporciona acessos em banda larga em áreas rurais e metropolitanas, formando redes MAN sem fio com acesso à vários tipos de conteúdo, como vídeo, áudio, internet, telefonia entre outros.

Palavras-Chave: IEE 802.16, WiMax, Tecnologia, Sem fio, Banda Larga.

WiMax IEEE 802.16 as support for Access to Broadband

ABSTRACT

The technologies of contemporary networks, tend to use is increasingly wireless systems in place systems to the cable.

The IEEE, international body responsible for setting technical standards used as reference by manufacturers in telecommunications systems, has various standardizations that are used in applications of wireless networks, thus participating in the development of these technologies. Since the NAP systems such as Bluetooth or IEEE 802.15, via LANs and 802.11, and the metropolitan networks or MAN with the 802.16 standard, even in networks WAN with the proposal of 3G and the standardization of 802.20.

Among these technologies, there is the IEEE 802.16 standard, known as WiMax acronym for Worldwide Interoperability for Microwave Access.

This standard provides broadband access in rural and metropolitan areas, forming MAN wireless networks with access to various types of content such as video, audio, Internet, telephony and others.

Keywords: IEEE 802.16, WiMax, Technology, Wireless, Broadband

1 INTRODUÇÃO

1.1 Motivação

Estão disponíveis a mais de uma década tecnologias para redes locais sem fio. Um dos fatores que contribuiu para a sua disseminação nos mercados corporativo e residencial foi a criação do padrão 802.11 pelo IEEE. Também é conhecido este padrão como WiFi, que é uma marca registrada de um consórcio de indústrias com o objetivo de criar um selo de garantia de compatibilidade entre equipamentos.

Ao longo dos anos o IEEE também vem desenvolvendo um padrão para as redes metropolitanas sem fio, padrão popularmente conhecido com WiMax ou IEEE 802.16, cuja proposta é interconectar os lares e as corporações à internet, serviços de telefonia fixa e móvel, e CATV sem a utilização da rede cabeada convencional (Figura 1.1)

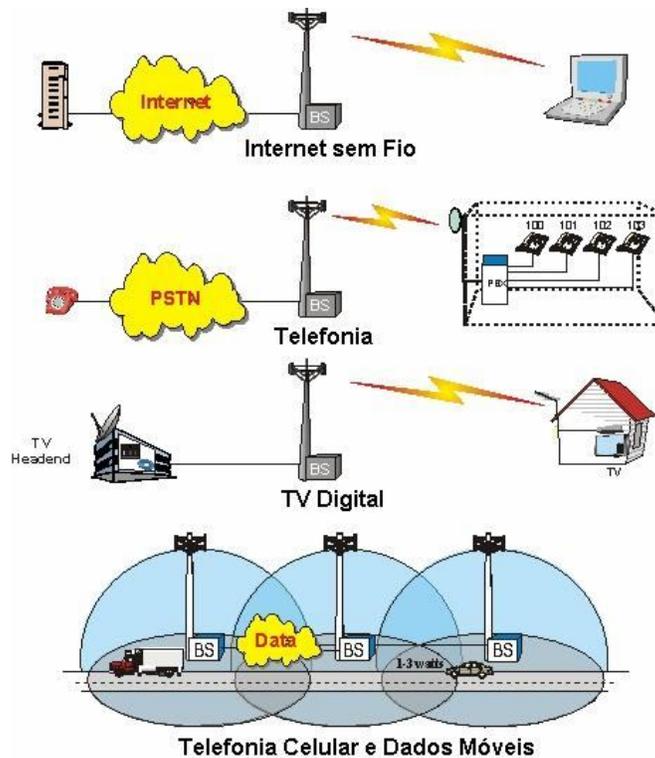


Figura 1.1: Aplicações do 802.16

É sabido que o custo de implantação de redes de banda larga cabeada é elevado e demandam prazos também longos. Devido à isto, o 802.16 torna-se para as empresas de telecomunicações um atrativo para a redução dos custos e prazos de execução, sem falar na mobilidade intrínseca que esta tecnologia proporciona e seu superior raio de alcance. Desta forma pode atender com a mesma infra-estrutura, tanto os clientes mais próximos quanto os mais distantes, hoje não servidos pelas redes baseadas em cabos como xDSL, fibra óptica e cabos coaxiais.

Neste contexto, estender a cobertura à uma área geográfica maior com custos e prazos de implantação menores, proporcionaria maior oferta de serviços à maiores porções da população a preços mais competitivos, e desta forma ampliando a inclusão digital na sociedade.

1.2 Objetivos

Este trabalho visa o estudo das camadas físicas do IEEE 801.16 como o OFDM e o OFDMa e suas interações com os modelos LOS e NLOS e os mercados potenciais para estas tecnologias.

1.3 Organização do Trabalho

Este trabalho está dividido em seis capítulos, sendo que no próximo serão abordadas as tecnologias para acesso em banda larga. No capítulo 3 será visto a camada física do 802.16 com detalhes das modulações OFDM E OFDMa e SOFSMa. No capítulo 4 discutiremos sobre a camada MAC do IEEE 802.16. No capítulo 5 serão tratados assuntos sobre o mercado brasileiro para acessos WBA. E fechando no capítulo 6 tecerei minhas conclusões.

2 TECNOLOGIAS PARA ACESSO EM BANDA LARGA

2.1 Digital Subscriber Line

As tecnologias disponíveis para acesso de última milha à internet em banda larga podem ser classificadas em dois grandes grupos: *cabeadas* e *sem fio*.

Pertencente à tecnologia cabeada, estão o ADSL e o *cable modem*, sendo as de maior popularidade à nível mundial. Estas tecnologias utilizam-se da infra-estrutura das redes existentes, no caso a rede pública de telefonia para o DSL e a rede de TV à cabo para o *cable modem*.

Existem diversos tipos de implementações para a tecnologia DSL, devido a isto refere-se a ela usando-se a terminologia xDSL. Alguns exemplos são as tecnologias *Symmetric Digital Subscriber Line* ou SDSL, *High-Rate Digital Subscriber Line* ou HDSL e a *Very-High bitrate Digital Subscriber Line* ou VDSL.

O caso do nosso estudo é o *Asymmetric Digital Subscriber Line* ou popularmente chamado de ADSL. Este nome baseia-se no fato de termos taxas de transmissão distintas ou assimétricas para *downstream* e *upstream*. A taxa de download pode chegar a 6.144Mbps e a taxa de upload pode chegar a 640Kbps, cada uma ocupando sua relativa parcela do espectro na linha telefônica (Figura 2.1)



Figura 2.1: Espectro utilizado pelo ADSL

O ADSL trafega sobre os cabos de cobre trançados legados da rede telefônica pública, o que não requer investimentos pesados em infra-estrutura (Figura 2.2).

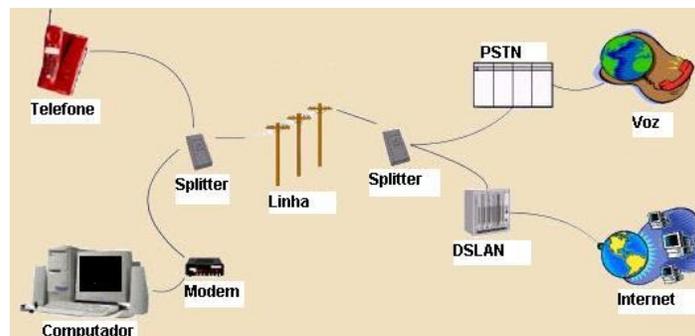


Figura 2.2: Topologia da rede ADSL

Podemos observar que entre os três canais há um disponível para voz. Isso permite que o usuário fale ao telefone e ao mesmo tempo navegue na internet, não sendo necessário desconectar para falar ao telefone. Para separar voz de dados na linha telefônica, é instalado na linha do usuário um divisor ou *Splitter*. Nele são conectados os cabos para o aparelho telefônico e para o modem.

Na central telefônica também há um divisor. Assim, quando é realizada uma chamada telefônica o sinal de voz é encaminhado para a rede de comutação de circuitos da companhia telefônica (PSTN - *Public Switched Telephone Network*) e procede pelo seu caminho habitual. Quando se acessa a internet, o sinal é encaminhado ao DSLAN, que faz a multiplexação de várias linhas de assinantes ADSL.

2.2 Cable Modem

A tecnologia do *cable modem* ou *Community Antenna Television-CATV* ou apenas televisão à cabo, tornou-se viável devido a possibilidade de se enviar e receber dados através da infra-estrutura existente de cabos coaxiais (Figura 2.3) das companhias de TV por assinatura. Nesta solução, a transmissão é feita utilizando-se diferentes canais em blocos de 6 MHz.



Figura 2.3: Cabo coaxial em conector “F”

Usando compressão MPEG-*Motion Picture Experts Group*, os sistemas CATV instalados hoje podem transmitir até 10 canais de vídeo comprimidos em sub-portadoras de 6 MHz de largura de faixa. Como a banda reservada para os canais de TV vai de 111 MHz à 750 MHz (Figura 2.4), podemos acomodar nesta faixa mais de cem sub-portadoras com largura de 6 MHz (cada uma com 10 canais comprimidos), isto

possibilita aproximadamente 1000 canais de vídeo MPEG num sistema. Além disso, a tecnologia digital permite a correção de erros para assegurar a qualidade do sinal recebido.

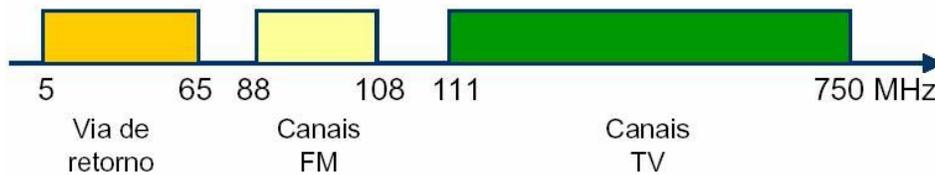


Figura 2.4: Espectro do sinal no cabo

A técnica para o acesso a internet utiliza-se de um par de modems, conhecidos como *cable modem* (Figura 2.5) onde um deles é instalado na casa do assinante e o outro é instalado na central de CATV (*Head End*). A tecnologia permite que sejam efetivadas taxas de até 36Mbps, utilizando-se frequências diferentes para um determinado número de assinantes.

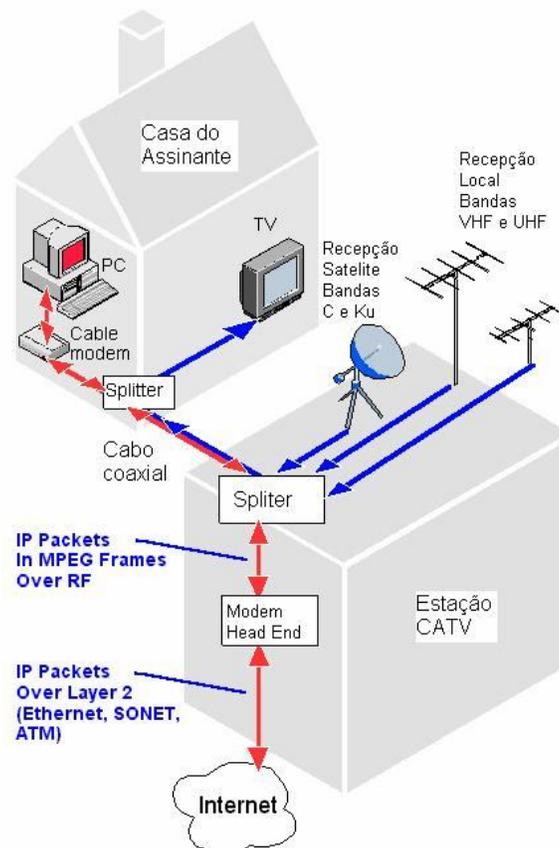


Figura 2.5: Topologia *cable modem* e CATV

Assim, os dados provenientes da Internet compartilham no cabo o mesmo espaço que qualquer canal de tv. Os dados emitidos de um assinante para a Internet, *upstream*, requerem menos largura de banda do que o *downstream*, já que se supõe que a maioria das pessoas possui um volume de download muito maior que o volume de upload.

2.3 WiFi ou IEEE 802.11

O WiFi é o nome comercial designado para identificar o conjunto de padrões para redes sem fio ou *wireless*, desenvolvidos pelo comitê 802.11 do IEEE. Está dividida em 3 principais padrões: 802.11b, 802.11g e 802.11a.

O padrão 802.11b permite taxas de transmissão das informações de 1, 2, 5.5 ou 11Mbps.

O padrão 802.11g atinge além das anteriores, a taxa de 54Mbps na faixa de 2,4GHz. Com o recurso do *Speedbuster*, o 802.11g pode chegar a 108Mbps, velocidade superior ao IEEE 802.3 que trabalha com 100Mbps.

O 802.11a utiliza a faixa de frequência de 5GHz e trabalha com menor interferência que os outros à taxas de 54Mbps, sendo conhecido com WiFi5.

Para o padrão 802.11 estão definidos dois modos de operação: Ad-hoc ou ponto-à-ponto e modo infra-estrutura. Nos dois casos um SSID é utilizado para identificar a rede. Ele é configurado no AP e nos dispositivos sem fio nos modos Ad-hoc ou infra-estrutura. O SSID é periodicamente anunciado pelo AP ou pelo dispositivo sem fio utilizando um quadro MAC 802.11 conhecido como *beacom frame*.

No modo Ad-hoc todas as máquinas podem se comunicar diretamente, desde que o sinal de RF esteja no seu alcance, utilizando o conceito de IBSS.(Figura 2.6).

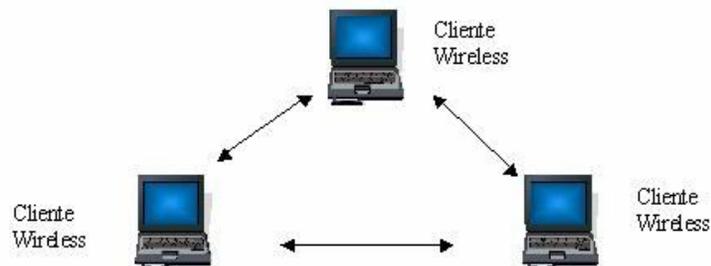


Figura 2.6: Exemplo de rede Ad-hoc

No modo infra-estrutura há um dispositivo centralizador conhecido com *Access Point* ou AP, que tem a função semelhante ao um hub na rede cabeada, e é utilizado o conceito de BSA que representa a área na qual os dispositivos móveis podem trocar informações. O AP também pode ser configurado como ponte (Figura 2.7), interconectando a rede sem fio com a rede cabeada.

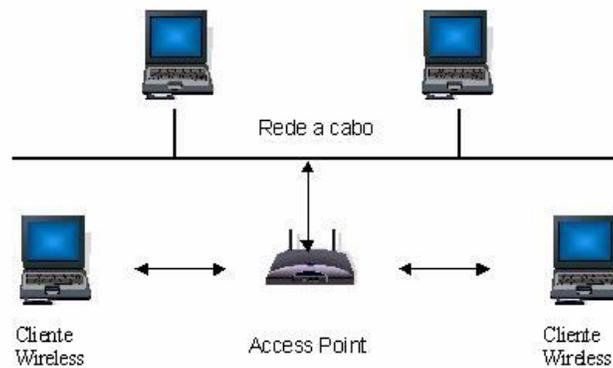


Figura 2.7: Exemplo de rede Infra-estrutura

A área de cobertura de um determinado AP-*Access Point* é chamada de BSS-*Basic Service Set*, e cada qual possui um respectivo SSID-*Service Set Identifier*. Ao conjunto de BSSs temos uma ESS-*Extended Service Set* (Figura 2.8), sendo que em cada BSS encontramos um AP responsável pela interconexão dos dispositivos.

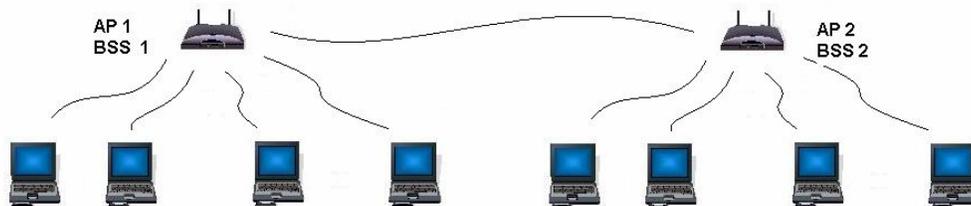


Figura 2.8: Exemplo de uma rede ESS

Cada AP atende a sua BSS, e a comunicação entre dispositivos de diferentes BSS se dará devido a interconexão dos Aps. Esta interconexão poderá ser feita por cabo UTP ou via RF através de WDS-*Wireless Distribution System*, o que permite a ativação de vários APs sem a necessidade de cabos entre eles.

2.4 Acesso de Banda larga WiMax ou 802.16

O padrão 802.16 também é conhecido como a interface aérea da IEEE para acessos metropolitanos sem fio (WMAN).

O Propósito original do 802,16 eram aplicações com linha de visibilidade entre as estações, e utilização de frequências entre 10 GHz e 66 GHz (Tabela 2.1). A versão 802.16a já prevê enlaces sem linha de visibilidade entre as estações, e utilização de frequências entre 2 GHz e 11 GHz com interoperabilidade entre equipamentos. O 802.16b trata de aspectos relativos a QoS. O 802.16-REVd consolida as revisões dos padrões 802.16a e 802.16c em um único padrão. Dentre as alterações pode-se destacar a utilização de antenas MIMO melhorando a confiabilidade em situações multi-percurso. E o padrão 802.16e trata das especificações de mobilidade, em frequências abaixo de 3,5GHz podendo oferecer concorrência à tecnologia celular.

Tabela 2.1: Padronizações do padrão 802.16

	IEE 802.16	IEE 802.16a/ Rev D - Nomádico	IEE 802.16e - Móvel
Homologação	2001	802.16a – 2003	2005
Condições do Canal	LOS	NLOS	NLOS
Taxa de Transmissão	32 – 134 Mbps	75 Mbps	15 Mbps
Modulação	QPSK	Ofdm256, Ofdm 64 BPSK, QPSK, QAM , 16QAM, 64QAM	Ofdm256, Ofdm 64, OfdmA BPSK, QPSK, 16QAM , 64QAM,
Frequência	10 – 66 GHz	2- 11 GHz	2- 6 GHz

Esta interoperabilidade quer dizer que não existem dependências à um fornecedor específico para o desenvolvimento das redes das operadoras. Já para os fabricantes de equipamentos quer dizer um menor número de produtos diferentes à desenvolver e produzir. Para os fabricantes de componentes, é uma escala de produção muito grande. E para o usuário do serviço quer dizer acesso em banda larga mais rápido e econômico.

O 802.16 possui como características a possibilidade de trafegar sem linha de visibilidade, instalação do CPE (Figura 2.9) no modo *plug and play*, portabilidade que permite ao usuário transportar seu CPE para diferentes locais, fornecimento de enlace de dados com banda garantida de $N \times E1$, frações de $E1$, e também com padrão de qualidade equivalente ao ADSL ou *cable modem*.



Figura 2.9: CPE WiMax

Com uma modulação robusta, o 802.16 trafega a velocidades elevadas com longo alcance e elevada eficiência espectral tolerante às reflexões de sinais. A velocidade de Tx/Rx é adaptativa dinâmica conforme o tipo de modulação acertada (Figura 2.10), e variam entre 1Mbps e 75Mbps, o que dependerá das condições de propagação, topografia, tipos de antenas e distância entre as estações.

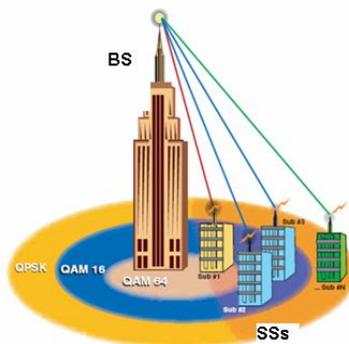


Figura 2.10: Velocidades e modulações adaptativas

O 802.16 tem definidos dois tipos de estações:

Base Station ou BS, é a que controla e gerencia todas as conexões. Transmite em diferentes canais *downlink* para cada assinante. A BS poderá trabalhar com arranjos de antenas setoriais de 120 graus (Figura 2.11) e cobrir desta forma os assinantes no entorno de 360 graus da BS.



Figura 2.11: Antena Setorial de uma BS

Subscriber Station ou SS, é a estação do assinante, ou seja o CPE ou terminal que conecta com a BS. O *uplink* é como se fosse ponto-a-ponto em uma rede que está configurada como ponto-a-multiponto. Se for configurada uma rede *mesh*, ao pode ser tanto ponto-a-ponto quanto ponto-a-multiponto. Quando se trabalha com linha de visada entre as BS e SS, nesta última utiliza-se antenas direcionais (Figura 2.12) de ganho elevado, na ordem de 16dBi.



Figura 2.12: Antena direcional



Figura 2.13: Antena Omnidirecional

Para o caso de tráfego sem linha de visada ou NLOS, emprega-se antenas omnidirecionais internas ou externas (Figura 2.13) para a SS.

O WiMax possui uma capacidade muito grande de escalabilidade. Suporta diversas larguras de banda para acomodar facilmente o planejamento de cada célula do sistema, tanto em bandas licenciadas quanto não licenciadas (Tabela 2.2).

Tabela 2.2: Bandas licenciadas e não licenciadas

<i>Faixa de Frequências</i>	<i>Características</i>
2,5 GHz	Frequência licenciada. Esta é a melhor frequência disponível para WiMAX no Brasil. É a mais baixa, então teremos os melhores alcances, exigindo uma menor quantidade de estações rádio-base para cobrir uma determinada área. Hoje em poder das empresas de MMDS. Alcance com Linha de Visada (LOS) = 18 – 20 km Alcance sem Linha de Visada (NLOS) = 9 – 10 km
3,5 GHz	Frequência licenciada. Esta é a frequência disponível para WiMAX no Brasil, utilizada pelas operadoras e prestadoras de serviço de telecomunicações. Alcance com Linha de Visada (LOS) = 12 – 14 km Alcance sem Linha de Visada (NLOS) = 6 – 7 km
5,8 GHz	Frequência Não-licenciada. Esta é a frequência livre disponível para WiMAX no Brasil, podendo ser utilizada por qualquer empresa prestadora de serviços. Por ser não licenciada, existe a possibilidade de interferências e congestionamento de frequências em áreas de grande densidade. É importante, pois não exige gastos com a aquisição de licenças, o que pode viabilizar o plano de negócio de muitas áreas no Brasil. Alcance com Linha de Visada (LOS) = 7 – 8 km Alcance sem Linha de Visada (NLOS) = 3 – 4 km
10,5 GHz	Frequência licenciada. Há necessidade de micro células, pois o poder de cobertura em grandes distâncias nesta frequência é baixo. Futuramente poderá se tornar uma alternativa, quando houver um esgotamento de banda em frequências mais baixas e uma proliferação do conceito de WiMAX

Se a operadora tem 20MHz disponíveis de espectro, poderá alocá-los em dois setores de 10MHz ou quatro de 5MHz. Também poderá ser utilizado o mesmo espectro em diferentes setores da BS, criando uma isolação entre as respectivas antenas.

A mobilidade é um forte diferencial do WiMAX frente às demais tecnologias de acesso em banda larga. A padronização 802.16e, prevê um excelente desempenho móvel, com velocidades de deslocamento de até 120Km/h pode-se atingir taxas de

transmissão de 1Mbps, e com velocidades de deslocamento mais baixas podemos atingir taxas de dados bem maiores.

Desta forma, ao contrário do WiFi, o WiMAX concorre diretamente com as tecnologias celulares para utilização em veículos em movimento. Além do tráfego de voz, suporta também tráfego de informações sobre o trânsito, meteorologia, entretenimento, etc., tornando o WiMAX além de tudo, uma promissora tecnologia de acesso móvel. A previsão é de que em 2012 o total de assinantes com acessos WiMax seja de 55 milhões de pessoas (Figura 2.14), sendo destes 25 milhões de usuários móveis. Embora esses números de crescimento serem bastante bons para uma nova tecnologia, eles têm um longo caminho a percorrer para a captura de até 3 bilhões de assinantes atuais de serviços móveis celulares.

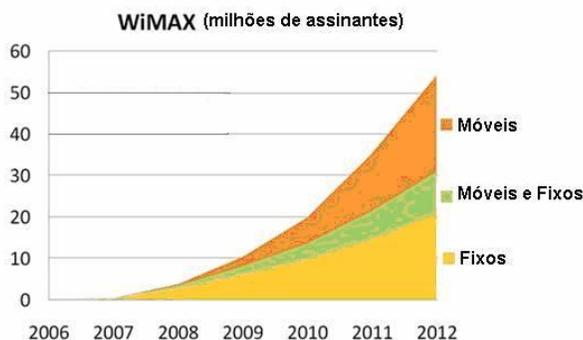


Figura 2.14: Estimativa de crescimento dos assinantes WiMax

2.5 Acesso de Banda Larga 3G

As tecnologias de telefonia móvel nos últimos anos atingiram avanços significativos em suas gerações. A primeira geração foi a dos celulares analógicos com a tecnologia AMPS e a segunda dos digitais com as tecnologias TDMA, CDMA, GSM, GPRS e EDGE.

A terceira geração ou “3G” com as tecnologias UMTS e HSDPA é a que proporciona transmissão de dados mais veloz, o que torna possível às operadoras oferecerem pacotes de serviços complexos com custos acessíveis.

Entre os serviços prestados estão TV no celular, *download* de músicas e vídeos, jogos em 3D e acesso a internet em banda larga que é o escopo deste capítulo. Como novidades promissoras estão os serviços de localização, muito populares na Ásia, que permitem encontrar restaurantes e centros comerciais de forma extremamente fácil.

Ao contrário das duas primeiras gerações em que o dispositivo terminal era exclusivamente um telefone, na terceira geração podemos utilizar os *smartphones*, modems, cartões de dados, GPS e também telefones (Figura 2.15).



Figura 2.15: Dispositivo 3G iPhone

As tecnologias 3G foram desenvolvidas por organismos de padronização que congregam operadoras, fabricantes e entidades de padronização regionais, dentre outros, sob a luz de um projeto específico criado pela União Internacional de Telecomunicações, denominado à época Programa IMT-2000.

Duas famílias de tecnologias 3G emergiram como as dominantes e foram comercialmente implementadas no mundo: UMTS, padrão desenvolvido pela 3GPP e CDMA2000, desenvolvido pela 3GPP2.

O Brasil já dispõe desde 2004 uma tecnologia 3G da linha do CDMA2000, chamada de EV-DO release 0. As taxas de pico de transmissão de dados desta tecnologia são de 2,4 Mbps para *download*. Outra tecnologia, da linha do WCDMA, chamada de HSDPA-*High Speed Downlink Packet Access* já está disponível em algumas capitais e regiões metropolitanas e brevemente estará disponível em todo o Brasil. As taxas de pico do HSDPA podem ser de 1.8, 3.6 ou 7.2 Mbps para *download*, dependendo da versão implementada. A evolução do HSDPA é o HSUPA, que eleva as taxas de upload para até 11 Mbps. As tecnologias HSDPA e HSUPA são chamadas genericamente de HSPA.

A conexão de um computador à Internet é efetuada utilizando como modem o próprio telefone celular, um celular na forma de uma placa PCMCIA ou um pequeno modem 3G do tamanho de um celular convencional que se conecta ao computador através de uma porta USB.

Este serviço passa a ser uma alternativa de acesso Banda Larga à Internet, competindo com o ADSL das operadoras de telefonia fixa, *Cable Modem* das operadoras de TV a Cabo e diretamente com as operadoras de acesso WiMax.

2.6 Comparativo entre as de acesso Tecnologias Wi-Fi 802.11, WiMax 802.16 e 3G

Os padrões IEEE 802.11 e 802.16 não são de forma alguma concorrentes, mas sim tecnologias complementares, e projetadas para resolverem problemas distintos, mesmo tendo muita semelhanças entre si. Os dois sistemas apresentam *hot spots* ou áreas de cobertura no entorno de uma estação central, onde os usuários podem compartilhar os recursos sem necessidade de uma infra-estrutura fixa. Da mesma forma, não está caracterizada uma concorrência entre o 802.11 e o 3G.

Já entre o 3G e o 802.16 está caracterizada uma concorrência direta, pois ambos possuem mesmo escopo, de fornecer acesso de última milha em banda larga, de forma fixa ou móvel e sem necessidade de visibilidade entre as estações.

A grande diferença entre os padrões 802.11 e os outros dois é que eles foram desenhados para aplicações completamente distintas. O 802.11 é voltado para as redes locais, desenvolvido para prover mobilidade à estas redes privadas, e o foco dos fabricantes de equipamentos está no usuário final.

Já o 802.16 e o 3G estão desenhados para prover acesso em banda larga sem fio para as regiões metropolitanas e rurais com o recurso de roaming. O intuito é fornecer um serviço de acesso à internet sem fio para ambientes fixos, móveis e portáteis, competindo com as tecnologias anteriormente vistas como o ADSL e *cable modem*, cujo foco dos fornecedores de equipamentos pode ser tanto nas empresas prestadoras de serviço ou ISP's para equipar seus *backbones*, quanto no usuário final.

Com a tecnologia 3G, o consumidor tem acesso a serviços de banda larga sem fio em qualquer tipo de computador. Seja através de placas de dados, modems USB ou *laptops* com módulos 3G embutidos, é possível conectar-se à Internet e desfrutar de velocidades de conexão comparáveis a banda larga convencional.

O WiMax irá fornecer tanto o acesso ao usuário final quanto os *backbones* para conectar os *hotspots* do 802.11 e extensões das conexões via *cable modem* e ADSL, garantindo o acesso em banda larga para a última milha (Figura 2.16).

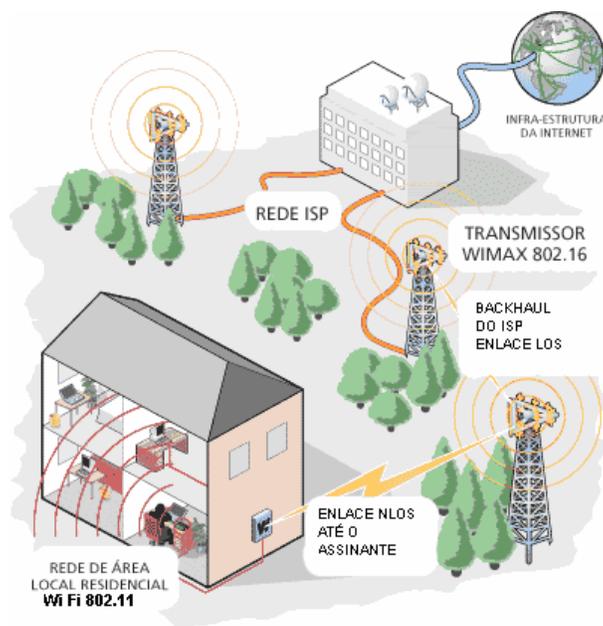


Figura 2.16: Exemplo de Integração 802.11 e 802.16

Além disto, o benefício crucial do padrão WiMax é a oferta de conexão internet banda larga em regiões onde não existe infra-estrutura de telefonia ou de TV à cabo, que são muito mais custosos.

O 802.16 tem a capacidade de fornecer acesso sem fio a milhões de assinantes à um custo relativamente baixo. Este benefício econômico proporciona a difusão dos serviços de banda larga em países em desenvolvimento, como o Brasil, influenciando

diretamente na melhoria das telecomunicações do país e conseqüentemente no seu desenvolvimento.

3 A CAMADA FÍSICA DO PADRÃO IEE 802.16

3.1 Visão Geral

Ao todo existem cinco padrões para a camada física do 802.16 (Figura 3.1). São eles: *Single Carrier* (SC), *Single Carrier A* (ScA), *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM), *Orthogonal frequency division Multiple Access* (OFDMA) e *High-speed Unlicensed MAN* (HUMAN).

O Single Carrier trabalha com uma portadora exclusiva em altas frequências, no modo LOS entre as estações. Já o Single Carrier Adaptativo opera também sem linha de visibilidade entre as estações (NLOS).

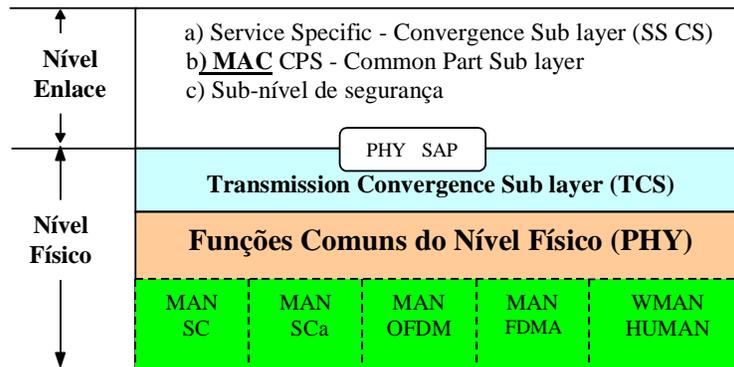


Figura 3.1: Camadas dos níveis físicos e enlace

O OFDM criado para aplicações de baixa criticidade, baixo alcance, empregando FFT com 256 portadoras. Da mesma forma, o OFDMA também emprega FFT, mas com 2048 e 4096 portadoras transmitidas ao mesmo tempo.

O tipo de modulação utilizada depende das especificações de cada modelo de camada física. Maiores taxas de símbolos produzem velocidades maiores com menor alcance e menores taxas de símbolo produzem velocidades menores com maior alcance (Figura 3.2). As modulações mais utilizadas são o BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM, 256-QAM.

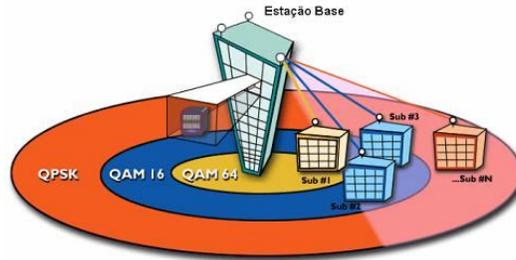


Figura 3.2: Modulações do 802.16

3.2 Single Carrier

Desenvolvida para operar entre as frequências de 10GHz e 66GHz com uma portadora única, possui muita flexibilidade, o que facilita o planejamento de células, serviços, capacidades e funcionalidades do canal.

Como opera em frequências elevadas, necessita que exista visibilidade entre as estações, e que sejam utilizadas antenas direcionais na estação cliente, o que minimiza a taxa de erros do enlace (Figura 3.3).

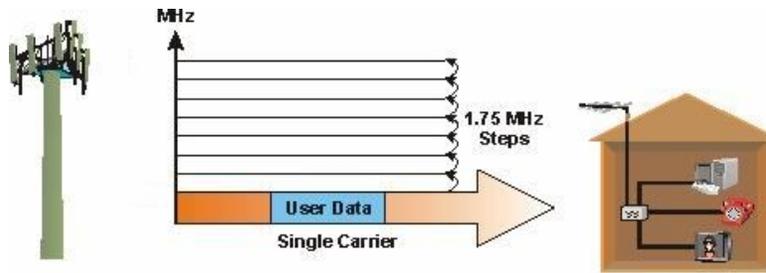


Figura 3.3: Exemplo de implantação de *Single Carrier*

O *uplink* baseia-se em uma combinação de TDMA e DAMA. Já o *downlink* é TDM, executando *broadcast* da informação destinada às estações de um mesmo setor.

Utiliza-se quatro tipos de modulação, BPSK, QPSK, 16-QAM e 64-QAM. Isto proporciona vários estágios de robustez e desempenho durante as rajadas.

Os quadros são divididos em sub-quadros, chamados de sub-quadros de *downlink* e sub-quadros de *uplink*. A multiplexação pode ser feita no domínio frequência ou no domínio tempo.

Para o domínio frequência, a técnica é chamada FDD ou Duplexação por Divisão em Frequência (Figura 3.4), onde os dois canais são alocados em frequências distintas e ativados ao mesmo tempo, desta forma existindo suporte para tráfego tanto *full-duplex* quanto *half-duplex*.

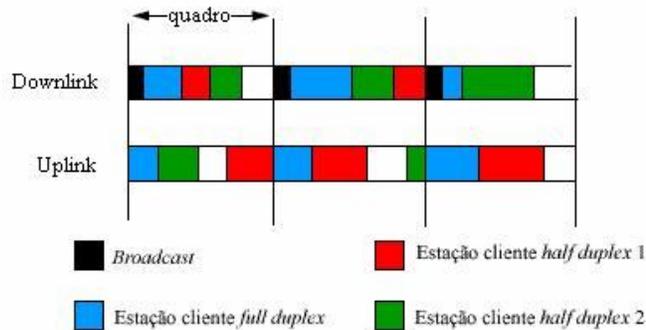


Figura 3.4 : Duplexação por Divisão em Frequencia

Para o domínio tempo a técnica é chamada TDD ou Duplexação por Divisão no Tempo (Figura 3.5), onde os canais utilizam a mesma frequência e são ativados em intervalos de tempo distintos. Mesmo o quadro possuindo tamanho fixo, a divisão entre os tempos dispendidos para *downlink* e *uplink* poderá ser diferente.

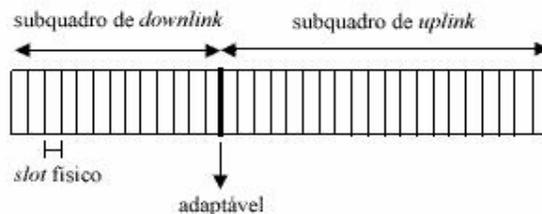


Figura 3.5: Duplexação por Divisão no Tempo

Quando estamos trabalhando no modo *half-duplex* em TDD, ocorrerão intervalos de tempo em que o meio estará sem ocupação. Estes intervalos são chamados de TTG de *transmit /receive transition gap* e RTG de *receive/transmit transition gap*, utilizados para prover sincronismo entre os quadros.

O TTG é o intervalo entre uma rajada de *downlink* e a de *uplink* subsequente, permitindo que a estação base entre no modo de recepção e que a estação cliente entre no modo de transmissão. Já o RTG é o intervalo entre uma rajada de *uplink* e a de *downlink* subsequente, ocorrendo o oposto com a BS e a SS.

No sub-quadro de *downlink* do TDD (Figura 3.6) é utilizado um preâmbulo pela camada física para sincronização e uniformização. Logo após, localiza-se uma seção de controle de quadro onde se encontra os DL-MAP e UL-MAP, que indicam os intervalos físicos onde as rajadas devem iniciar. Cada intervalo físico equivale a quatro símbolos QAM. As seções TDM seguintes portam os dados e dividem-se entre modulações e configurações de FEC diferentes, organizados em ordem decrescente de robustez.

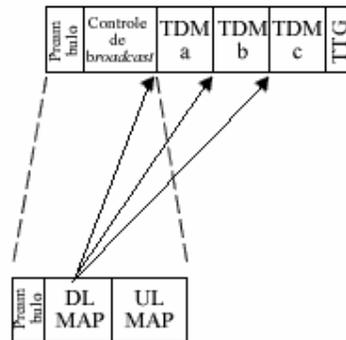


Figura 3.6: Sub-quadro de *Downlink* TDD

Após as seções TDM, é posicionado um intervalo TTG e cada BS decodifica os dados de controle, buscando cabeçalhos MAC indicativos de existência de dados na continuação do sub-quadro.

O sub-quadro de *downlink* do FDD (Figura 3.7) suporta estações cliente *full* e *half-duplex*, possibilitando que as estações *half-duplex* transmitam no mesmo quadro. Existe também uma seção TDMA controlada pelo DL-MAP, que permite a decodificação de algumas regiões distintas do sub-quadro, utilizado por estações SS *half-duplex* que precisem transmitir antes de receber o *downlink* completo.

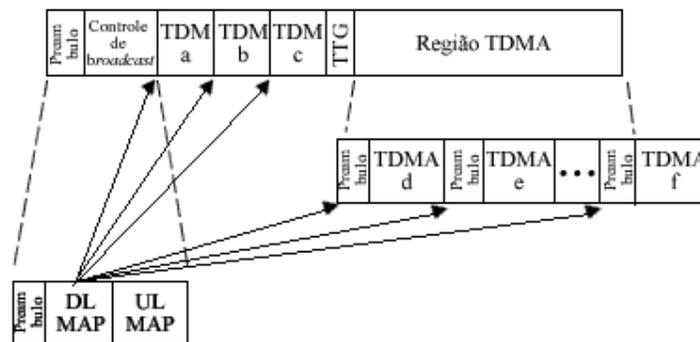


Figura 3.7: Sub-quadro de *Downlink* FDD

O sub-quadro de *Downlink* FDD inclui uma sub-camada de Convergência de Transmissão (Figura 3.8) que transforma os PDUs da camada MAC em blocos FEC de tamanho fixo. Apenas no final da rajada pode ter um bloco menor que o padrão. A TC também insere um ponteiro com o tamanho de um byte que verifica a identificação do início de cada PDU dentro do bloco FEC.

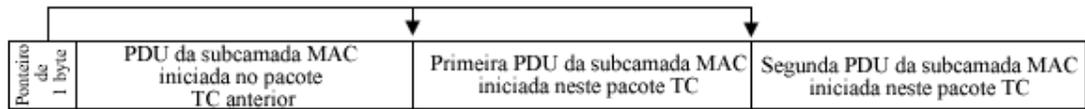


Figura 3.8: PDU de *downlink*, sub-camada de convergência de transmissão

No sub-quadro de *uplink* (Figura 3.9) as estações cliente transmitem nas posições indicadas pelo UL-MAP.

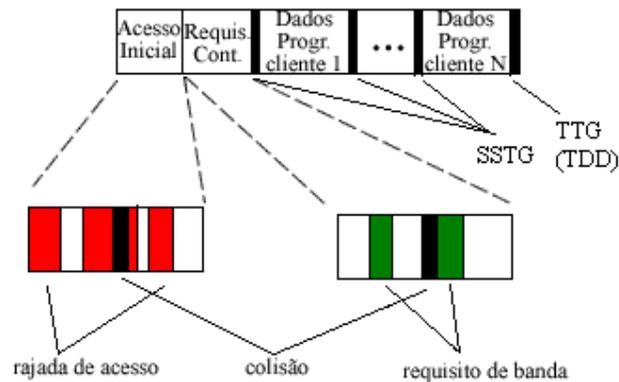


Figura 3.9: Sub-quadro de *uplink*

Existem também espaços reservados relacionados à contenção, para um primeiro acesso ao sistema ou requisições de banda em comunicações *broadcast* e *multicast*. A transmissão é TDMA com rajadas contendo uma quantidade variável de PDUs.

As transmissões de SS diferentes são separadas por SSTGs, que permitem a finalização completa do sinal anterior e sincronismo da BS com a nova SS.

3.3 Single Carrier Adaptativo (SCa)

Utiliza uma única portadora adaptativa na interface aérea, na faixa de frequências de 2 à 11GHz. Dessa forma viabiliza a transmissão NLOS entre a BS e a SS. Utiliza as modulações *spread* BPSK, BPSK, QPSK, 16-QAM, 64 QAM.

Suporta TDD e FDD permitindo utilizar diversos perfis de transmissão adaptativos em que os parâmetros de transmissão são ajustados individualmente para cada estação, quadro à quadro.

Com FDD, suporta tráfegos *full* e *half-duplex* já que utiliza duas frequências diferentes e cada uma pode utilizar modulações diferentes. Com TDD o quadro tem tamanho fixo, ajustando-se a porção do quadro destinada a *downlink* e *uplink*, assim fazendo-se a adaptação de velocidade nos dois sentidos.

O uplink utiliza TDMA e o downlink TDM ou TDMA, sendo especificadas estruturas de quadro que permitem melhor equalização e performance em enlaces sem visibilidade entre as estações e com um grande atraso de espalhamento.

3.4 OFDM

Multiplexação por divisão de frequência ortogonal, projetado para propagação NLOS, utilizando frequências abaixo de 11 GHz e FFT com 256 sub-portadoras. Destas, 192 são utilizadas para dados, 56 para banda de guarda e 8 pilotos utilizadas para sincronização e equalização.

O OFDM é uma técnica de multiplexação derivada do FDM, onde múltiplas portadoras ou sub-portadoras (Figura 3.10) com baixa taxa de modulação são transmitidas de forma paralela ou agrupadas, onde a soma das taxas individuais de modulação em cada sub-portadora resulta em elevadas taxas de transmissão.

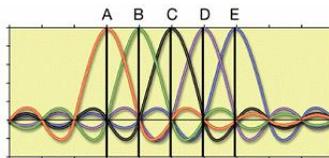


Figura 3.10: Sub-portadoras OFDM

O símbolo OFDM no domínio do tempo (Figura 3.11) é chamado de T_b , sendo que uma cópia do final do símbolo T_g é posicionada no início para coleta caso o sinal tenha passado por múltiplos caminhos, resguardando assim a sua ortogonalidade. A estrutura completa do símbolo com $T_b + T_g$ é chamado de T_s .

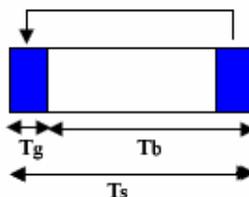


Figura 3.11: Estrutura do símbolo OFDM no tempo

No domínio frequência existem tres tipos de sub-portadoras (Figura 3.12) que são as de dados, as pilotos, e as nulas que são utilizadas como faixa de guarda, sub-portadoras inativas ou sub-portadoras DC. As faixas de guarda tem a função de permitir que o sinal decaia naturalmente criando a forma de “muro” do FFT. A sub-portadora DC equivale a frequência de rádio central da estação.

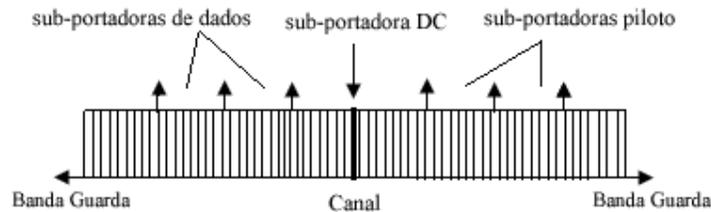


Figura 3.12: Tipos de Sub-portadoras do OFDM

As modulações utilizadas são o BPSK, QPSK com mapeamento de Gray, 16-QAM e 64-QAM.

O acesso múltiplo das SS é feito por divisão do tempo, TDMA, sendo o padrão adotado pelo WiMax Forum por ser menos susceptível às interferências.

Suporta TDD e FDD para bandas licenciadas. Em bandas não licenciadas a duplexação será TDD. Os quadros são divididos em OFDM 802.16d e seção de subportadoras (Figura 3.13).

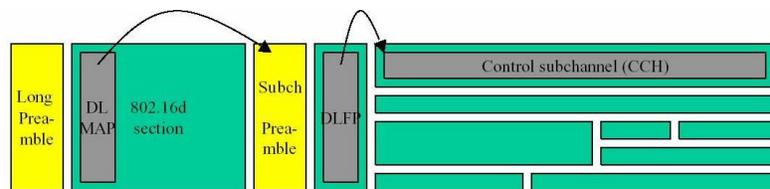


Figura 3.13: Quadro OFDM

A transmissão baseia-se em quadros, sendo o sub-quadro de downlink composto de apenas uma PDU enquanto o sub-quadro de uplink é dividido em intervalos de contenção programados para requisitos iniciais e de banda, além de um ou vários PDUs, transmitidos por diferentes SS.

3.5 OFDMA e SOFDMA

O OFDMA é uma versão multi usuário derivada do OFDM, utilizando 2048 sub-portadoras. Desenvolvida para operação sem linha de visada em frequências inferiores à 11GHz .

O acesso à múltiplos usuários é provido atribuindo um subconjunto de sub-portadoras para cada SS. Cada SS pode alocar quantidades diferentes de sub-portadoras, desta forma conseguindo taxas de transmissão e regras de QoS independentes para cada SS. Também introduz a tecnologia TDMA, que aloca diferentes segmentos de tempo a diferentes grupos de usuários. Todas as sub-portadoras OFDMA dividem-se em diversos grupos de sub-portadoras em domínios de frequência. Sendo cada um deles um sub-canal, e considerando que um usuário pode ocupar um ou mais sub-canais.

A utilização de 2048 sub-portadoras torna a FFT mais lenta, requerendo mais recursos de procesamento na sincronização, podendo utilizar também 4096 sub-portadoras.

O símbolo no domínio tempo é semelhante ao do OFDM (Figura 3.11), com T_s , T_b e T_g . A diferença está no domínio frequência, onde as sub-portadoras são aglutinadas em sub-canais (Figura 3.14).

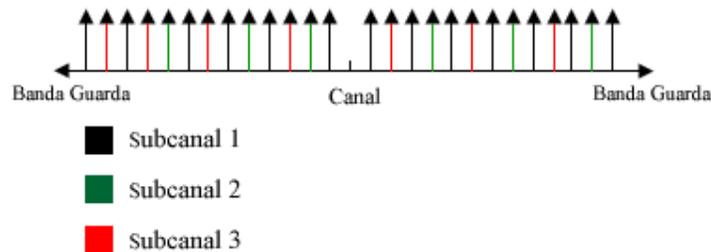


Figura 3.14: Sub-canais no OFDMA

No downlink cada sub-canal pode ser utilizado para a transmissão à grupos de usuários diferentes. No uplink cada SS pode utilizar um ou mais canais. Várias SS podem transmitir de forma simultânea. A divisão em sub-canais lógicos provê a escalabilidade, múltiplo acesso e processamento de grupos de antenas. Não é necessário que as sub-portadoras pertencentes a um mesmo canal sejam adjacentes

As modulações utilizadas são o QPSK com mapeamento de Gray, 16-QAM e 64-QAM, sendo esta última opcional.

Para as bandas licenciadas, a multiplexação pode ser FDD ou TDD. As SS podem ser H-FDD que combina as vantagens do TDD com a multiplexação de frequências do FDD. No caso de bandas não licenciadas a multiplexação deverá ser TDD.

O SOFDMA possui mais vantagens do que o OFDMA, já que não altera a largura de banda das sub-portadoras com diferentes larguras de banda de canal. Nesta tecnologia a quantidade de sub-portadoras é variável, podendo ser 128, 512, 1024 ou 2048 e são atribuídas com medições diretas de proporção com a largura de banda dos canais. Desta forma, com a largura de banda constante das sub-portadoras, proporciona uma melhor utilização do espectro para canais mais largos, e diminui o custo dos canais mais estreitos. A capacidade de anti-interferência por múltiplos caminhos é mantida, sendo esta uma característica essencial para suportar a mobilidade

A larguras de banda dinâmica providas pelo SOFDMA estão entre 1,25 MHz e 20 MHz. Como exemplo, em uma largura de banda de 10MHz, conseguimos taxas de 63Mbps para *downlink* e 28Mbps para *uplink*.

4 A CAMADA MAC DO IEEE 802.16

4.1 Estrutura geral da camada MAC

A chamada camada de acesso ao meio, ou camada MAC, tem a função de definir como e quando as BSs e as SSs podem iniciar uma transmissão, pois utilizam um meio comum, no caso o ar como meio de transmissão.

O protocolo foi desenvolvido para operar em aplicações ponto-multiponto, suportando taxas elevadas de transmissão tanto em downlink quanto em uplink. Devido à isto os algoritmos de alocação de taxa de dados devem acomodar centenas de SSs por canal. Na topologia PMP o estabelecimento da conexão para *downlink* é simples, já que apenas a BS transmite. Em *uplink* torna-se mais complexo pois existem diversas SSs disputando o acesso ao meio.

Os serviços demandados pelas estações de assinantes serão de características variadas, como VoIP, vídeo e dados, sendo assim o protocolo MAC deve acomodar tanto os fluxos contínuos quanto os fluxos de rajadas e garantir o QoS para estes tráfegos.

A camada MAC é orientada à conexão e está dividida em três níveis ou sub-camadas: convergência de serviços, parte comum e segurança.

4.1.1 Sub-Camada de Convergência (CS)

Na sub-camada de convergência (CS), os dados que recebe das camadas superiores são classificados em fluxos de serviços e conexões, associando à eles um SFID ou identificador de fluxo de serviços e um CID ou identificador de conexão. Isto proporciona o fornecimento de QoS mais adequada para cada fluxo de serviço. Outra atribuição da CS é a remoção de informações redundantes do cabeçalho dos pacotes, chamados SDU, cuja técnica é chamada de PHS.

Os fluxos de serviço para o provimento de QoS são classificados em cinco classes à seguir: UGS, rtPS, ErtPS, nrtPS e BE. O ErtPS só está implantado no padrão 802.16e, e os demais estão implantados tanto no 802.16e quanto no 802.16d.

4.1.2 Sub-camada de Parte Comum

A sub-camada de parte comum é a encarregada de executar a alocação de largura de banda, estabelecimento da conexão, manutenção da conexão, encerramento da conexão, escolha da razão de código e algumas outras funções também independentes de outras camadas. Nesta sub-camada são geradas as PDUs que são as unidades de dados responsáveis pela troca de informações entre as camadas MAC da BS e das SS. O quadro é formado por um cabeçalho de tamanho fixo, um payload de tamanho variável e um campo opcional de CRC.

A verificação de erros torna-se opcional pois é executada na camada física, e porque não são feitas retransmissões de quadros em tempo real.

As SDUs recebidas da sub-camada de convergência são divididas em várias PDUs, e para cada uma delas é atribuído um número de seqüência, para auxiliar o receptor na remontagem da informação.

Existem dois tipos de cabeçalho MAC, o genérico (Figura 4.1) e o de requisição de banda. São distinguidos pelo primeiro campo de um bit chamado HT. No cabeçalho genérico o campo HT é igual a zero.

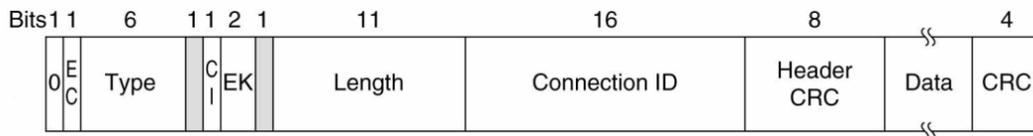


Figura 4.1: Cabeçalho MAC Genérico

O campo EC indica criptografia para o *payload*. O campo *Type* indica a presença de compactação e fragmentação, determinando o tipo do quadro. O bit CI aponta a utilização de CRC. O campo EK indica se as chaves de criptografia estão ou não sendo utilizadas. O campo *Length* indica o tamanho do quadro, com o cabeçalho incluso. O campo *Connection ID* identifica a conexão relativa deste quadro. O campo *Header CRC* é utilizado na detecção de erros do cabeçalho. O campo *Data* é a carga útil ou *payload*, sendo opcional em quadros de controle e o campo CRC executa a verificação dos erros.

No cabeçalho de solicitação de banda (Figura 4.2), o campo HT é definido como 1 e o EC como 0, já que não haverá carga à ser criptografada. No campo *Type* descreve-se o tipo do cabeçalho. No campo *Bytes needed* é especificada a banda passante que será requisitada pela SS. Os campos *Connection ID* e *Header CRC* possuem funções iguais às do cabeçalho genérico.



Figura 4.2: Cabeçalho MAC de requisição de Banda

4.1.3 Sub-camada de Segurança

A sub-camada de segurança possui a função de estabelecer a privacidade com criptografia e a autenticidade de quem estabelece a conexão. Está no adendo 802.16-2004 as especificações dos algoritmos de criptografia DES no modo CBC, o triple-DES e o AES. Contudo encontramos ainda vulnerabilidades, graças o meio em que são transmitidas as informações, neste caso o ar. Neste meio as transmissões podem mais facilmente ser interceptadas e modificadas do que em meios confinados como as redes cabeadas.

4.2 Características de mobilidade

O advento do 802.16e ou 802.16-2005 trouxe talvez a característica mais atrativa da tecnologia WiMax, mobilidade. Essa característica vem associada a grande largura de banda e enorme área de cobertura, para isto o padrão utiliza tecnologias como o SOFDMA, AAS e MIMO. De qualquer forma, há um novo problema a ser resolvido que é o processo de *handover*.

O *handover* (Figura 4.3) é o processo em que uma estação móvel (MS) conectada a uma determinada BS, está em deslocamento na direção de uma BS mais próxima dela, e então deve ser desfeita a conexão com a BS antiga e feita uma nova conexão com a BS da célula mais próxima. Este procedimento tem que ser transparente e imperceptível ao usuário, a sua seção com a internet deve ser contínua e sua conexão de VoIP sem cortes ou atrasos. Resumindo, o usuário tem que ser capaz de se deslocar entre as células sem perder as conexões estabelecidas.

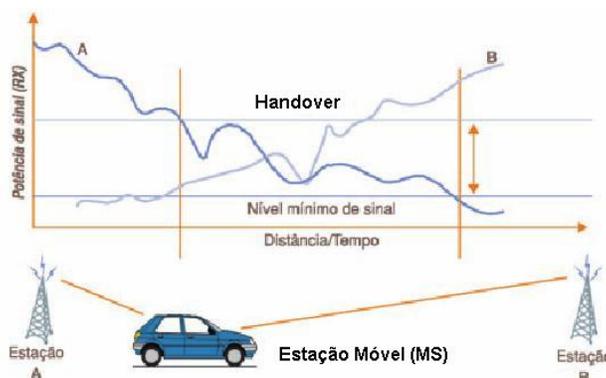


Figura 4.3: *Handover*

Existem três tipos de *handover* : HHO, MDHO e FBSS. Dos três, o HHO é obrigatório, e os outros dois opcionais. Primeiro a estação móvel tenta descobrir a topologia da rede onde está e procura por BS próximas que tenham sinal de qualidade. Ela trocará estas informações com sua BS atual que escolherá entre as demais uma com melhores condições de receber a estação móvel, que será chamada de BS alvo. A Estação móvel então envia uma indicação para a sua BS de que deseja iniciar o procedimento de *handover*. A atual BS irá responder a solicitação de *handover* da estação móvel, que desfaz esta conexão e efetua nova conexão com a BS alvo.

Todo esse procedimento é apenas para reconhecimento da rede, cujo processo de *handover* será efetivamente iniciado a partir de agora sendo composto das seguintes fases: re-seleção de células, decisão e iniciação do *handover*, sincronização, *ranging*, término do contexto da MS e cancelamento do *handover*.

Podem ser encurtadas as fases de re-seleção de células e decisão de iniciação de handover, pois consistem em procedimentos semelhantes realizados na etapa de reconhecimento da rede. A decisão de qual BS será eleita como alvo poderá partir também da MS, feito isso ocorre a fase de sincronização com os canais de downlink e uplink da BS alvo. Na fase de ranging ocorrerá a autenticação, autorização e demais procedimentos para registrar a MS na BS alvo com o objetivo de evitar problemas de segurança. Na fase de término do contexto da MS, a BS antiga apaga os registros da MS. A fase de cancelamento é opcional e a MS pode escolher o cancelamento do procedimento de *handover* a qualquer instante.

O handover tipo MDHO da-se quando uma MS quer trocar informações com várias BSs. O handover tipo FBSS ocorre quando não há envio de mensagens para a BS atual requisitando o handover, e sim a MS apenas inicia uma nova conexão com uma BS alvo sem informar à BS atual.

Para a mobilidade alguns obstáculos naturais devem ser superados pelo enlace de rádio entre BS e MS, como o fading e o efeito *Doppler*.

O *fading* ou esvanecimento do sinal consiste na ação destrutiva entre as ondas de rádio recebidas por uma MS provenientes de uma célula e outras emissões vindas de outras células e reflexões causadas por edificações, obstáculos naturais ou obstáculos móveis. Inversões térmicas também podem prejudicar a propagação de RF ocasionando o *fading* principalmente durante o inverno.

O efeito *Doppler* (Figura 4.4), é um fenômeno físico, descrito pela primeira vez em 1842 por *Johann Christian Andréas Doppler*, onde a velocidade relativa entre o transmissor e o receptor altera o comprimento de onda de RF percebida pelo receptor.

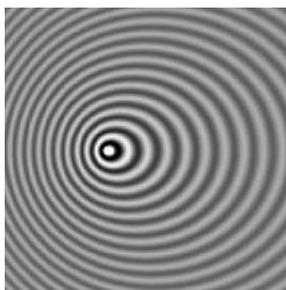


Figura 4.4: Representação do efeito *Doppler*

Esta alteração no comprimento de onda depende do sentido relativo do deslocamento entre as estações. Se as estações estiverem se aproximando, o comprimento de onda percebido no receptor diminui. Se estiverem se afastando o comprimento de onda percebido aumenta. Este efeito pode gerar perda de sintonia e sincronismo no receptor caso as velocidades de deslocamento sejam muito altas.

Para atenuar este efeito físico são necessárias rotinas específicas nos receptores, o que acaba aumentando o processamento dos DSPs, tornando o projeto mais complexo.

4.3 Arquitetura de QoS do WiMax

Farei nos parágrafos seguintes uma breve revisão dos conceitos de QoS de forma genérica antes de abordar especificamente os mecanismos de QoS do 802.16.

O termo de engenharia de tráfego chamado de QoS ou Qualidade de Serviço refere-se as condições da rede de atender a um determinado contrato de tráfego. Ou a probabilidade de um pacote ser transmitido e recebido com integridade entre dois pontos quaisquer de uma determinada rede. Em telefonia, a QoS refere-se a ausência de ruídos, cortes, atrasos, distorções e atenuações na conversação.

Nos primórdios da internet não existia a necessidade para aplicação de QoS. Então a rede utilizava o sistema de melhor esforço ou *best effort*. Existiam quatro bits para identificar o tipo de serviço e tres bits de precedência em cada pacote, mas geralmente estes bits não eram utilizados.

O IETF tem definidos dois modelos para a implantação de QoS, o *IntServ* e o *DiffServ*.

O *IntServ*, introduzido pelo IETF em 1994 através da RCF 1663, trata de uma sinalização de QoS onde o transmissor informa suas necessidades de QoS para que a rede providencie todos os recursos necessários. Neste modelo é definido uma especificação de tráfego, a qual identifica o tipo de aplicação que chega na rede, exigindo que todos os elementos de rede realizem o policiamento e a verificação de conformidade do tráfego. O RSVP relativo à RCF 2205 é o protocolo de sinalização do *IntServ*, utilizado pelas aplicações para solicitar suas demandas de QoS para a rede. O RSVP efetua as reservas de recursos para fluxos individuais na internet. Os roteadores ao longo da rota podem rejeitar ou aceitar a largura de banda solicitada no enlace, tratando-se de um protocolo muito eficiente do ponto de vista da QoS.

O *DiffServ* com uma proposta mais recente, através da RCF 2475 é contrário à orientação por fluxo do RSVP, implementando diferenciação de serviços de maneira escalonável. Neste modelo há um esquema de classificação e marcação de pacotes ao longo do percurso, sem utilizar protocolos de alocação dinâmica de recursos. Desta forma os pacotes são classificados, marcados e processados segundo o rótulo DSCP indicado no campo ToS do cabeçalho IP. O campo ToS também é chamado de DS. Em cada roteador *DiffServ*, os pacotes são analisados de forma individual e tratados de acordo com a indicação DSCP do campo DS. Caso o roteador não conseguir atender à classificação desejada, passará para a classe seguinte. O grande benefício do *DiffServ* é a escalabilidade, pois elimina a necessidade do processamento por fluxo, enquadrando-se nas redes de grande porte.

As duas arquiteturas *IntServ* e *DiffServ* são soluções complementares, que podem ser utilizadas em conjunto, sendo na prática o *DiffServ* aplicado no backbone por ser a solução mais leve, e o *Intserv*/RSVP nas redes de acesso, provendo controle dos requisitos de QoS das aplicações.

Muitos problemas podem ocorrer com os pacotes viajando pela rede, entre eles:

Descarte de pacotes. Os roteadores podem falhar na manipulação dos pacotes se estes chegarem quando os *buffers* dos roteadores estiverem lotados. Alguns, nenhum ou todos os pacotes podem ser descartados, de acordo com o estado da rede, sendo difícil determinar o que ocorreu antes. A recepção da aplicação deve solicitar a retransmissão da informação perdida, o que poderá acarretar severos atrasos na comunicação.

Atraso. Os pacotes podem levar um tempo longo até chegarem ao destino. Devido à ser submetido a longas filas nos dispositivos de rede, ou seguir uma rota mais longa

tentando evitar o congestionamento de rotas mais curtas. Pode desta forma seguir caminhos completamente distintos alternadamente, sendo imprevisível o atraso.

Jitter. Os pacotes ao chegarem ao destino com atrasos diferentes entre si ocasionam variações no atraso, fenômeno conhecido com *jitter*. Estas variações no atraso podem prejudicar de forma substancial conexões de voz ou vídeo sobre IP.

Entrega fora de ordem. Quando um conjunto de pacotes ao serem roteados pela internet por caminhos distintos, geram atrasos diferentes. Isto acarreta a possibilidade de um pacote que foi encaminhado antes, chegue após um pacote que foi encaminhado depois dele, ou seja, chegam fora de ordem. Para resolver esta questão são empregadas rotinas específicas nos elementos de rede para reordenar os pacotes.

Erro. Em alguns casos os pacotes podem ser adulterados, corrompidos ou duplicados. Então o receptor precisa detectar esta inconformidade e descartar o pacote, solicitando ao transmissor sua retransmissão.

Algumas aplicações requerem determinados níveis de QoS para que sejam aceitáveis. Como exemplo, poderão ser citados os *Streaming* de *multimedia* por exigir uma vazão garantida. Telefonia sobre IP ou VoIP por exigirem limites restritos de *jitter* e atraso. Videoconferência também exigem limites restritos de atraso e *jitter*. Aplicações de segurança críticas como telemedicina exigem níveis elevados de disponibilidade, e baixos níveis de atraso, *jitter*, descartes e erros.

Estas aplicações conhecidas como inelásticas, quer dizer que requerem um determinado nível de largura de banda para funcionarem, sendo classificadas em diferentes classes de serviço.

CBR ou *Constant Bit Rate*. O principal objetivo de um serviço desta classe é suportar aplicações de tempo real, como VoIP ou videoconferência. Alguns fornecedores possuem configurações especiais para minimizar o atraso e o *jitter*, mantendo a voz com boa qualidade. Também podem armazenar o fluxo CBR em buffers diferentes dos serviços CIR e BE. De forma geral os fluxos CBR deveriam ter uma maior prioridade ao serem comparados ao CIR e BE, ou seja estes últimos serviços seriam atendidos após o tratamento dos fluxos CBR.

CIR ou *Committed information rate*. É entendido como a taxa mínima garantida. Durante o período em que a conexão for estabelecida, a largura de banda ao longo do caminho é fixada e reservada.

BE ou *Best effort*. Descreve o serviço de rede em que esta não oferta condições especiais para recuperação de dados descartados ou com erros. Os elementos de rede reservam um percentual da capacidade do enlace para o fluxo BE. Prevenindo desta forma que fluxos mais prioritários como o CBR e o CIR anulem o fluxo BE quando o enlace estiver congestionado. Os fluxos BE compartilham os recursos da rede entre eles de forma igualitária. Caso os fluxos das classes de serviço CIR ou CBR não estiverem ocupando a banda à eles reservada, então esta banda poderá ser utilizada pela classe BE.

Especificamente no 802.16 na sua camada de enlace e dentro da sub-camada de convergência são de forma geral definidos os tipos de serviços à serem escalonados (Figura 4.5). São eles:

rtPS - Atraso e banda controlados, videoconferência. *BW Request* por *polling*.

nrtPS - Banda controlada, WEB, SMS, e-mail. *BW Request* por *polling*.

UGS - Serviços garantidos com banda constante, VoIP. Sem *BW Request*.

BE - Best effort services. *BW Request* por contenção.

As formas de escalonamento não são definidas nesta camada, mas deixando abertura para implementações de algoritmos de escalonamento, controle de admissão e policiamento de tráfego.

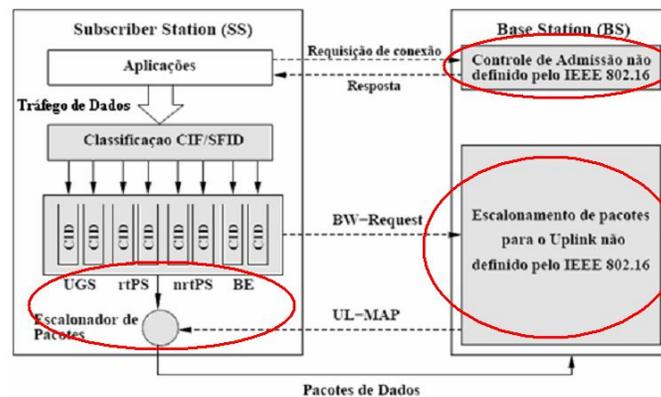


Figura 4.5: Mecanismo de QoS

Nesta arquitetura é proposto um suporte à QoS para tráfego em tempo real ou rtPS com alta prioridade, mantendo o desempenho e vazão em níveis aceitáveis para o tráfego de menor prioridade.

O escalonador de *uplink* da SS transmite pacotes UGS e verifica o tempo de chegada do pacote virtual do rtPS. A BS determina o *deadline* do pacote, que é seu tempo de chegada mais a condição de atraso máximo da conexão. A BS pode determinar a ordem do *poll* baseada nesta informação. O rtPS utiliza o modo livre de contenção ou modo de contenção. Caso a SS receba *poll* pela BS e tenha conexão rtPS na fila, a conexão nrtPS pode transmitir requisição de banda ou *BW-Request*. O BE usa apenas o modo de contenção.

O escalonador de *uplink* da BS com base nas informações de *deadline* e usando o mecanismo de *polling*, escalona as SSs no próximo quadro. A BS então é capaz de conceder *poll* para a SS com o *deadline* mais próximo. A classe de maior prioridade tem a sua largura de banda alocada primeiro, logo após são alocadas as bandas para as classes seguintes.

A conexão MAC ajuda na provisão de QoS, requisição de banda *BW Request* e controle de tráfego. Além do endereço MAC nativo do equipamento, também é utilizado um identificador de conexão de 16 bits, totalizando até 65 mil conexões.

As SS utilizam-se de 3 conexões de gerenciamento, denominadas de:

Conexão Básica de Gerenciamento, para mensagens críticas e curtas;

Conexão Primária, para autenticação, mensagens longas e tolerantes a atraso;

Conexão Secundária, para configuração via SNMP.

Além das conexões de Gerenciamento, o nível MAC possui também conexões para serviços iniciais de contenção, serviços de *broadcast* no sentido *downlink*, sinalização reversa do tipo *broadcast* em serviços baseados em contenção e *polling*.

As solicitações de largura de banda ou *BW Request* podem ser executadas de duas formas:

Com contenção, a SS envia um *BW Request* durante o intervalo de reserva. Caso ocorra colisão ela será resolvida via algoritmo de *back-off*.

Sem contenção, a BS faz *polling* para cada SS e elas respondem enviando um *BW-Request*.

5 O MERCADO BRASILEIRO PARA ACESSOS WBA

5.1 Serviços de WBA fixos e móveis

No início deste novo milênio, várias tecnologias de acesso à banda larga estão sendo disponibilizadas ao mercado, tanto tecnologias fixas como móveis.

Para as tecnologias fixas podemos destacar os acessos por fibra óptica como EPON, FTTx e EFM . Também as tecnologias metro ethernet e carrier ethernet. As concessionárias de energia também possuem um fantástico mercado com o PLC, podendo atingir as regiões mais remotas com um investimento relativamente pequeno.

Para as tecnologias móveis, obrigatoriamente sem fio, destacam-se as tecnologias celulares 3G, WPAN, WLAN ou WiFi e WMAN ou WiMax.

5.2 Características do WBA do WiFi 802.11

A tecnologia WiFi tornou-se a de mais rápida adoção no mundo computacional nos últimos anos. O padrão 802.11b foi o primeiro a ganhar força no mercado brasileiro à partir de 2002. Este padrão permite taxas de 1Mbps à 11Mbps, sendo que parte da banda é alocada para o controle, a taxa efetiva de dados é no máximo 5,2Mbps.

Para resolver o problema de falta de banda, em 2001 surgiu o padrão 802.11g, também conhecido como WiFi2, que teve seu uso solidificado em 2003, com uma taxa de transmissão padrão de 54Mbps na faixa de frequência de 2,4GHz. Como trabalha na mesma faixa do 802.11b, os dois padrões são compatíveis, podendo um AP 802.11g aceitar um cliente 802.11b, limitado à 11Mbps.

Em 2005 os fabricantes lançaram um recurso que possibilita ao 802.11g atingir a taxa de 108Mbps, chamado de *speedbuster* ou super G, ultrapassando desta forma a velocidade da rede cabeada do padrão 802.3 que é 100Mbps.

Com enfoque em cobrir áreas desprovidas de acessos banda larga, alguns provedores tem adotado a tecnologia WiFi como alternativa ao xDSL, utilizando antenas externas direcionais de ganho elevado nas instalações do cliente, podendo cobrir grandes áreas estendendo o alcance da LAN neste tipo de aplicação.

Utilizando o 802.11 com topologia de rede em malha, são oferecidas soluções mais escaláveis do que as implementações com antenas direcionais. Entretanto devido a QoS e as comunicações entre os APs serem proprietárias, farão com que os provedores de serviço busquem no WiMax a solução de *backhaul* entre os APs.

5.3 Características do WBA do WiMax

O acesso WBA do WiMax possui uma muitas vantagens em relação às tecnologias fixas.

Menor custo de implantação devido ao fato de não existir a necessidade de enterrar cabos , mesmo com os equipamentos terminais como antena e transceptor sendo mais caros. O cliente faz a implantação seletiva, ou seja, ele determina o perfil de serviços e facilidades contratadas.

Tempo de instalação infinitamente menor, conseguindo-se disponibilizar uma quantidade muito maior de acessos por unidade de tempo do que as tecnologias fixas.

Maior cobertura em regiões despovoadas e desprovidas de infra-estrutura de telecomunicações. Em áreas com maior densidade populacional também é uma opção atrativa, já que oferece facilidade de instalação e altas taxas de transmissão de dados. Sua cobertura em zona urbana é cerca de 7Km, zona sub-urbana 10Km e zona rural 40Km.

As frequências são reutilizadas e inter-operam com outros sistemas móveis e sistemas celulares, desta forma otimizando a ocupação do espectro de rádio frequências.

A QoS é assegurada ao clientes, pois pode garantir maior largura de banda à aplicações corporativas como baixa latência para videoconferência e VoIP, e oferecer apenas *best effort* com custo mais baixo para aplicações residenciais. Com suporte completo para o serviço WBA, pois foi projetado para tal, é capaz de comportar maior número de usuários oferecendo taxas de transferência de dados maiores comparado à soluções de última milha baseadas em 802.11.

No padrão 802.16-2004 as taxas de transmissão podem chegar à 75Mbps no modo fixo, nomádico ou portátil e sem mobilidade entre as BSs pois não executa *handoff* automático. Com o 802.16e soma-se as características móveis ao WiMax, executando o *handoff* automático entre BSs em velocidades de deslocamento de até 100Km/h sem perder a conexão, da mesma forma como acontece na telefonia celular.

5.4 Características do WBA brasileiro

Todas estas tecnologias vistas até aqui possuem um mercado em constante crescimento, principalmente no Brasil, onde ainda 80% da sua população não possuem acesso à internet.

Dos lares brasileiros que possuem acesso à internet, o que corresponde a aproximadamente 20% da população, 24% ainda é por acesso discado, e 76% já o fazem via banda larga. Com estas estatísticas percebe-se que temos um gigante mercado para o WBA, ou seja em torno de cento e cinquenta e cinco milhões de pessoas, que estão analfabetas tecnologicamente

Muitas tecnologias de acesso à banda larga sem fio começam a despontar no Brasil. Uma delas é a terceira geração de telefonia celular ou 3G, que propõe acesso e serviços pela internet em taxas muito superiores às atingidas pelas tecnologias de segunda geração, como GPRS, EDGE e CDMA. Como principais sistemas de terceira geração temos como exemplo o WCDMA/HSPDA que é o padrão europeu e o CDMA2000 que é o padrão norte-americano.

O serviço 3G no mercado brasileiro iniciou este ano, e a estratégia da Anatel é de ter 4 empresas operadoras concorrendo em cada área de concessão, que são ao todo onze.

O mercado brasileiro para o WiMax conta atualmente com duas grandes empresas operadoras que possuem blocos de frequências licenciadas, que são a Embratel e Brasil Telecom, que utilizará licenças que foram adquiridas pela Vant. A Embratel terá uma cobertura inicial em 12 capitais, com expansão para 61 cidades e posteriormente 200 cidades na sua área de cobertura, com mercado alvo em pequenas e médias empresas.

Outra empresa que opera no estado de Santa Catarina desde 2005 ainda na faixa não licenciada é a Global Wave. Tem um total de aproximadamente 400 acesso de banda larga no padrão fixo 802.16-2004. Seu foco é o mercado residencial e empresas pequenas e médias. Para aumentar sua capilaridade utiliza-se do 802.11g. Sua meta é expandir sua atuação para outras localidades do estado de Santa Catarina e atender cerca de 3000 clientes.

No Rio Grande do Sul a empresa PARKS distribui equipamentos para acesso WiMAX, através de parceria com a fabricante de componentes Intel e CPqD. O investimento de R\$ 2,8 milhões em sua fábrica na cidade de Cachoeirinha na grande Porto Alegre permitiu que a produção de modems e antenas para WiMAX cheguem ao mercado com preço cerca de 30% inferior aos equipamentos importados.

O maior desafio da Anatel e de todas as empresas fornecedoras de WBA é a inclusão digital da maioria absoluta da população. Muitos são os projetos de inclusão digital realizados hoje no Brasil, como o Observatório da Cultura, Centros Vocacionais Tecnológicos e Projeto Casa Brasil. Para o sucesso destes trabalhos as tecnologias como o WiMax e WiFi podem e devem dar uma grande contribuição.

6 CONCLUSÕES

O trabalho apresentado teve como premissa apresentar a tecnologia WiMax, e sob certos aspectos compara-la com outras tecnologias de acesso à banda larga disponíveis em nosso mercado.

Percebe-se um grande potencial de desenvolvimento e de oportunidades para esta tecnologia, que não impõe barreiras para sua implementação, muito pelo contrário, vem a facilitar sobremaneira a prestação do serviço de acesso em banda larga em regiões antes consideradas sem cobertura e também em áreas cobertas pela tecnologia convencional.

Um dos objetivos do WiMAX é criar um mercado mais competitivo, aumentando a oferta de serviços de banda larga, resolvendo os problemas de desempenho hoje existentes em outras tecnologias.

À exemplo da telefonia celular, que democratizou o acesso para os serviços de telecomunicações, antes considerados de elite, o WiMax promete dentro de alguns anos atingir este cenário de total inclusão digital da sociedade.

OBRAS CONSULTADAS

- ROCHOL, J. **Redes sem Fio, Celulares, WiFi e WiMax**. Porto Alegre: CD/UFRGS, 2007.
- SILVA, G.; BARRADAS, O.C.M. **Telecomunicações: Sistemas Radiovisibilidade**. 2.ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1978.
- SOARES, L.F.G. **Redes de Computadores: das LANs, MANs e WANs às Redes ATM**. Rio de Janeiro: Campus, 1995.
- PERRI, E.B. **Engenharia de Antenas**. 2.ed. São Paulo: E. Blucher, 2002.
- HALÁSZ, I.T.H. **Handbook do Radioamador**. São Paulo: Edusp, 1993.
- TANENBAUM, A.S. **Organização Estruturada de Computadores**. 3.ed. Rio de Janeiro: Prentice-Hall do Brasil, 1992.
- JARDIM, F.M. **Treinamento Avançado em Redes Wireless**. São Paulo: Universo dos Livros, 2007.
- DUZER, T.V. **Fields and Waves in Communication Electronics**. Tokyo: Toppan Printing Company, 1965.
- TANENBAUM, A.S. **Redes de Computadores**. 4.ed. Rio de Janeiro: Campus, 2003.
- IEEE. The IEEE 802.16. **Working Group on Broadband Wireless Access Standards**. Disponível em: <<http://www.ieee802.org/16/>>. Acesso em: out. 2008.
- RNP. **O que é Wi-Max**. Disponível em: <<http://www.rnp.br/noticias/2005/not-050927-coord.html>>. Acesso em: out. 2008.
- DIGITALRADIOTECH. **OFDM**. Disponível em: <<http://www.digitalradiotech.co.uk/cofdm.htm>>. Acesso em: out. 2008.
- WIMAX FORUM. **Technical Documents and Specification**. Disponível em: <<http://www.wimaxforum.org/documents/documents>>. Acesso em: out. 2008.