

UNIVERSIDADE SÃO FRANCISCO
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

**REDES SEM FIO UTILIZANDO O SISTEMA WIMAX, BASEADO NO
PADRÃO 802.16**

Área de Telecomunicações

por

Arlton Faria Alves

Carlos Henrique Rodrigues de Oliveira, Doutor
Orientador

Itatiba (SP), Dezembro de 2005

UNIVERSIDADE SÃO FRANCISCO
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

**REDES SEM FIO UTILIZANDO O SISTEMA WIMAX, BASEADO NO
PADRÃO 802.16**

Área de Telecomunicações

por

Arlton Faria Alves

Relatório apresentado à Banca Examinadora do
Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia
Elétrica para análise e aprovação.
Orientador: Carlos Henrique Rodrigues de
Oliveira, Doutor

Itatiba (SP), Dezembro de 2005

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a meus pais, a meus irmãos e a minha namorada, pela participação e incentivo em todos os momentos da minha vida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço meu professor e orientador Carlos Henrique Rodrigues de Oliveira pela dedicada orientação para a realização deste trabalho.

Agradeço também meus colegas de graduação que participaram direta ou indiretamente na realização deste trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE ABREVIATURAS	vi
LISTA DE FIGURAS	viii
LISTA DE TABELAS	ix
RESUMO	x
ABSTRACT	xi
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. OBJETIVOS	2
2. REDES SEM FIO	3
2.1. INTRODUÇÃO	3
2.2. TIPOS DE TRANSMISSÃO SEM FIO	3
2.2.1. Laser	4
2.2.2. Ondas de Rádio	5
2.2.3. Microondas	5
2.2.4. Infravermelho	6
2.3. TIPOS DE REDES SEM FIO	7
2.3.1. Redes Pessoais Sem Fio (<i>Wireless Personal Area Network</i> WPAN)	7
2.3.2. As redes locais sem fio (<i>Wireless Local Area Network</i> Lan)	7
2.3.3. Redes Metropolitanas Sem Fio (<i>Wireless Metropolitan Area Network</i> WMAN)...	8
2.3.4. As Redes Geograficamente Distribuídas Sem Fio (<i>Wireless Wide Area Network</i> WWAN)	9
2.4. REDES METROPOLITANAS SEM FIO	9
2.4.1. O padrão IEEE 802.16	10
2.4.2. O WiMAX	12
3. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DO PADRÃO 802.16	14
3.1. ARQUITETURA DO PROTOCOLO	14
3.2. A CAMADA FÍSICA	16
3.2.1. Modulação OFDM	20
3.2.2. TÉCNICA DE ACESSO OFDMA	22
3.3. A CAMADA MAC	22
3.3.1. Subcamada de Convergência Específica ao Serviço	23
3.3.2. Subcamada da Parte Comum	24
3.3.3. Subcamada de Privacidade	25
3.4. FORMATO DA PDU MAC	25
3.5. FRAGMENTAÇÃO E EMPACOTAMENTO	28
3.6. ESTRUTURA DO FRAME	29
3.7. REQUISIÇÃO DE LARGURA DE BANDA	31

3.8. CONCESSÃO DE LARGURA DE BANDA	32
3.9. QUALIDADE DE SERVIÇO (QOS)	32
3.9.1. Serviço de Taxa de Bits Constante.....	33
3.9.2. Serviço de Taxa de Bits de Variável de Tempo Real	33
3.9.3. Serviço de Taxa de Bits de Variável em Tempo Não Real	33
3.9.4. Serviço de Menor Esforço.....	34
4. FATORES DE INTERFERÊNCIA E CARACTERÍSTICAS DE INSTALAÇÃO.....	35
4.1. INTRODUÇÃO.....	35
4.2. INTERFERÊNCIAS.....	35
4.2.1. Interferências Causadas pelo Meio de Propagação	36
4.2.2. Efeitos da Falta da Linha Visada.....	39
4.2.3. Exame da Linha da Visada e da Zona de Fresnel	42
4.3. DETERMINANDO A ARQUITETURA DA REDE	44
4.3.1. Arquitetura Ponto-a-Ponto.....	44
4.3.2. Arquitetura Ponto-Multiponto.....	45
4.3.3. Arquitetura <i>Mesh</i>	46
4.4. CARACTERÍSTICAS DE INSTALAÇÃO DO SISTEMA.....	48
4.4.1. Antenas	50
4.4.2. Análise da Disposição dos Componentes da Rede.....	52
4.4.3. O Uso de Repetidores	54
4.4.4. Estações Base Adicionais	55
4.4.5. Agregação do Tráfego	55
5. IMPLEMENTAÇÃO DE UMA REDE SEM FIO	58
5.1. EQUIPAMENTOS UTILIZADOS	58
5.2. APLICAÇÃO	60
5.3. FUNCIONAMENTO DOS RÁDIOS	60
5.4. CUSTOS DA IMPLANTAÇÃO	63
5.5. WIMAX VERSUS FIBRA ÓPTICA.....	64
5.5.1. Vantagens das Redes Sem Fio	64
5.5.2. O Alto Custo da Fibra Óptica	65
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	67
6.1. TRABALHOS FUTUROS	68
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	69
GLOSSÁRIO	72

LISTA DE ABREVIATURAS

TCC	Trabalho de Conclusão de Curso
USF	Universidade São Francisco
WiMAX	<i>Worldwide Interoperability for Microwave Access Forum</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineering</i>
QoS	Qualidade de Serviço
VoIP	Voz Sobre IP
TDD	<i>Time Division Duplex</i>
FDD	<i>Frequency Division Duplex</i>
DSL	<i>Digital Subscriber Line</i>
WLANs	<i>Wireless Local Area Networks</i>
WPANs	<i>Wireless Personal Area Networks</i>
WMANs	<i>Wireless Metropolitan Area Network</i>
WWANs	<i>Wireless Wide Area Network</i>
PDA's	<i>Personal Digital Assistants</i>
OFDMA	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing Access</i>
WAN	<i>Wide Area Network</i>
WLL	<i>Wireless Local Loop</i>
LMDS	<i>Local Multipoint Distribution System</i>
ADSL	<i>Asymmetric Digital Subscriber Line</i>
OFDM	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>
CPE	<i>Customer Premises Equipment</i>
NLOS	<i>Non Line of Sight</i>
LOS	<i>Line of Sight</i>
ATM	<i>Asynchronous Transfer Mode</i>
DAMA	<i>Demand Assignment Multiple Access</i>
TDMA	<i>Time Division Multiple Access</i>
IUC	<i>Interval Usage Code</i>
DIUC	<i>Downlink Interval Usage Code</i>
UIUC	<i>Uplink Interval Usage Code</i>
FEC	<i>Forward Error Corrector</i>
VLANs	<i>Virtual Local Area Networks</i>
RLC	<i>Radio Link Control</i>
DHCP	<i>Dynamic Host Configuration Protocol</i>
TFTP	<i>Trivial File Transfer Protocol</i>
NMP	<i>Simple Network Management Protocol</i>
PKM	<i>Privacy Key Management</i>
DES	<i>Data Encryption Standard</i>
CBC	<i>Cipher Block Chaining</i>
GPC	<i>Grant per Connection mode</i>
GPSS	<i>Subscriber Station mode</i>
UGS	<i>Unsolicited Grant Service</i>
RtPS	<i>Real-Time Polling Service</i>
NrtPS	<i>Non-Real-Time Polling Service</i>
BE	<i>Best Effort</i>
ELF	<i>Extremely Low Frequency</i>
VLF	<i>Very Low Frequency</i>

LF	<i>Low Frequency</i>
LW	<i>Low Wave</i>
MF	<i>Medium Frequency</i>
MW	<i>Medium Wave</i>
HF	<i>High Frequency</i>
SW	<i>Short Wave</i>
VHF	<i>Very High Frequency</i>
UHF	<i>Ultra High Frequency</i>
SHF	<i>Super High Frequency</i>
EHF	<i>Extra High Frequency</i>
U-NII	<i>Unlicensed access to the National Information Infrastructure</i>

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. O espectro eletromagnético de frequências e seu uso para comunicações Fonte: Adaptado de Eklund (2002)	4
Figura 2. Pilha de protocolos do Padrão 802.16.....	15
Figura 3. Transmissão de <i>frames</i> usando esquemas FDD e TDD	17
Figura 4. Esquemas de modulação do Padrão 802.16	18
Figura 5. Modulação OFDM implementada por meio de banco de filtros.....	21
Figura 6. Sinais recebidos em sistemas de banda larga de portadora única e multiportadora.....	21
Figura 7. Modulação OFDM na tecnologia WiMAX.....	22
Figura 8. Formato da PDU MAC Fonte: Adaptado de Eklund (2002).....	26
Figura 9. Formato do cabeçalho genérico Fonte: Adaptado de Eklund (2002).....	27
Figura 10. Formato do cabeçalho de requisição de largura de banda Fonte: Adaptado de Eklund (2002).....	27
Figura 11. Transmissão de frames em FDD	30
Figura 12. Transmissão de frames em TDD Fonte: Adaptado de Eklund (2002)	31
Figura 13. Propagação NLOS Fonte: Adaptado de Swanson (2004)	42
Figura 14. Zona Fresnel em ambiente WiMax Fonte: Adaptado de Swanson (2004)	43
Figura 15. Arquitetura ponto a ponto	45
Figura 16. Arquitetura ponto-multiponto	46
Figura 17. Arquitetura <i>mesh</i>	47
Figura 18. Localização das antenas em ambiente LOS e em NLOS	48
Figura 19. Instalação básica do sistema IEEE 802.16	49
Figura 20. Tipos de equipamentos de CPE.....	50
Figura 21. Raio de operação de duas estações base	53
Figura 22. Predições de cobertura e desempenho para diversas larguras de cana.....	54
Figura 23. Arquiteturas possíveis para <i>backhaul</i>	57
Figura 24. Parte do Projeto da Rede Sem Fio com a utilização de rádios Pré WiMAX	58
Figura 25. Projeto da Rede Sem Fio com a utilização de rádios Pré WiMAX	59
Figura 26. Gráfico da Taxa de Recepção e Transmissão do Rádio Receptor dos Últimos 3 Meses. 61	
Figura 27. Gráfico do Tempo Médio de Resposta do Rádio Transmissor dos Últimos 3 Meses.....	61
Figura 28. Gráfico do Tempo Médio de Resposta do Rádio Receptor dos Últimos 3 Meses	62
Figura 29. Gráfico do Total de Bytes Recebidos e Transmitidos do Rádio Transmissor	62
Figura 30. Gráfico do Total de Pacotes Recebidos e Transmitidos do Rádio Transmissor	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Comparação entre o padrão 802.11 e o 802.16	11
Tabela 2. Canais utilizados no Padrão 802.16.....	19
Tabela 3. Comparação entre o padrão 802.11 e o 802.16	19
Tabela 4. Faixas de ondas de rádio.....	36

RESUMO

FARIA ALVES, Arilton. **Redes sem fio utilizando o sistema WiMAX, baseado no Padrão 802.16.** Itatiba, Ano. 2005 f. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade São Francisco, Itatiba, 2005.

A necessidade de redes sem fio já é sentida há muito tempo em vista das limitações impostas pelas redes cabeadas, principalmente quanto à crescente necessidade de flexibilidade que tem atingido os atuais projetos de rede. Aliada a essa necessidade de flexibilidade, observa-se também uma crescente demanda por transmissões que atendam os requisitos das atuais aplicações em multimídia, tais como maior largura de banda, restrições de atraso e atendimento de um grande número de usuários a longas distâncias. Neste contexto, as redes sem fio metropolitanas, são uma solução que aliam a flexibilidade, comum nas redes sem fio, com a possibilidade de atendimento de um grande número de usuários.

Este trabalho apresenta um padrão emergente em redes sem fio metropolitanas, o Padrão IEEE 802.16. Segundo este padrão, as redes sem fio metropolitanas atenderão a todas as expectativas dos atuais projetos de redes, aliado a garantias de qualidade de serviço.

PALAVRAS-CHAVE: Transmissão de dados, redes sem fio metropolitanas, IEEE 802.16, banda larga, WiMAX, interferência.

ABSTRACT

The necessity of wireless networks already has been felt a long time ago, in sight of limitations imposed by the wired networks, mainly related to the increasing necessity of flexibility of the current network projects. In association to this necessity, also is observable a crescent demand for data transmissions that supply the current multimedia applications requirements, just as a larger bandwidth and a greater number of users attended on larger distances. In this context, the wireless metropolitan area networks are one solution that allies the flexibility, common in wireless networks, with the possibility of reaching a greater number of users.

This work presents an emergent wireless metropolitan area network (WMAN) standard, the IEEE 802.16. According to this IEEE standard, the WMAN promises to attend all expectations of current network projects, in union with quality of service.

KEYWORDS: Data transmission, wireless, wireless metropolitan area networks, IEEE 802.16, broadband, WiMAX, interference.

1. INTRODUÇÃO

Na sociedade de hoje a necessidade de comunicação tornou-se um fator fundamental para empresas e instituições de ensino, assim como para usuários residenciais. Nesse cenário, as redes de computadores exercem grande influência pois permitem interligar pessoas onde quer que elas estejam, além de disseminar a informação numa velocidade antes não imaginada. Entretanto, esse acesso a informação ainda está longe de ser o ideal. Muitos locais, por serem bastante remotos e por não contarem com uma infra-estrutura adequada não conseguem ter acesso a redes de computadores, o que cria uma legião de excluídos digitais.

Além da necessidade de comunicação, outro fenômeno que vem ganhando força no mundo informatizado é a necessidade de locomoção. As empresas atualmente não podem se dar ao luxo de ficarem limitadas a seus escritórios, e aí reside o problema das redes cabeadas, quando um indivíduo sai do seu escritório não tem mais acesso à rede local, e não é preciso nem sair do escritório, basta ir a outro andar que o problema é o mesmo: não há acesso à rede porque os cabos não conseguem chegar a determinado lugar. Este cenário possibilitou o surgimento de outras tecnologias independentes de fiação, as tecnologias sem fio, que permitem maior flexibilidade que redes de computadores cabeadas.

A tecnologia sem fio, muito conhecida atualmente no ramo da telefonia celular, teve grande aceitação na aplicação em redes de computadores. Entretanto, apesar dos grandes benefícios trazidos pelas redes locais sem fio, esta ainda não é a solução de tudo. As redes sem fio locais têm como grande restrição a sua pouca largura de banda e a sua conseqüente falta de suporte a aplicações robustas como voz e vídeo, muito utilizadas atualmente, além de atingirem poucas distâncias e poucos usuários. Havia, então, a necessidade de uma tecnologia sem fio que suportasse mais usuários, cobrisse maiores distâncias, permitisse tráfego multimídia e atendesse a necessidade de aumento da demanda de banda larga por parte do usuário. Diante deste cenário, a IEEE propôs o padrão 802.16, conhecido como WiMAX, a fim de atender a todas essas necessidades e para que uma rede sem fio de banda larga pudesse ser implementada.

O padrão 802.16 da IEEE é responsável por especificar a implementação de redes sem fio metropolitanas. Com essa tecnologia é possível atingir usuários onde as demais redes de banda larga não atingiriam, devido ao alto custo e impossibilidade de infra-estrutura física, como as redes

DSL. Além disso, é possível implementar redes mais robustas com a interligação de redes sem fio metropolitanas com redes sem fio locais.

Este padrão promete expandir o mercado de acesso à banda larga sem fio, visto que não precisa de grande infra-estrutura para interligação dos equipamentos já que utiliza o meio aéreo para transmissão de dados, o que resulta em maior facilidade de acesso e em redução de custos, quebrando muitas barreiras que hoje existem em relação ao DSL (*Digital Subscriber Line*) e ao cabo, sendo uma alternativa barata para levar a Internet a comunidades distantes.

1.1. OBJETIVOS

Este trabalho se propõe a fazer um estudo do padrão 802.16, dos seus objetivos, características e aplicabilidade dessa tecnologia emergente, além de explorar a viabilidade do uso dessa tecnologia numa situação real. Serão abordados além dos aspectos técnicos do padrão, também os aspectos de interferência as quais a rede está sujeita e de instalação. Como ainda não houve nenhum caso concreto de implementação desse tipo de rede, a análise de todos esses aspectos torna enriquecedor o estudo do padrão.

Será apresentado um estudo de caso para uma determinada região a fim de analisar a real possibilidade de implementação desse tipo de rede e o custo de tal solução, além de uma comparação com um outro tipo de rede metropolitana, a rede de fibra óptica. Este estudo torna-se uma importante contribuição na análise do padrão pela peculiaridade da região.

2. REDES SEM FIO

Neste capítulo serão apresentados os conceitos e características das redes sem fio. Uma atenção especial será dada para as redes sem fio metropolitanas, objeto de estudo deste trabalho. A seção 2.1 apresenta uma visão geral das redes sem fio. Na seção 2.2 são descritas as tecnologias de transmissão sem fio. Na seção 2.3 são apresentados os tipos de redes sem fio. Na seção 2.4 são descritas as características das redes sem fio metropolitanas e as características gerais do Padrão 802.16 do IEEE.

2.1. INTRODUÇÃO

Muitos sistemas de comunicação fazem a transmissão dos dados utilizando fios de cobre, como par trançado, cabo coaxial, ou fibra ótica. Outros, entretanto, transmitem os dados pelo ar, como é o caso da transmissão por raios infravermelhos, laser, microondas e rádio. As redes que usam estas técnicas se chamam redes *Wireless* (ou sem fio). Nos últimos anos, esse tipo de rede tem crescido e tem ganhado popularidade nos diversos setores, principalmente no que diz respeito às redes locais sem fio (WLANs - *Wireless Local Area Networks*).

A rede sem fio é um sistema de transmissão de dados flexível que pode ser utilizada como alternativa para as redes cabeadas tradicionais, baseadas em par trançado, cabo coaxial e fibra ótica. As redes sem fio têm o mesmo propósito da rede cabeada: dispor informações a todos os dispositivos ligados à rede. Contudo, sem o cabeamento físico para amarrar a localização de um nodo (equipamento ligado à rede), a rede torna-se muito mais flexível: é fácil mover um nodo sem fio. As redes locais sem fio também são uma boa opção quando a arquitetura de um prédio torna difícil (ou impossível) a passagem de cabos de rede.

Atualmente a grande maioria das redes sem fio permite plena conectividade e atende aos padrões e normas dos organismos internacionais. Isto significa que, uma vez utilizando equipamentos padronizados, essas redes podem ser interconectadas com as redes de cabeamento convencional sem maiores problemas, e computadores utilizando dispositivos sem fio interagem com computadores da rede cabeada e vice-versa, sem qualquer restrição.

2.2. TIPOS DE TRANSMISSÃO SEM FIO

Existem basicamente, quatro tipos de tecnologias de transmissão empregadas na construção de redes sem fio: infravermelho, microondas, laser e rádio. Todas elas estão representadas no espectro eletromagnético da Figura 1.

Quando os elétrons se movem, eles criam ondas eletromagnéticas que podem se propagar no espaço (mesmo no vácuo). Quando uma antena de tamanho apropriado é ligada a um circuito elétrico, as ondas eletromagnéticas podem ser transmitidas com eficiência e captadas por um receptor distante. Todos os tipos de comunicação sem fio se baseiam nesse princípio. A quantidade de informação que uma onda eletromagnética pode transportar está relacionada a sua largura de banda. Com a tecnologia atual, é possível carregar poucos bits por Hertz a baixas frequências, e, normalmente, até 8 bits/Hz em altas frequências [2].

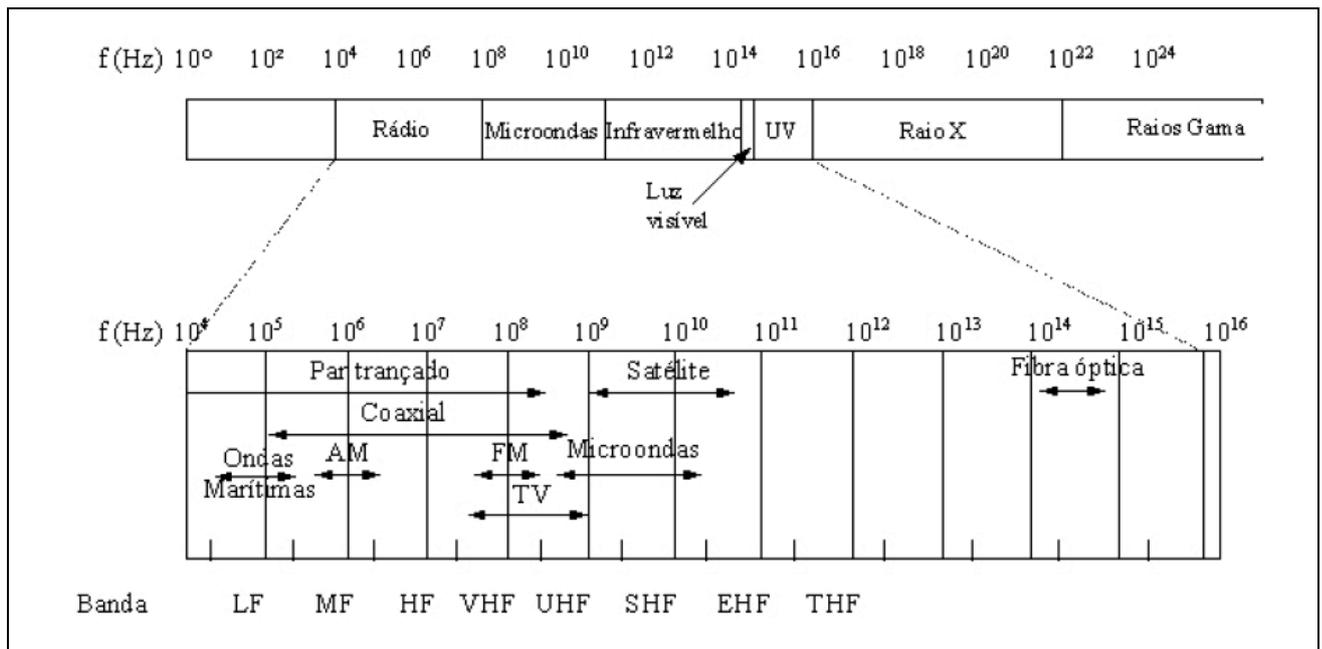


Figura 1. O espectro eletromagnético de frequências e seu uso para comunicações

Fonte: Adaptado de Eklund (2002)

2.2.1. Laser

As redes a laser modernas utilizam radiação infravermelha, geralmente em uma frequência em torno de 380 THz [1]. A grande vantagem do laser, comparado a outros sistemas sem fio, está na sua alta largura de banda e na ausência de leis de licenciamento. Como não existe possibilidade de interferência, qualquer número de pessoas pode usar os lasers exatamente na mesma frequência [1].

Uma desvantagem é que os feixes de laser não podem penetrar a chuva nem neblina espessa, nem atravessar paredes ou obstáculos sólidos, mas eles trabalham normalmente em ambientes abertos em dias de sol. No entanto, se, de alguma forma, ondas de calor atravessarem os feixes, a comunicação pode ser interrompida, pois os feixes podem ser desviados de sua trajetória [2].

Os sistemas baseados em tecnologia laser necessitam de visada direta entre os pontos para poder operar, isto é, o receptor deve estar na mesma linha do transmissor para haver comunicação entre os pontos de conexão. São mais comumente utilizados para conexões como a interligação de duas redes em prédios separados, por exemplo.

2.2.2. Ondas de Rádio

Ondas de rádio são fáceis de se gerar, podem viajar longas distâncias e podem penetrar em construções facilmente, por essas razões elas são muito utilizadas para comunicação. As ondas de dependendo da antena são omnidirecionais, o que significa que elas viajam em todas as direções. [2].

As propriedades desse tipo de transmissão dependem das frequências usadas. Nas frequências baixas, as ondas de rádio atravessam os obstáculos, mas a potência cai abruptamente à medida que a distância da origem aumenta. Nas frequências mais altas, as ondas de rádio tendem a viajar em linha reta e a ricochetear nos obstáculos, além de serem absorvidas pela chuva. Em todas as frequências, as ondas de rádio estão sujeitas à interferência de motores e outros equipamentos elétricos.

Em contrapartida à capacidade de viajar longas distâncias, a interferência entre usuários de rádio é um problema. Por esta razão, os governos em geral são rigorosos em conceder licenças de uso para transmissores de rádio [2].

2.2.3. Microondas

Acima de 1 GHz, as ondas viajam em linhas quase retas e, portanto, podem ser pouco focadas. Concentrando toda a energia em um pequeno feixe pelos recursos de uma antena parabólica (como as usadas para receber sinais de tv por satélite), uma relação sinal/ruído muito maior pode ser obtida, mas, para isso, as antenas de transmissão e de recepção do sinal devem estar precisamente alinhadas uma à outra. Em adição, esta característica das microondas permite que

vários transmissores enfileirados comuniquem-se com vários receptores também enfileirados (em linha) sem interferências, desde que sejam obedecidas regras de espaçamento mínimo.

Visto que as microondas viajam em linha reta, se as torres estiverem muito distantes, devido à curvatura da Terra, não poderá haver transmissão, pois as microondas que forem transmitidas encontrarão o solo da Terra, ao invés de chegarem ao receptor. Conseqüentemente, são necessárias repetidoras de sinal periodicamente. Quanto maiores as torres, maior pode ser a distância entre elas. Para torres de 100 metros, por exemplo, as repetidoras podem estar a distância de 80 km umas das outras [2].

As microondas são muito utilizadas para comunicação telefônica de longa distância e distribuição de canais de televisão. E também são bem mais práticas de serem implantadas do que se instalar fibra óptica em área urbana ou montanhosa, ou do que se alugar fibras de companhias telefônicas.

2.2.4. Infravermelho

Infravermelho e ondas milimétricas são bastante usadas para comunicação de curto alcance. Os controle remotos usados em televisões, vídeo-cassetes e aparelhos de som utilizam comunicação infravermelha. Apesar de possuírem algumas vantagens, como serem baratas, direcionais e fáceis de serem construídas, as ondas de infravermelho apresentam uma desvantagem que comprometem sua utilização: elas não atravessam obstáculos sólidos. Em geral, partindo das ondas longas de rádio e indo em direção à luz visível, as ondas tendem a se comportar mais e mais como a luz, e menos como ondas de rádio [2]. Por este motivo as ondas infravermelhas não atravessam obstáculos sólidos.

Por outro lado, o fato de não atravessarem paredes sólidas pode ser um ponto a seu favor. Isto significa que um sistema infravermelho em uma sala de um prédio não irá interferir em um outro sistema similar localizado em outra sala adjacente ou em outro prédio próximo.

Prova disso é que não se pode controlar as televisões das casas dos vizinhos com um único controle remoto, localizado na parte interna de uma das casas da vizinhança. Por essa razão, a segurança destes sistemas contra acessos não autorizados do tipo *eavesdropping* (escuta) é melhor do que a de sistemas de rádio.

Portanto, para operar um sistema infravermelho não é necessário nenhum tipo de licença governamental. A comunicação infravermelha exige visada direta e tem um uso próprio nos escritórios, por exemplo, conectando laptops a outros tipos de computador, ou vice-versa, e a impressoras.

2.3. TIPOS DE REDES SEM FIO

Existem diferentes tipos de redes sem fio que variam em tecnologia e aplicação, sendo possível classificá-las em quatro tipos: WPANs, WLANs, WMANs e WWANs.

2.3.1. Redes Pessoais Sem Fio (*Wireless Personal Area Network WPAN*)

São voltadas, principalmente, para a conexão de um computador com dispositivos periféricos, como impressoras, PDAs (*Personal Digital Assistants*) e telefones celulares, eliminando a necessidade de cabos. As WPANs cobrem pequenas distâncias e oferecem baixas velocidades, se comparada a outras tecnologias sem fio.

O padrão mais conhecido para WPANs é o *Bluetooth*, que opera na frequência de 2,483 GHz, possui um alcance que vai de 10 a 100 metros, e uma velocidade máxima total (agregada) de 1 Mbps, sendo suportado por um grupo de mais de 2.000 empresas e, atualmente, incorporado ao IEEE 802.15 *Personal Area Network Working Group*. O Bluetooth é também conhecido como padrão IEEE 802.15.1 (espalhamento espectral por salto de frequência).[23]

A tecnologia Bluetooth permite que até 8 (oito) dispositivos sejam conectados simultaneamente entre si. É possível montar redes com mais de oito dispositivos, mas, neste caso, nem todos os dispositivos serão capazes de transmitir a todos os outros. Cada dispositivo enxergará apenas oito dispositivos [1].

2.3.2. As redes locais sem fio (*Wireless Local Area Network Lan*)

As WLANs podem ser encontradas em empresas, aeroportos e em *cyber cafés* mais modernos, que oferecem serviços de rede local, acesso à Internet, sem necessidade de cabos, também podem ser aplicadas em bibliotecas, universidades e indústrias, oferecendo grande flexibilidade para seus usuários, principalmente os que utilizam laptops e PDAs.

Este tipo de rede define duas formas de comunicação:

- Modo infra-estrutura: normalmente o mais encontrado. Nesse modo se utiliza um ponto de acesso - AP (*Access Point*) para a comunicação local;

- Modo ponto a ponto (*ad-hoc*): permite que um pequeno grupo de máquinas se comunique diretamente, sem a necessidade de um AP. Neste modo todas as estações são conectadas diretamente umas às outras.

As WLANs cobrem uma distância aproximada de 100 metros e são padronizadas pelo IEEE 802.11x *Wireless Local Area Network Working Group*, que compreende os seguintes padrões:

- IEEE 802.11: foi o primeiro padrão de LAN sem fio a ser definido. Lançado em 1997, define basicamente todas as necessidades de estruturais necessárias para a utilização de redes sem fio. A velocidade de transmissão deste padrão é de no máximo 2Mbps.

- IEEE 802.11b: foi lançado em 1999, com mudanças somente na camada física para que fosse possível atingir maior velocidade, neste caso de até 11Mbps. Atua na faixa de 2,4GHz.

- IEEE 802.11a: alcança velocidades de 54 Mbps e opera em bandas de 5 GHz. Utiliza uma técnica denominada de OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing Access*), projetada para minimizar a interferência causada pelos sinais refletidos nas paredes.

- IEEE 802.11g: lançado em 2001, atua na faixa de 2,4GHz e sua taxa de transferência pode chegar a 54Mbps.

Estas redes *wireless* ganharam grande popularidade pela mobilidade que provêm aos seus usuários e pela facilidade de instalação e de uso em ambientes domésticos, empresariais, hotéis, conferências, aeroportos, etc.

2.3.3. Redes Metropolitanas Sem Fio (*Wireless Metropolitan Area Network WMAN*)

Este tipo de rede sem fio se aplica a regiões urbanas. Oferecem uma cobertura geográfica consideravelmente maior que as WLANs, chegando a distâncias de até 50 km [39], e altas taxas de transmissão, de até 134 Mbps, para serviços de acesso a Internet em banda larga. As WMANs são padronizadas pelo IEEE 802.16 *Wireless Metropolitan Area Network Working Group*.

2.3.4. As Redes Geograficamente Distribuídas Sem Fio (Wireless Wide Area Network WWAN)

São redes com grande dispersão geográfica, voltadas para aplicações móveis que utilizem telefones celulares, *paggers*, PDAs etc. Existem inúmeras tecnologias para WWANs que limitam a taxa de transmissão e, conseqüentemente, o tipo de serviço que poderá ser oferecido. As redes de celulares estão caminhando rapidamente para tornarem-se a maior aplicação de WWAN. Com o crescente uso de conexões de banda larga, celulares estão transmitindo e-mails, textos, imagens, som e vídeo, com a mesma qualidade e velocidade que os dispositivos ligados por fios.

É um novo conceito de rede que reúne os conceitos de WAN (*Wide Area Network*) e de comunicação sem fio, como a telefonia celular. Uma WAN usa fibra ótica, modems de alta velocidade, fios, etc. Uma *Wireless* WAN usa antenas, transmissores e receptores de rádio, etc.

Entre as principais tecnologias está a EDGE que oferece uma transmissão de 348 Kbps, a CDMA2000 1 x EV-DO que transmite a 2,4 Mbps e a WCDMA/UMTS que transmite a 2 Mbps [5]. Todas essas tecnologias possuem um alcance de aproximadamente 8 Km [5].

2.4. REDES METROPOLITANAS SEM FIO

As redes metropolitanas sem fio são também conhecidas com redes sem fio banda larga [3]. O termo banda larga sem fio (*wireless broadband*) refere-se geralmente a transmissão de dados em alta velocidade ocorrida dentro de uma infra-estrutura de pontos semi fixos, incluindo tanto os terminais de assinantes quanto os servidores de serviço.

Embora a banda larga já esteja disponível por um bom tempo, o acesso ainda é limitado. No final de 2002, as estatísticas mostravam que somente 46 milhões de assinantes no mundo inteiro tinham acesso à banda larga e, nos Estados Unidos, somente 17 por cento das residências estavam conectadas. O problema principal não está na demanda, mas sim na maneira como o acesso é fornecido. Conexões DSL ou a cabo são limitadas porque os clientes:

- Estão fora da área onde os serviços de DSL são oferecidos;
- Não fazem parte de uma infra-estrutura residencial a cabo;
- Acham que a conexão é muito cara;

- Os assinantes tem que estar a uma distância de no máximo 5 Km.

Com a banda larga sem fio, as barreiras deixam de existir. Por causa da sua natureza sem fio, a distribuição é mais rápida, o escalonamento é mais fácil e mais flexível, podendo atender aos clientes fora da faixa de serviços cabeados ou que não estão satisfeitos com as alternativas de banda larga com fio. O acesso de banda larga sem fio funciona como os sistemas celulares, usando estações base que atendem a uma faixa de vários quilômetros. As estações base não precisam, necessariamente, residir em torres. Com frequência, a antena da estação base é colocada no telhado de um edificio alto ou de outra estrutura elevada. O sinal é então roteado, através de um cabo Ethernet padrão, diretamente a um computador, ou a um ponto de conexão 802.11 ou, ainda, a uma LAN Ethernet com fio.

Alguns padrões industriais governam o projeto e o desempenho dos equipamentos de banda larga sem fio, como o ETSI HiperMAN [25] e o 802.16 desenvolvido pelo *The Institute of Electrical and Electronics Engineering* (IEEE) [6].

Com o padrão 802.16, as empresas e residências ganham uma maneira nova e fácil de obter o serviço de banda larga. Muitas vezes, é demorado adquirir o serviço DSL da companhia telefônica local (e às vezes ele nem está disponível). A distribuição do serviço sem fio é mais rápida, com o uso de equipamento compatível com 802.16 que habilita o acesso a uma ampla seção de áreas metropolitanas. Uma aceleração correspondente na distribuição de pontos de conexão 802.11 em áreas metropolitanas é também esperada, à medida que mais estações sem fio forem construídas.

2.4.1. O padrão IEEE 802.16

O padrão 802.16 define a especificação de interface aérea para redes sem fio metropolitanas, também oficialmente conhecidas como WirelessMAN. Também suporta a topologia de rede ponto-multiponto na qual cada estação base, normalmente conectada a rede pública, se comunica com centenas de estações estacionárias de assinantes, que estão normalmente instaladas no teto dos prédios. Utiliza tecnologias como o WLL (*Wireless Local Loop*) [1] e o LMDS (*Local Multipoint Distribution System*) [1] para estabelecer sistemas de distribuição de serviços de voz, dados, Internet e vídeo em banda larga, usando uma arquitetura de rede similar à das redes celulares (porém para acesso fixo). Normalmente usa faixas licenciadas e situadas entre 10 e 66 GHz, mas também prevê o uso de faixas não-licenciadas para a sua extensão, o padrão 802.16a que usa frequências de 2 GHz a 11 GHz.

O padrão também funciona como uma extensão de tecnologias de acesso à Internet em banda larga, como *Asymmetric Digital Subscriber Line* (ADSL) ou cabo. Basta conectar o cabo ADSL, por exemplo, a um transmissor 802.16a para que ele envie o sinal para todos os equipamentos compatíveis com o padrão 802.11x a uma velocidade de transmissão de dados de até 70 Mbps, podendo dar acesso à Internet em banda larga para milhares de residências em uma única área.

A Tabela 1 apresentada uma comparação do padrão 802.11 com o padrão 802.16a. Observa-se que o padrão 802.16a oferece mais vantagens que o 802.11, principalmente quanto a área de cobertura, que pode chegar a 50 Km em campo aberto, ao QoS, que oferece suporte necessário para uso de VoIP (voz sobre IP) e *Streaming* (transmissão de áudio e vídeo), e a quantidade de usuários suportados.

Tabela 1. Comparação entre o padrão 802.11 e o 802.16a

	802.11	802.16a
Taxa de transferência	54Mbps (11a/g)	75Mbps
Distância coberta	100m	50Km
QoS	Nenhum	Reforçado centralmente
Cobertura	Melhor utilizado em ambientes fechados sem visada direta (NLOS).	Melhor utilizado em grandes áreas, como centros urbanos, também NLOS.
Segurança	802.11i	DES triplo, RSA
Níveis de Serviço	Nenhum	Diferentes níveis de uso da largura de banda.
Usuários	Centenas	Milhares

O padrão 802.16 oferecerá uma grande flexibilidade às novas empresas ou empresas que mudam freqüentemente, como, por exemplo, construtoras com escritórios em cada local de construção. Ao invés de ter que esperar várias semanas por uma linha T1 ou DSL, o acesso à banda larga sem fio pode ser configurado rápida e facilmente em locais novos e temporários.

Além disso, o padrão 802.16 é escalável. Com o acesso de banda larga sem fio, é fácil aumentar a capacidade num local por um breve período de tempo, o que os provedores de acesso de banda larga com fio atualmente não fazem, permitindo atingir milhares de usuários.

O padrão original 802.16 exige que as torres estejam posicionadas de forma que não haja nenhum obstáculo entre elas. A extensão 802.16a, homologada em janeiro de 2003, usa uma frequência baixa de 2 a 11GHz, possibilitando assim as conexões sem visada direta, o que vem a ser

um grande avanço no que se refere ao acesso à banda larga sem fio. Com o 802.16a, mais clientes serão conectados a uma torre única e o custo de serviço será substancialmente reduzido. Além disso, o padrão 802.16a possibilita o uso da topologia em malha que permite que os dados pulem de um ponto a outro, circundando obstáculos como montanhas, obtendo assim uma maior cobertura.

Em um ambiente metropolitano realista, 50% a 70% dos clientes tipicamente não têm visada direta e aberta (Zona de Fresnel)¹ ao ponto de acesso devido a grande quantidade de edifícios, árvores, entre outros obstáculos, todos de tamanhos e larguras diferentes.

Em um ambiente sem visada direta, uma parte do sinal de rádio é refletida pelos prédios e paredes, podendo ser utilizado para se atingir os pontos aonde não se consegue chegar diretamente com visada. No entanto as reflexões causam atenuações em algumas faixas de frequência, sendo assim, o protocolo utilizado deve ser capaz de lidar com a perda causada por estas atenuações. O protocolo de rede sem fio utilizado pelo IEEE 802.16a para resolver esse problema foi o OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*). Esse protocolo, ao contrário do FHSS ou DSSS, não transmite uma, mas centenas de portadoras ao mesmo tempo.

O padrão 802.16a foi projetado para permitir comunicação em distâncias de até 50Km. Em distâncias como essas, a diferença de atraso entre os usuários mais próximos contra os usuários mais distantes passam a ser significativas. O padrão 802.16a garante que mesmo com essas diferenças de atrasos todos os usuários sejam atendidos de acordo com seu QoS contratado.

O grupo de trabalho mais recente do 802.16, o 802.16e [6], está usando as novas capacidades desta tecnologia para desenvolver uma especificação para clientes 802.16 móveis. Estes clientes poderão passar dados entre estações base 802.16, habilitando os usuários a fazerem *roaming* entre as áreas de serviço.

2.4.2. O WiMAX

A organização sem fins lucrativos WiMAX (*Worldwide Interoperability for Microwave Access Forum*) foi criada pela Intel e por outras empresas líderes de equipamentos e componentes de comunicação para impedir que os problemas de interoperabilidade encontrados no padrão IEEE 802.11 aconteçam novamente nos equipamentos do padrão 802.16. A organização WiMAX tem a meta de ajudar a promover e certificar a compatibilidade e interoperabilidade dos equipamentos de banda larga sem fio. O WiMAX é o nome normalmente associado aos padrões IEEE

802.16a/REVd/e. O IEEE REVd, agora publicado com o nome de IEEE 802.16-2004, introduz suporte para CPE (*Customer Premises Equipment*) indoor NLOS (*Non Line of Sight*), que são equipamentos utilizados em ambientes fechados e que não necessitam de visada direta, e a variação IEEE 802.16e introduzirá suporte para mobilidade.

Para garantir produtos baseados em IEEE 802.16 e ETSI HiperMAN interoperáveis, a WiMAX determinou que focará, inicialmente, os procedimentos de teste de submissão e interoperabilidade em equipamentos que suportam a camada física OFDM 256 e operam nas faixas licenciadas de 2,5 GHz e 3,5 GHz e na faixa não licenciada de 5,8 GHz.

Os primeiros produtos utilizando a tecnologia WiMAX estão previstos para estarem disponíveis no mercado em 2005, tanto no Brasil quanto no resto do mundo.

3. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DO PADRÃO 802.16

O padrão IEEE 802.16, terminado em 2001 e aprovado em 8 de abril de 2002, define a especificação da interface aérea para redes sem fio metropolitanas, também conhecidas como sistemas fixos sem fio de banda larga. Tal padrão é caracterizado por suas altas taxas de transferência de dados, transmitindo a 134,4 Mbps, em bandas licenciadas, e a 75 Mbps em bandas não licenciadas. Suporta uma topologia ponto-multiponto em que cada estação base comunica-se com até centenas de estações estacionárias de usuários.

O protocolo MAC do padrão 802.16 suporta uma variedade de exigências de tráfego, incluindo a tecnologia ATM (*Asynchronous Transfer Mode*) e os protocolos baseados em pacotes, transmitindo de forma eficiente qualquer tipo de tráfego. Um ponto diferencial do padrão IEEE 802.16 é que a interface aérea foi projetada para transmitir dados ou tráfego multimídia que necessitam de alto suporte de qualidade de serviço (QoS). O padrão 802.16 é completamente orientado a conexões a fim de garantir qualidade de serviço para a comunicação de telefonia e de multimídia, as quais não admitem atrasos. Ao contrário do 802.11b (padrão para redes sem fio locais) o padrão 802.16 utiliza um espectro variável, utilizando as faixas de frequência entre 10 e 60 GHz, com um padrão alternativo (802.16a) que utiliza frequências entre 2 e 11 GHz. Isto permite atingir altas taxas de transferência a distâncias de vários quilômetros. O mecanismo de requisição e de concessão de largura de banda do padrão é projetado para ser escalonável, eficiente e auto-corretivo. Mesmo quando submetido a uma situação de múltiplas conexões por terminal, múltiplos níveis de QoS por terminal e um grande número de usuários, o padrão 802.16 não perde a eficiência [8] [14].

Devido a todas essas características resumidas aqui, o padrão 802.16 tem grande possibilidade de aceitação e de expansão, devido principalmente a necessidade cada vez maior de transmissões em banda larga e a necessidade de suporte a transmissões multimídia.

3.1. ARQUITETURA DO PROTOCOLO

A pilha de protocolos do padrão IEEE 802.16 é semelhante à de outros padrões 802, com a característica de possuir um número maior de subcamadas. A Figura 2 mostra a pilha de protocolos do padrão IEEE 802.16 formada pela camada física e pela camada de acesso ao meio (MAC).

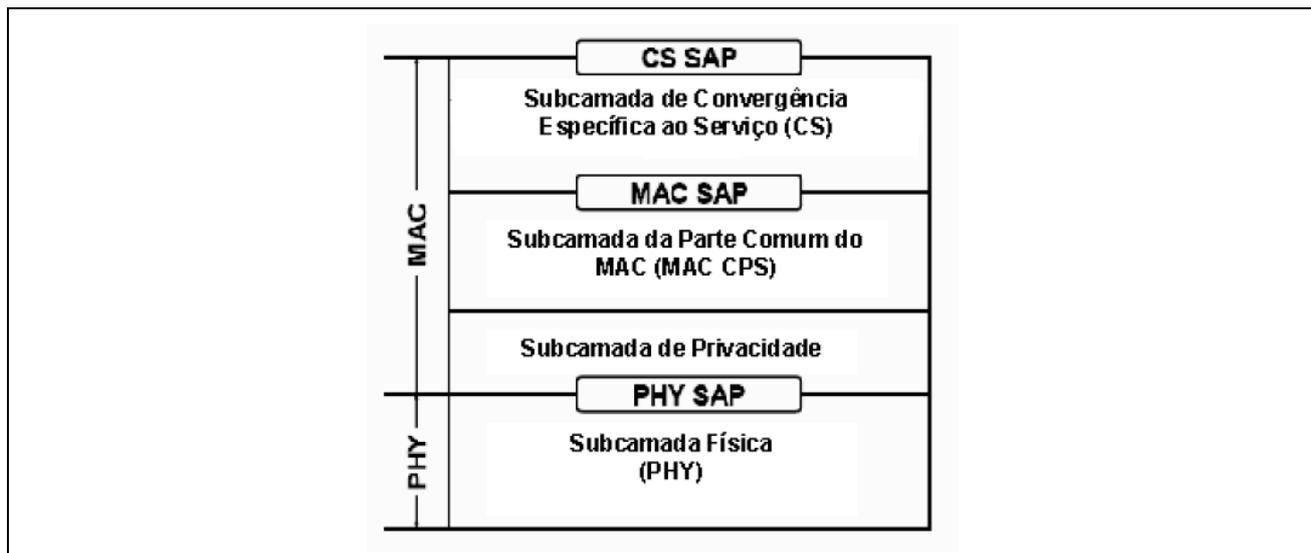


Figura 2. Pilha de protocolos do Padrão 802.16

A camada física especifica o espectro de frequência, o esquema de modulação, as técnicas de correção de erros, a sincronização entre transmissor e receptor, a taxa de dados e a estrutura de multiplexação. Ela define vários esquemas de modulação, dependendo das distâncias envolvidas e conseqüente relação sinal/ruído.

Acima da camada física estão as funções associadas aos serviços oferecidos aos usuários. Estas funções incluem a transmissão de dados em frames e o controle do acesso no meio sem fio compartilhado, sendo estes agrupados dentro da MAC. O protocolo MAC define como e quando a estação base ou os assinantes podem iniciar a transmissão no canal. Como algumas camadas acima da MAC, como a ATM, precisam de qualidade de serviço, o protocolo MAC é capaz de alocar uma capacidade suficientemente grande do canal de rádio para satisfazer as necessidades do serviço.

Na transmissão da estação base para o usuário (*downlink*), só existe um transmissor, e o protocolo MAC é relativamente simples. Já no caminho inverso, do usuário para a estação base (*uplink*), existem múltiplos assinantes competindo pelo acesso, resultando num protocolo mais complexo. De acordo com este modelo, a estação base controla o sistema.

A camadas MAC possui três subcamadas, a subcamada de segurança, a subcamada da parte comum e a subcamada de convergência específica ao serviço. A subcamada de segurança lida com privacidade e segurança. Na parte comum da subcamada MAC estão localizados os principais protocolos como o de gerenciamento de canais. A subcamada de convergência de serviços específicos provê funções específicas para o serviço a ser oferecido, sua função é definir a interface

para a camada de rede. Para o padrão IEEE 802.16, os serviços a serem oferecidos incluem *multicast* de áudio/vídeo digitais, telefonia digital, suporte à ATM, ao TCP/IP e Frame Relay.

3.2. A CAMADA FÍSICA

A primeira versão do padrão 802.16 foi destinada para ambientes com visada direta, operando em bandas de frequência elevadas e abrangendo a faixa de 10-66 GHz. Já a variação 802.16a foi projetada para sistemas operando em bandas entre 2 GHz e 11 GHz. A maior diferença entre essas duas bandas de frequência está na capacidade de suportar a falta de visada direta nas frequências mais baixas (2-11 GHz), algo que não é possível nas bandas de frequência mais elevadas (10-66 GHz).

O projeto da especificação da camada física para a faixa de 10-66 GHz utiliza modulação de portadora única (*Single Carrier*) com uma taxa de transmissão de até 134,4 Mbps. Para permitir o uso flexível do espectro são suportadas tanto configurações TDD (duplexação por divisão de tempo), onde o *uplink* e o *downlink* dividem o canal, mas não transmitem simultaneamente, quanto configurações FDD (duplexação por divisão de frequência), onde o *uplink* e o *downlink* estão em canais separados e podem operar concorrentemente. Ambas as configurações suportam um perfil adaptável de tráfego, no qual parâmetros de transmissão, incluindo os esquemas de modulação e codificação, podem ser ajustados individualmente para cada estação assinante. Essa característica é adequada para os diversos tipos de tráfegos que o padrão suporta. No caso de voz, o tráfego provavelmente é simétrico em sua maior parte, porém, para acesso à Internet, em geral existe maior tráfego no *downlink* do que no *uplink* [8].

A Figura 3 apresenta um gráfico de transmissão de frames, comparando os esquemas de duplexação TDD e FDD.

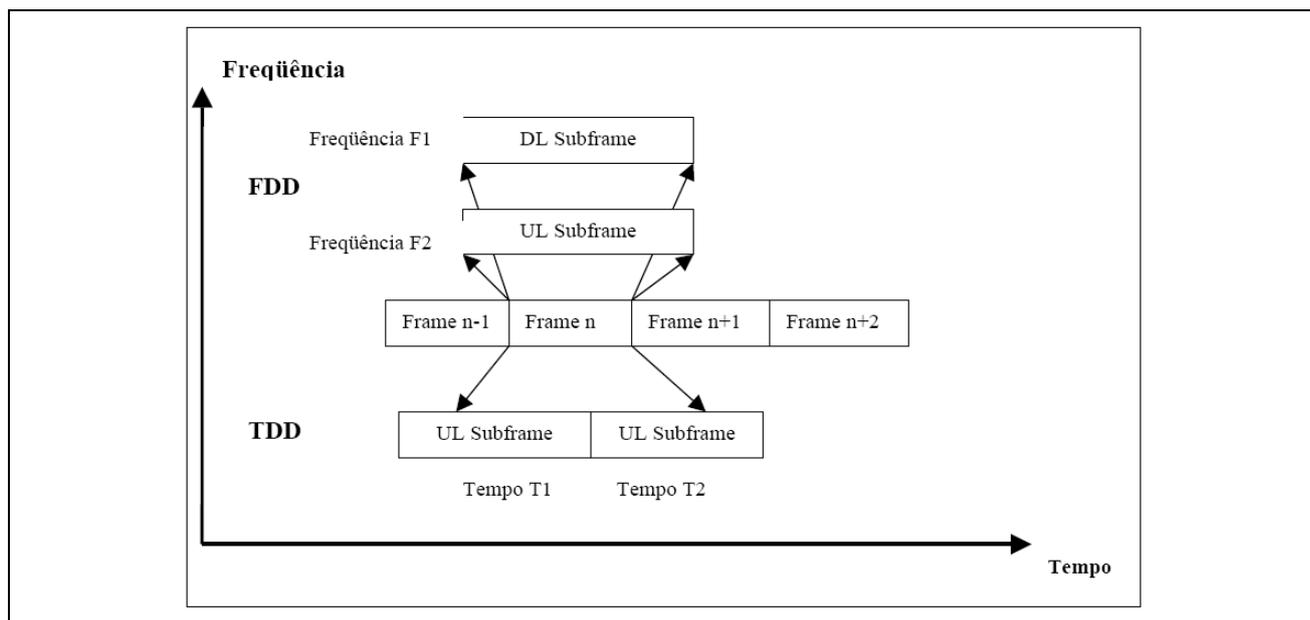


Figura 3. Transmissão de *frames* usando esquemas FDD e TDD

O FDD suporta estações assinantes full-duplex, que podem receber e transmitir simultaneamente, assim como estações subscritoras half-duplex, as quais podem receber e transmitir dados, mas não simultaneamente.

O tráfego de *downlink* é mapeado em slots de tempo pela estação base. A estação base tem o controle completo para esse sentido. O tráfego *uplink* é mais complexo e depende da qualidade de serviço exigida. Para transmissões da estação base para o assinante, o padrão especifica dois modos de operação, um buscando suportar a transmissão de um fluxo contínuo de dados, como áudio e vídeo, e outro buscando suportar a transmissão em rajadas, como tráfego baseado em IP. Em ambos os esquemas os dados para os assinantes são multiplexados através de TDM.

Para a transmissão no sentido do assinante para a estação base, o padrão utiliza a técnica DAMA-TDMA (*Demand Assignment Multiple Access - Time Division Multiple Access*). DAMA é uma técnica de atribuição da capacidade do link, que se adapta quando necessário para responder a mudanças na demanda entre múltiplas estações. O TDMA opera com divisão da banda em vários intervalos de tempo, denominados de slots, cada um dos quais corresponde a um canal de comunicação [1]. O número de slots associados para vários usos é controlado pela camada MAC na estação base e varia dinamicamente no tempo para uma melhor performance.

O padrão IEEE 802.16 emprega um sistema de modulação adaptativa, com a utilização de três esquemas de modulação diferentes, quais sejam, QAM-64, QAM-16 e QPSK. Nesse sistema, o esquema de modulação do sinal é ajustado dependendo da condição do *link*.

Quando o *link* de rádio é de alta qualidade, é usado o esquema de modulação mais elevado (QAM-64). Quando ocorre a atenuação do sinal, o padrão pode alterar o esquema de modulação para QAM-16 ou QPSK a fim de manter a qualidade da conexão e a estabilidade do *link*. Uma vez que a intensidade do sinal na banda milimétrica cai com o aumento da distância da estação base, o esquema de modulação é modificado dependendo da distância que a estação do assinante se encontra em relação à estação base. Para assinantes próximos é usado o QAM-64, com 6 bits/ baud, no caso de assinantes situados a uma distância média é usado o QAM-16 com 4 bits/ baud, e para assinantes distantes é usado o QPSK com 2 bits/ baud [2]. Os esquemas QAM-16 e QPSK permitem um aumento no alcance do sinal, mas trazem como consequência a redução da vazão. A faixa de atuação de cada esquema de modulação é exemplificado na Figura 4.

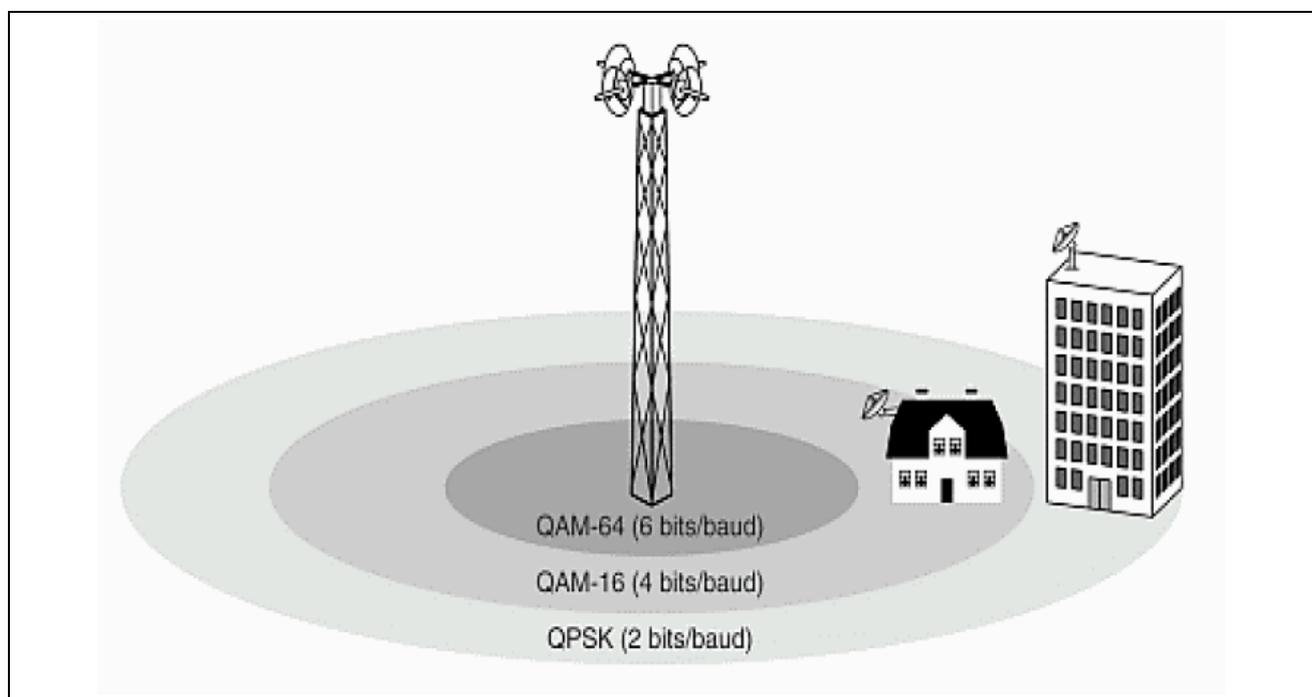


Figura 4. Esquemas de modulação do Padrão 802.16

Os perfis da transmissão são identificados através do *Interval Usage Code* (IUC). O IUC é um índice para as tabelas que contêm os parâmetros da camada física, e é composto pelo DIUC (*Downlink Interval Usage Code*) e pelo UIUC (*Uplink Interval Usage Code*). O DIUC e o UIUC

são usados para definir o tipo de acesso ao *downlink* e ao *uplink*, respectivamente, e o perfil associado com este acesso [9].

O padrão utiliza um recurso para correção de erros conhecidos como FEC (*forward error corrector*), que é destinada à correção de erros sem retroação, ou seja, sem a necessidade de retransmissão da mensagem. O FEC utiliza códigos que contêm redundância suficiente para permitir a detecção e correção de erros no receptor. A técnica de correção de erros utilizada é a Reed-Solomon GF (256) [8]. O Reed-Solomon adiciona bits extras a um bloco de dados antes da transmissão, com o objetivo de recuperar o sinal de possíveis erros introduzidos na transmissão. Após a transmissão o Reed-Solomon processa o bloco de dados e restaura os dados originais.

Na especificação 802.16, são definidos canais de 20MHz, 25MHz (tipicamente dos EUA) e 28MHz (tipicamente europeu), conforme mostrado na Tabela 2.

Tabela 2. Canais utilizados no Padrão 802.16

Largura de Banda do Canal (MHz)	Taxa de transferência (Mbps) QPSK	Taxa de transferência (Mbps) 16-QAM	Taxa de transferência (Mbps) 64-QAM
20	32	64	96
25	40	80	120
28	44,8	89,6	134,4

Conforme se verifica na Tabela 2, quanto mais distante estiver a assinante em relação à estação base, mais baixa será a taxa de dados. No padrão 802.16a são utilizados canais flexíveis entre 1,25 MHz e 20 MHz.

O espectro de 2-11GHz não requer visada direta e direcionalidade, portanto, requer técnicas que suportem propagação por múltiplos caminhos (propagação *multipath*), na qual as ondas sofrem desvios durante a sua propagação devido a refração das camadas atmosféricas. Assim, o padrão 802.16a utiliza a Multiplexação por Divisão em Frequências Ortogonais (OFDM) e o Acesso Múltiplo por Divisão em Frequências Ortogonais (OFDMA).

A Tabela 3 apresenta uma tabela comparando as características principais do padrão IEEE 802.16 com sua variação, o padrão IEEE 802.16a.

Tabela 3. Comparação entre o padrão 802.11 e o 802.16

	802.16	802.16a
Completado	Dezembro de 2001	Janeiro de 2003
Espectro de frequência	10-66 GHz	2-11 GHz

Condições do canal	Apenas linha de visada	Suporta falta de linha de visada
Taxa de transferência	32-134,4 Mbps	1-75 Mbps
Modulação	QAM-64, QAM-16, QPKS - Single Carrier	QAM-64, QAM-16, QPKS - Single Carrier - OFDM 256
Duplexação	TDD/FDD	TDD/FDD
Largura de banda do canal	20, 25 e 28 MHz	Largura de banda do canal flexível entre 1.25 e 20 MHz
Mobilidade	Fixa	Fixa

Conforme observado na Tabela 3, o padrão 802.16a suporta a falta de visada direta, algo que não é permitido no padrão 802.16. Entretanto, a taxa de transmissão do padrão 802.16 é consideravelmente maior que a do padrão 802.16a. É importante observar também que ambos os padrões são sistemas fixos, onde a mobilidade dos assinantes não é permitida. Além disso, ambos os padrões permitem o esquema de modulação adaptativa.

3.2.1. Modulação OFDM

A modulação *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM) representa um elemento fundamental para suportar operação sem linha de visada na tecnologia WiMAX, em razão do alto desempenho alcançado.

Trata-se de uma técnica de multiplexação de informações em um conjunto de subcanais modulados por subportadoras de banda estreita ortogonais entre si. Esse esquema de modulação pode ser implementado como um banco de filtros, como mostra a Figura 5.

Nesse caso, uma seqüência de bits transmitida a uma taxa de R bits/s é multiplexada em N subcanais, resultando na transmissão de R/N bits/s sobre cada subportadora. Essa estratégia tem como benefício imediato a possibilidade de utilização de equalizadores simplificados nos receptores. A Figura 6.a ilustra a distorção imposta pelo canal de rádio a um sinal transmitido por um sistema de banda larga de portadora única, que requer um equalizador de alta complexidade para a recomposição do sinal original. Já no caso da Figura 6.b, o canal de rádio distorce uniformemente cada subcanal, de modo que a operação de equalização de cada subportadora se resume a uma simples amplificação. Outro importante benefício é o aumento da eficiência através de técnicas de codificação e correção de erros, possibilitado pela transmissão a taxas reduzidas em cada subportadora.

Alternativamente, é possível implementar a modulação OFDM por meio de transformadas discretas de Fourier, viabilizando a utilização de processadores digitais de sinais (*Digital Signal Processor* – DSP) de alto desempenho, resultando em um sistema mais estável, flexível e de custo reduzido. Com a rápida evolução dos DSPs, a modulação OFDM tem sido crescentemente adotada nas soluções modernas de redes locais sem fio de banda larga [37] [38].

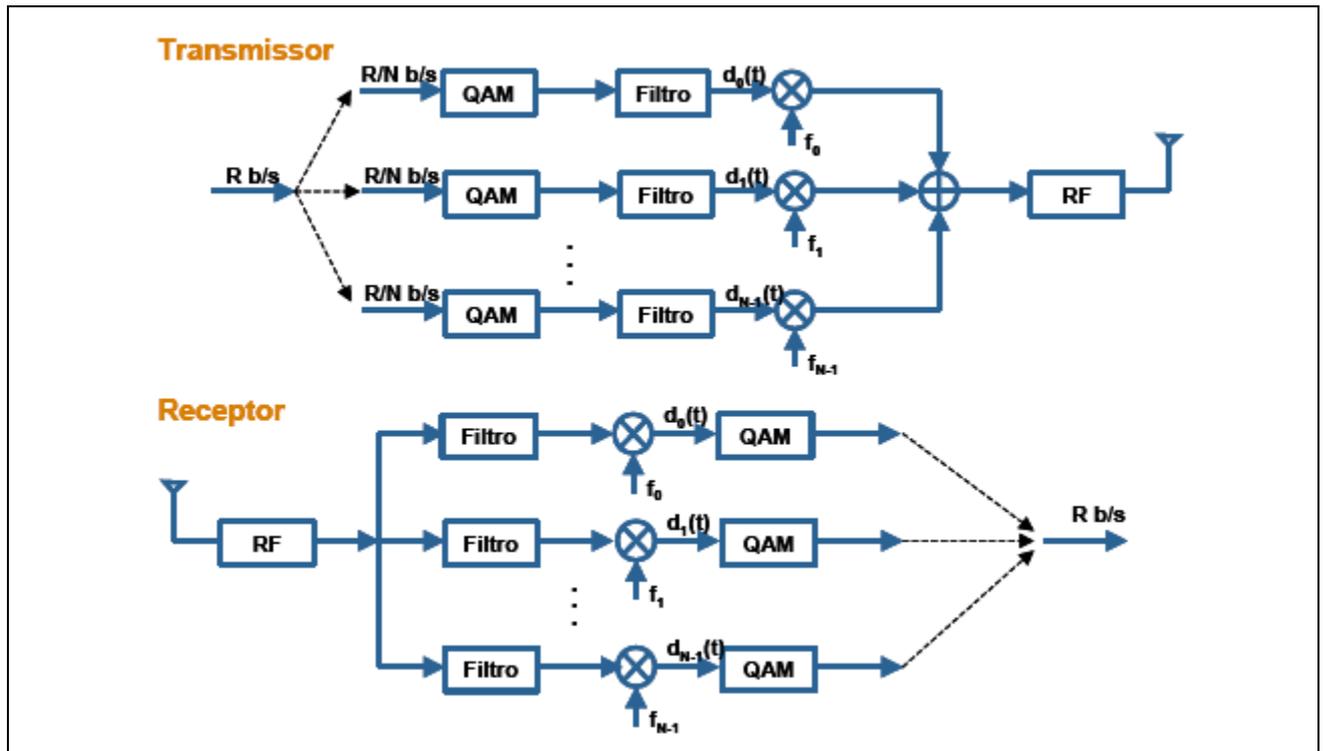


Figura 5. Modulação OFDM implementada por meio de banco de filtros

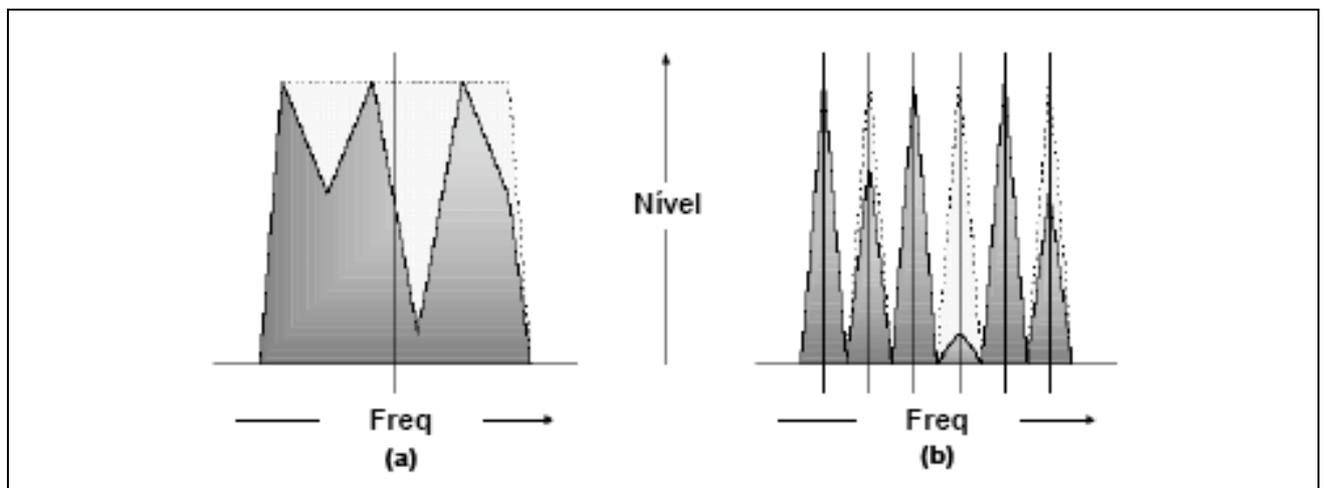


Figura 6. Sinais recebidos em sistemas de banda larga de portadora única e multiportadora

A Figura 7. ilustra o esquema de modulação OFDM especificado para a tecnologia WiMAX. A informação é mapeada em um símbolo de duração T_s , que compreende um intervalo de guarda T_g e o símbolo efetivo, de duração T_b (vide Figura 7.a). O tempo de guarda T_g tem a função de aumentar a robustez ao desvanecimento por multipercurso. A porção final de cada símbolo é ciclicamente copiada sobre porção reservada ao intervalo de guarda, originando um prefixo cíclico (*Cyclic Prefix*), que contribui para manter a ortogonalidade entre as subportadoras, representada na Figura 7.b. Na Figura 7.c, pode-se observar os tipos de subportadoras definidos na camada física OFDM da tecnologia WiMAX. As subportadoras piloto são utilizadas nos mecanismos de controle de potência, ao passo que as subportadoras DC podem ser utilizadas como banda de guarda dentro de um canal de banda larga.

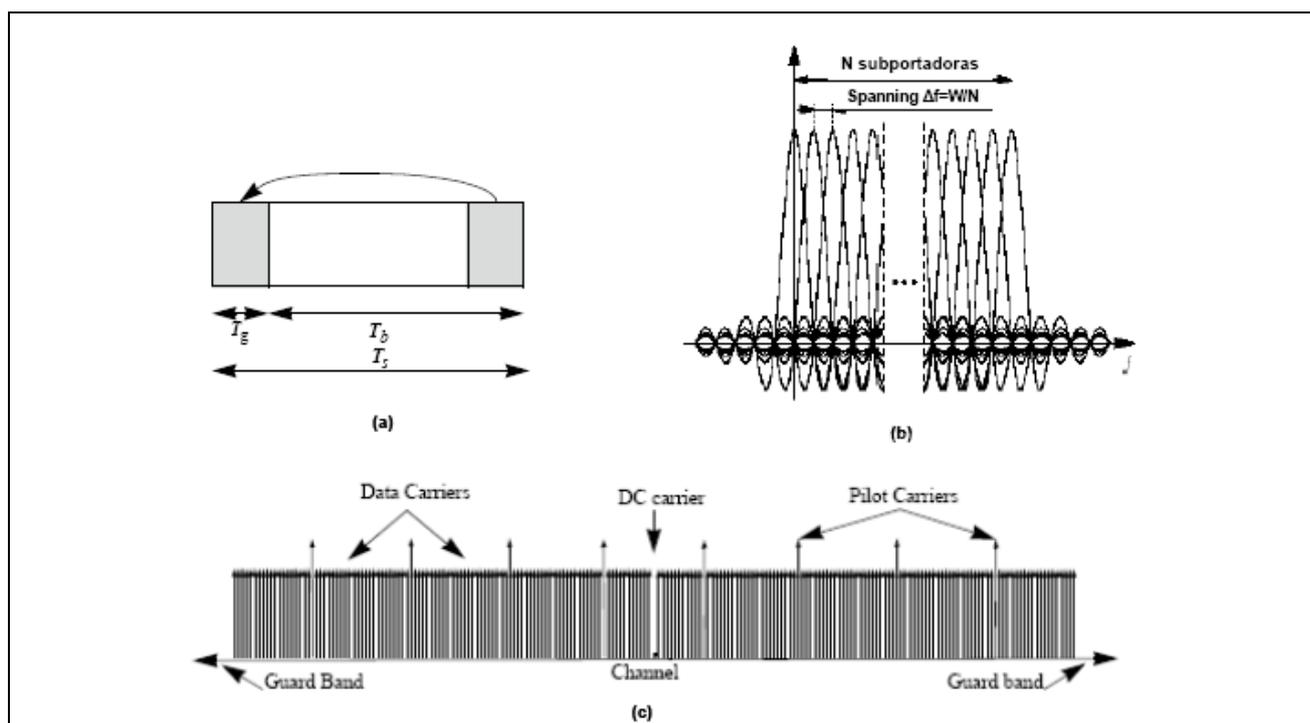


Figura 7. Modulação OFDM na tecnologia WiMAX

3.2.2. TÉCNICA DE ACESSO OFDMA

A técnica OFDMA divide um canal em sub-canais, com cada sub-canal sendo alocado a um assinante diferente [32]. Na técnica OFDMA diferentes assinantes acessam a estação base simultaneamente utilizando diferentes canais de tráfego. Os sub-canais permitem que o *link* seja balanceado de forma que o ganho do sistema seja o mesmo para o *downlink* e para o *uplink*.

3.3. A CAMADA MAC

A camada MAC corresponde à camada imediatamente acima da camada física. A esta camada estão associadas as funções de fornecimento de serviços para os usuários da rede.

A camada de acesso, como o nome sugere, determina o caminho no qual as estações assinantes acessam a rede e como os recursos da rede serão atribuídos a elas. A MAC é responsável por exercer funções relacionadas ao controle de acesso e transmissão dos dados. O protocolo MAC IEEE 802.16 foi projetado primeiramente para suportar arquiteturas de rede ponto-multiponto, apesar dele também suportar arquiteturas ponto a ponto. As bandas de frequências mais baixas também suportam topologias em malha (*mesh*). O protocolo MAC lida com a necessidade de altas taxas de bits, tanto no *uplink*, como no *downlink*. Algoritmos de acesso e de alocação de banda devem acomodar centenas de terminais por canal, sendo que cada terminal pode ser compartilhado por múltiplos usuários finais. Os serviços que tais usuários finais exigem são diferentes em sua natureza, e incluem dados e voz, conectividade IP (*Internet Protocol*) e voz sobre IP (VoIP). Para dar suporte a esta ampla gama de serviços, o MAC 802.16 acomoda tanto o tráfego contínuo quanto o tráfego em rajadas.

3.3.1. Subcamada de Convergência Específica ao Serviço

Esta subcamada provê toda a transformação ou mapeamento de dados externos da rede nas Unidades de Dados do Serviço (SDUs), que são recebidas pela subcamada da parte comum do MAC. Isto inclui a classificação de SDUs de redes externas e sua associação ao apropriado fluxo de serviço do MAC e identificador de conexão (CID). Pode também incluir funções como a supressão do cabeçalho da carga útil.

Subcamadas de convergência específicas ao tipo de serviço são definidas para ATM, IP e Ethernet. O Padrão IEEE 802.16 define duas subcamadas de convergência específicas ao serviço, de modo a mapear serviços de e para as conexões MAC 802.16: a subcamada de convergência ATM (definida para serviços ATM) e a subcamada de convergência de pacotes (definida para mapear serviços de pacotes como Ipv4, Ipv6, Ethernet e *Virtual Local Area Networks*).

A respectiva subcamada de convergência recebe dados de camadas superiores, classifica-os como uma célula ATM ou um pacote, e passa os dados para a subcamada da parte comum do MAC. A primeira tarefa da subcamada de convergência é dividir as SDUs entre as conexões MAC apropriadas, preservar ou ativar o QoS, e permitir a alocação de banda. Em adição a estas funções

básicas, as subcamadas de convergência também podem realizar funções mais sofisticadas como supressão e reconstrução de cabeçalho da carga útil, para melhorar a eficiência do *link* aéreo [8].

3.3.2. Subcamada da Parte Comum

Esta subcamada provê a principal funcionalidade MAC de acesso ao sistema, alocação de largura de banda, estabelecimento de conexão e manutenção de conexão. Ela recebe dados de várias subcamadas de convergência, classificando-os para uma conexão MAC particular.

A camada MAC do padrão IEEE 802.16 é orientada à conexão, ou seja, todos os serviços, incluindo os inerentemente sem conexão são mapeados para uma conexão. Isto provê um mecanismo para requisitar largura de banda, associar parâmetros de QoS e de tráfego, transportar e rotear os dados para a subcamada de convergência apropriada, além de outras ações associadas aos termos de serviço presentes em contrato. As conexões, uma vez que estabelecidas, podem requerer manutenção ativa. As exigências de manutenção variam dependendo do tipo de serviço conectado. O término de uma conexão geralmente ocorre somente quando um contrato de serviço de cliente muda, e é estimulado pela estação base ou pelos assinantes [9].

As conexões são referenciadas através de Identificadores de Conexão (CIDs) de 16 bits, e podem requisitar largura de banda assegurada continuamente ou largura de banda sob demanda. Cada assinante tem um endereço MAC padrão de 48-bits, que serve principalmente como um identificador de equipamento, uma vez que os primeiros endereços utilizados durante a operação são os CIDs [8]. Após entrar na rede, atribui-se para aos assinantes três conexões de gerenciamento em cada direção. Estas três conexões refletem os três diferentes requisitos de QoS usados por diferentes níveis de gerenciamento. São elas:

- Conexão Base: é utilizada para transferir mensagens MAC curtas e de tempo crítico, além de mensagens RLC (*Radio Link Control*).

- Conexão Primária de Gerenciamento: é usada para transferir mensagens mais longas e mais tolerantes ao atraso, como as usadas para autenticação e para estabelecimento de conexão.

- Conexão Secundária de Gerenciamento: é usada para a transferência de mensagens de gerenciamento baseadas em padrões, como o *Dynamic Host Configuration Protocol* (DHCP), *Trivial File Transfer Protocol* (TFTP), e o *Simple Network Management Protocol* (NMP).

Além destas conexões de gerenciamento, são alocadas conexões de transporte aos assinantes para os serviços contratados. Estas conexões são unidirecionais para facilitar a diferenciação entre parâmetros de tráfego e QoS no *uplink* e no *downlink*, sendo que estes parâmetros são tipicamente atribuídos em pares aos serviços [8].

3.3.3. Subcamada de Privacidade

O padrão IEEE 802.16 especifica protocolos para autenticação e privacidade. O protocolo de privacidade do padrão IEEE 802.16 é baseado no protocolo PKM (*Privacy Key Management*) da especificação DOCSIS BPI [13]. O protocolo PKM utiliza certificados digitais X.509 com algoritmo RSA de chave pública para autenticação dos assinantes e troca de chaves de autorização. O PKM é construído ao redor de um conceito de associações de segurança (ASs). Uma associação de segurança (AS) contém informações sobre o algoritmo de criptografia a ser utilizado, o algoritmo de autenticação de dados, e o algoritmo para troca de chaves de criptografia de dados. Cada assinante estabelece pelo menos uma AS durante a inicialização. Cada conexão, com exceção das de gerenciamento básico, é mapeada em uma AS tanto no momento de estabelecimento de conexão como dinamicamente durante a operação.

No momento em que um assinante se conecta a uma estação base, eles executam um processo de autenticação mútua com criptografia RSA de chave pública, usando certificados X.509. Apenas os assinantes são autenticados, pois o padrão assume que não é algo razoável uma estação base ser clonada. Além disso, é considerado impossível a operação de uma estação base não autorizada sem que haja interrupção no serviço.

É importante ressaltar que apenas os dados do usuário são protegidos no padrão IEEE 802.16, os cabeçalhos não são. Para a criptografia dos dados é usado o DES (*Data Encryption Standard*) executando em modo CBC (*Cipher Block Chaining*) com chaves de 56 bits ou o DES triplo com duas chaves, no qual a criptografia é realizada três vezes. Tanto o DES com encadeamento de blocos de cifras (CBC) quanto o DES triplo são sistemas de chave simétrica, os quais exigem que as duas partes conheçam a chave [1].

3.4. FORMATO DA PDU MAC

A PDU (Unidade de Dados de Protocolo) da camada MAC corresponde à unidade de dados trocada entre as camadas MAC da estação base e de seus assinantes. O comprimento da PDU MAC é variável, e o seu formato é mostrado na Figura 8.

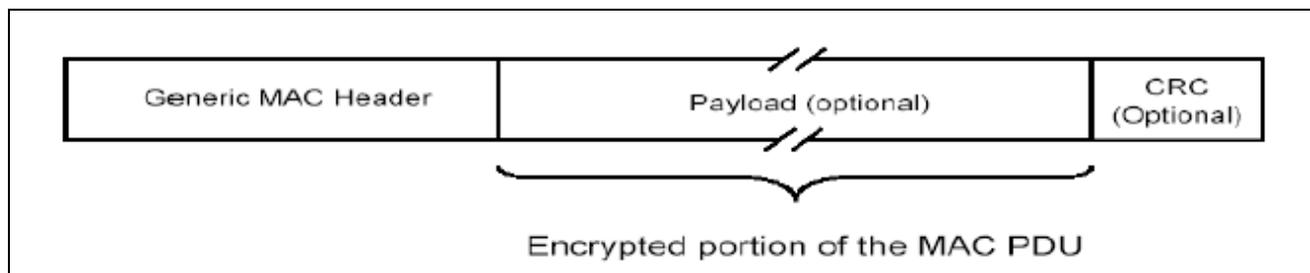


Figura 8. Formato da PDU MAC
Fonte: Adaptado de Eklund (2002)

Uma PDU MAC consiste de um cabeçalho de tamanho fixo (6 bytes), de uma carga útil de tamanho variável e de uma verificação de redundância cíclica (CRC) opcional (4 bytes). O tamanho máximo de uma PDU MAC é 2048 bytes, incluindo o cabeçalho, a carga útil e o CRC. O tamanho mínimo é de 6 bytes que corresponde à PDU MAC de requisição de largura de banda, a qual possui apenas o cabeçalho. A carga útil da PDU MAC contém mensagens de gerência do MAC ou dados da subcamada de convergência. Existem dois formatos possíveis para o cabeçalho: o cabeçalho genérico e o cabeçalho de requisição da largura de banda. Tais cabeçalhos são distinguidos pelo campo HT.

No cabeçalho genérico, mostrado na Figura 9, o campo *HT* fica setado em 0 indicando que se trata de cabeçalho genérico. O bit *EC* informa se a carga útil está criptografada. O campo *Type* identifica o tipo de quadro, informando principalmente se a compactação e a fragmentação estão presentes. O campo *CI* indica a presença ou a ausência da verificação CRC no final da PDU MAC. O campo *EKS* informa qual das chaves de criptografia está sendo usada (se houver). O campo *LEN* fornece o comprimento completo do quadro, incluindo o cabeçalho e o CRC. O campo *CID* informa a qual conexão o PDU pertence. O *HCS* é um campo de 8 bits usado para detectar erros no cabeçalho, empregando o polinômio $x^8 + x^2 + x + 1$ [2].

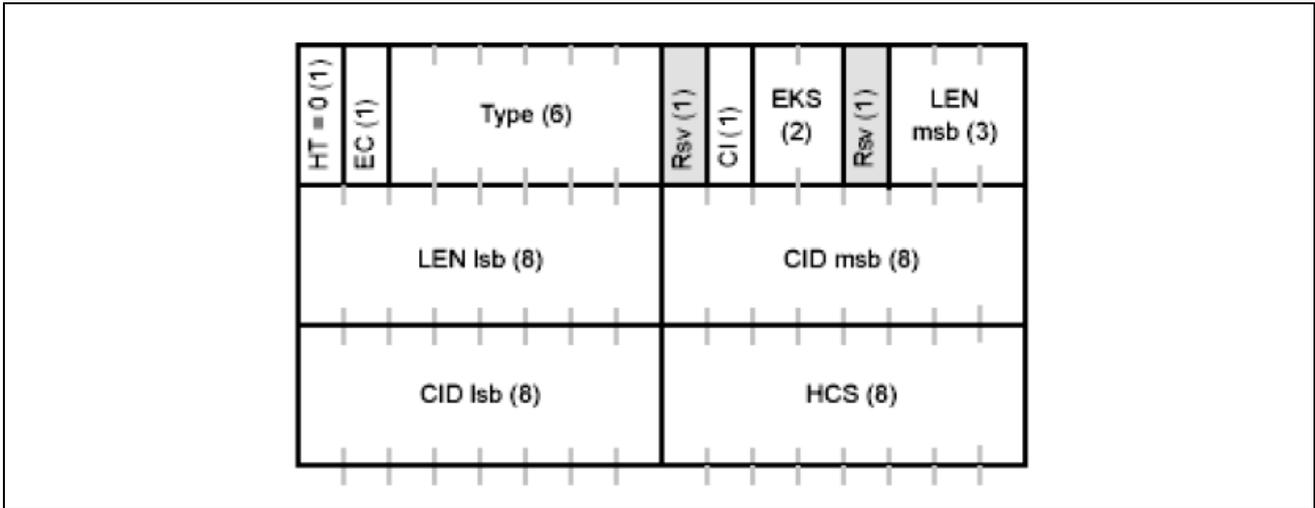


Figura 9. Formato do cabeçalho genérico

Fonte: Adaptado de Eklund (2002)

O cabeçalho de requisição da largura de banda, mostrado na Figura 10, possui o campo *HT* setado em 1, indicando que o cabeçalho é de requisição de largura de banda. Esse cabeçalho possui um campo *BR*, formando um número de 16 bits, que indica a quantidade de largura de banda necessária para transportar o número especificado de bytes, ou seja, indica o número de bytes requisitado. O campo *EC* é sempre setado em zero, indicando que não há criptografia. O campo *type*, se setado em zero indica requisição de largura de banda incremental, ou se setado em 1 indica requisição agregada.

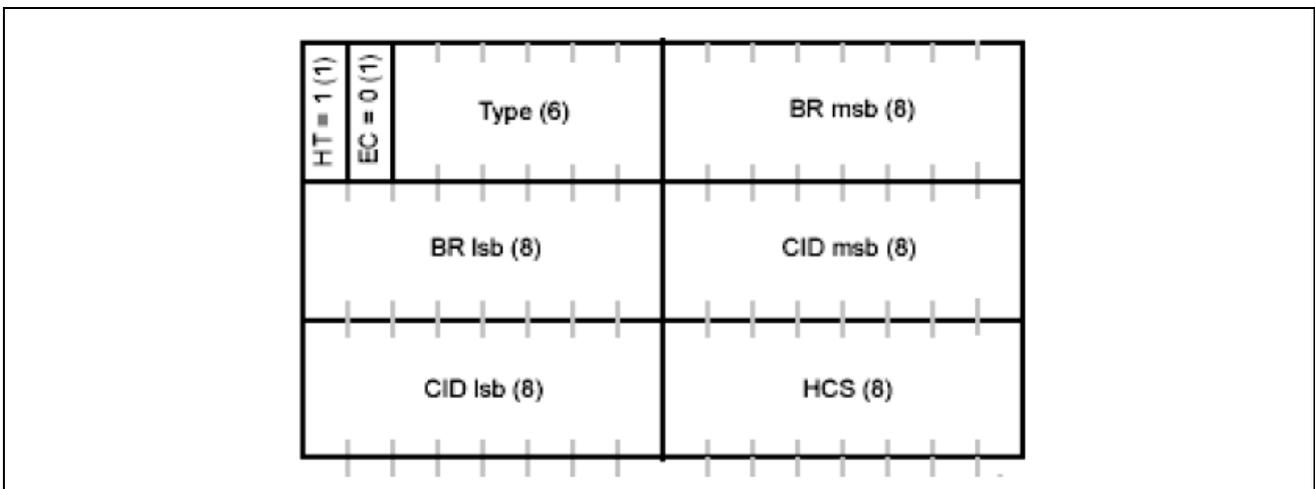


Figura 10. Formato do cabeçalho de requisição de largura de banda

Fonte: Adaptado de Eklund (2002)

Além do formato do cabeçalho, outra diferença entre a PDU de solicitação de largura de banda e a PDU genérica é que a primeira não transporta uma carga útil. Três tipos de sub-cabeçalhos podem estar presentes no cabeçalho genérico da PDU MAC, sendo a sua presença

indicada pelo campo Type: Sub-cabeçalho de gerenciamento da concessão: é usado por um assinante para informar suas necessidades de gerenciamento de largura de banda a sua estação base. Ou seja, os assinantes utilizam este cabeçalho para transportar o pedido de banda à sua estação base. Sub-cabeçalho de fragmentação: contém informações que indicam a presença e a orientação de fragmentos de SDUs na carga útil. Sub-cabeçalho de empacotamento: é usado para indicar o empacotamento de várias SDUs em uma única PDU.

Os sub-cabeçalhos são considerados como sendo uma parte da carga útil da PDU MAC. Os sub-cabeçalhos de gerenciamento da concessão e de fragmentação podem ser introduzidos na PDU MAC imediatamente depois do cabeçalho genérico desde que indicado pelo campo Type. Da mesma forma, o sub-cabeçalho de empacotamento pode ser introduzido antes de cada SDU MAC se assim for indicado pelo campo Type.

3.5. FRAGMENTAÇÃO E EMPACOTAMENTO

O padrão IEEE 802.16 permite fragmentação e empacotamento simultâneos para o uso eficiente da largura de banda. Os dois processos podem ser iniciados por uma estação base ou por um assinante.

A fragmentação é processo no qual uma SDU MAC é dividida em fragmentos que são transportados em diversas PDUs MAC. A PDU MAC possui um sub-cabeçalho de fragmentação que inclui o número de seqüência do fragmento e um campo de controle, indicando se a PDU contém o primeiro fragmento, um fragmento intermediário ou o último fragmento. O número de seqüência permite que os assinantes recriem a carga útil original e detectem a perda de qualquer pacote intermediário. Caso haja perda, o assinante descartará todas as PDUs MAC em uma conexão até que um novo primeiro fragmento seja detectado ou uma PDU MAC não fragmentado seja detectada.

O empacotamento é o processo pelo qual diversas SDUs MAC, ou seus fragmentos, são transportados em uma única PDU MAC. O empacotamento possui dois esquemas. Um para as conexões que carregam as SDUs MAC de comprimento variável e outro para conexões com SDUs MAC de comprimento fixo. O esquema para o empacotamento de SDUs MAC de comprimento fixo é baseado no fato de que o comprimento de cada um é previamente conhecido, conseqüentemente, não há necessidade de adicionar sub-cabeçalhos entre as SDUs. Também a fragmentação deve ser desabilitada para que este esquema trabalhe. Já no empacotamento de SDUs

MAC de comprimento variável, são introduzidos entre cada SDU sub-cabeçalhos que contêm o comprimento da SDU junto com a informação de controle da fragmentação. Isto permite empacotamento e fragmentação simultâneos.

As SDUs MAC são formatadas de acordo com o formato da PDU MAC, possivelmente com fragmentação e/ou empacotamento, antes de serem compartilhadas entre uma ou mais conexões, de acordo com o protocolo MAC. Após atravessar o *link* aéreo, as PDUs MAC são reconstruídas nas SDUs MAC originais, de modo que as modificações de formato realizadas por esta camada sejam transparentes para a entidade receptora.

3.6. ESTRUTURA DO FRAME

O padrão IEEE 802.16 usa um frame de duração de 0,5, 1, ou 2 ms. Este frame é dividido em slots físicos com a finalidade de alocação de largura de banda e de identificação de transições da camada física [9]. Dentro de cada frame há um subframe do *downlink* e um subframe do *uplink*.

O subframe do downlink inicia com uma seção de controle de frame, que possui mensagens DL-MAP e UL-MAP indicando as transições físicas no *downlink*, assim como a alocação de largura de banda e os perfis de perda no *uplink*. A DL-MAP contém vários parâmetros do sistema, a fim de informá-los às novas estações quando elas se conectarem. A UL-MAP especifica quando as transições da camada física (modulação e mudanças de FEC) ocorrem dentro do subframe do downlink, e é sempre aplicável ao frame corrente. Em ambos sistemas TDD e FDD, a UL-MAP provê alocações iniciando, no mais tardar, no próximo frame de *downlink*. A UL-MAP pode, contudo, alocar a partir do frame corrente, desde que os tempos de processamento e atrasos de ida-e-volta sejam observados [8]. Ao contrário do *downlink*, no subframe do *uplink* a UL-MAP concede largura de banda a assinantes específicos. Os assinantes transmitem em seu alocamento atribuído usando o perfil especificado no código de intervalo de uso do uplink (UIUC), na entrada da UL-MAP, que garante a eles a largura de banda.

Como visto na Seção 3.3, o IEEE 802.16 MAC suporta ao mesmo tempo TDD e FDD. Na operação em FDD, os canais de *downlink* e *uplink* são situados em frequências separadas, conforme mostrado na Figura 11.

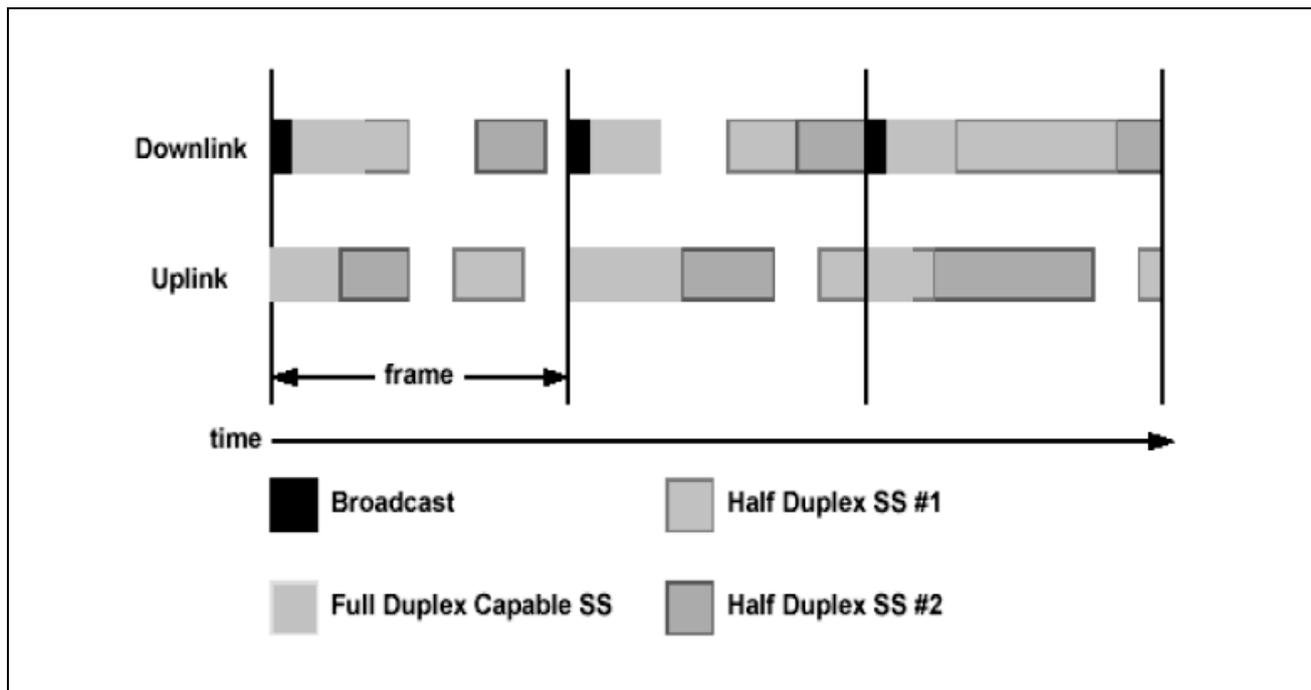


Figura 11. Transmissão de frames em FDD

Um frame de duração fixa é usado em ambas as transmissões no *downlink* e no *uplink*. Isto facilita o uso de diferentes tipos de modulação e permite também o uso simultâneo de estações assinantes full-duplex e opcionalmente estações assinantes half-duplex. Em sistemas de FDD, a parcela de TDM pode ser seguida por um segmento de TDMA que inclua um preâmbulo extra. Esta característica permite o suporte melhor de assinantes half-duplex. Em um sistema eficientemente programado de FDD com muitos assinantes half-duplex, alguns podem necessitar transmitir mais cedo no frame do que recebem. Devido a sua natureza halfduplex, estes assinantes perdem a sincronização com o *downlink*. Assim, o preâmbulo de TDMA permite que eles recuperem a sincronização.

No caso do TDD, as transmissões em *downlink* e em *uplink* dividem a mesma frequência, mas ocorrem em tempos diferentes. O frame do TDD tem duração fixa e contém um subframe do *downlink* e um subframe do *uplink*. O frame do TDD é adaptável, ou seja, a capacidade do link alocado para o *downlink* e *uplink* pode variar, a fim de fazer com que a largura de banda em cada sentido corresponda ao tráfego neste sentido [2]. Uma transmissão em TDD é mostrada na Figura 12.

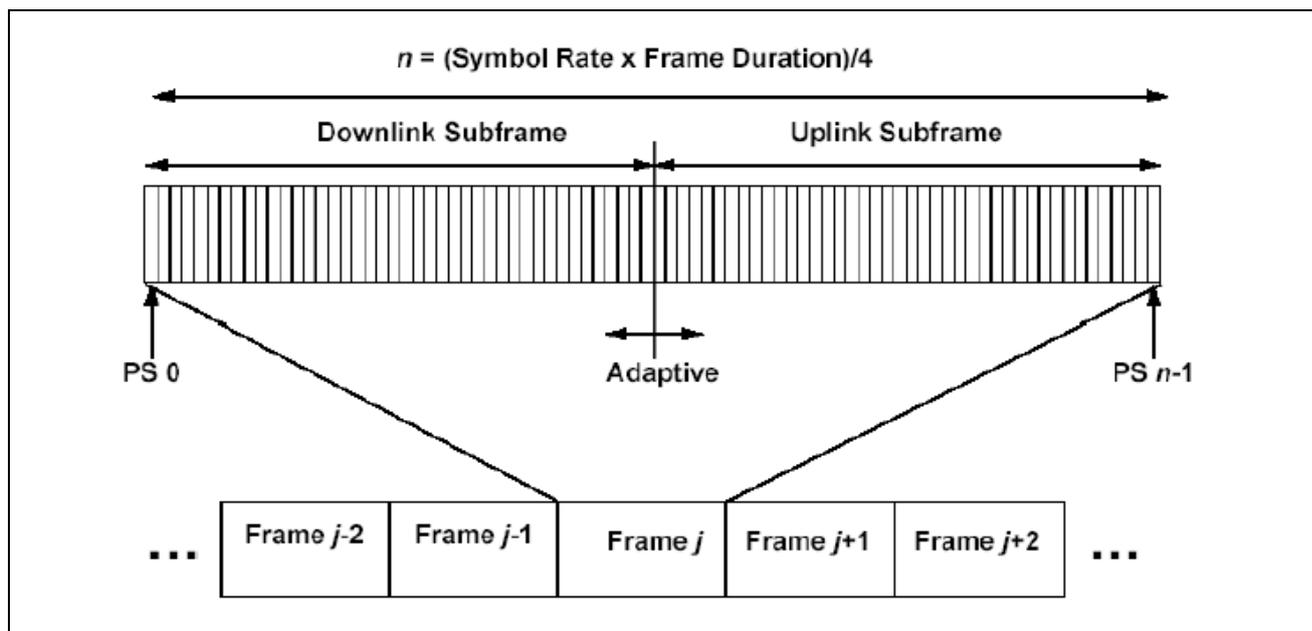


Figura 12. Transmissão de frames em TDD

Fonte: Adaptado de Eklund (2002)

Conforme verificado na Figura 12, o frame é dividido em um número de slots de tempo, que são dedicados a cada sentido, os quais ajudam a partição da largura de banda facilmente.

3.7. REQUISICÃO DE LARGURA DE BANDA

Requisição de largura de banda se refere ao mecanismo que os assinantes utilizam para indicar à estação base que eles necessitam alocar largura de banda para o *uplink*. A requisição de largura de banda pode ser incremental ou agregada. Quando a estação base recebe uma requisição de largura de banda incremental ela somará a quantidade de largura de banda requisitada à sua percepção atual de necessidade de largura de banda da conexão. Quando a estação base recebe uma requisição de largura de banda agregada ela substituirá a sua percepção atual de necessidade de largura de banda da conexão pela a quantidade de largura de banda requisitada. Por questões de eficiência, a maioria dos pedidos por largura de banda são do tipo incrementais, ou seja, o assinante pede por mais largura de banda para uma conexão. O campo *Type* do cabeçalho de requisição de largura de banda indica se a requisição é incremental ou agregada.

O assinante tem uma série de caminhos para pedir largura de banda, mas para demanda de largura de banda contínua, como dados CBR e T1/E1, os assinantes não precisam pedir largura de banda, a estação base irá conceder sem a solicitação. Uma maneira mais convencional de pedir largura de banda é a de enviar uma PDU MAC que consiste simplesmente do cabeçalho de requisição de largura de banda, sem carga útil.

3.8. CONCESSÃO DE LARGURA DE BANDA

Dois métodos de concessão de largura de banda são descritos na especificação do MAC: concessão por conexão (*Grant per Connection mode* - GPC) e concessão por estação (*Grant per Subscriber Station mode* - GPSS), que diferem pela habilidade de alocar largura de banda apenas para uma conexão ou para o assinante como um todo, respectivamente.

Para um sistema operando na modalidade GPC as concessões estão dirigidas a uma conexão específica, e os assinantes usam a concessão somente para essa conexão. Se forem concedidas oportunidades de transmissão a diversas conexões de um assinante, serão requeridas múltiplas entradas na UL-MAP para um dado assinante. Isto introduz um significativo *overhead*. Em um sistema que funciona na modalidade de GPSS é fornecida ao assinante uma única concessão de largura de banda para todas as suas conexões. A estação do assinante agrega as necessidades de todos os usuários no edifício e faz solicitações coletivas para eles.

Quando a largura de banda é concedida, a estação reparte essa largura de banda entre seus usuários, conforme seus critérios, respeitando as exigências de QoS de suas conexões. Para sistemas que operam na faixa de 10-66GHz a modalidade GPSS é a única permitida [8].

3.9. QUALIDADE DE SERVIÇO (QOS)

Uma característica importante que difere o padrão 802.16 de outros padrões para redes sem fio, é que ele inclui mecanismos para oferecer QoS diferenciado para suportar as necessidades de diferentes aplicações. Por exemplo, aplicações de voz e vídeo requerem latência baixa, mas toleram alguma taxa de erro. Em contrapartida, as aplicações genéricas de dados não podem tolerar erros, mas a latência não é algo crítico. Dessa forma, o padrão acomoda a voz, vídeo, e outras transmissões de dados usando características apropriadas no MAC.

O padrão IEEE 802.16 possui quatro classes de serviços:

1. Serviço de taxa de bits constante.
2. Serviço de taxa de bits variável de tempo real.
3. Serviço de taxa de bits variável em tempo não real.
4. Serviço de melhor esforço.

Cada conexão no sentido do *uplink* é mapeada para um desses serviços. O serviço é associado a cada conexão no tempo de *setup* da conexão.

3.9.1. Serviço de Taxa de Bits Constante

O serviço de taxa de bits constante (*Unsolicited Grant Service* - UGS) foi definido para suportar serviços que geram unidades fixas de dados periodicamente, tal como E1/T1 ou o serviço de taxa de bits constante (CBR) do ATM. Conexões estabelecidas com o serviço de taxa de bits constante não emitem pedidos de largura de banda para dados, em vez disso, a estação base concederá certos slots de tempo para transmitir uma quantidade predeterminada de dados em intervalos regulares. Uma vez que a largura de banda é alocada, os slots de tempo ficam disponíveis automaticamente, sem que seja necessário solicitá-los. Isso elimina o *overhead* e a latência de pedidos de largura de banda, de forma a atender o atraso e o *jitter* de atraso pedidos pelos serviços essenciais. Se for necessário atender a restrições ainda mais severas de *jitter*, um esquema de buferização na saída é utilizado.

3.9.2. Serviço de Taxa de Bits de Variável de Tempo Real

O serviço de taxa de bits variável de tempo real (*Real-Time Polling Service* - rtPS) se destina a aplicações de multimídia compactada (MPEG vídeo) e a outras aplicações de software de tempo real em que a quantidade de largura de banda necessária em cada instante pode variar, tais como voz sobre IP. Neste tipo de serviço a estação base consulta os assinantes, a intervalos fixos, sobre a quantidade de largura de banda necessária em cada momento. Tendo em vista que os assinantes emitem pedidos explícitos, o *overhead* e a latência do protocolo são aumentados. Este serviço se destina a atender as necessidades dos serviços que são dinâmicos por natureza, mas oferece oportunidades dedicadas de requisição para atender necessidades de tempo real.

3.9.3. Serviço de Taxa de Bits de Variável em Tempo Não Real

O serviço de taxa de bits variável não de tempo real (*Non-Real-Time Polling Service* - nrtPS) se destina a transmissões pesadas que não são de tempo real, como aquelas relacionadas a transferência de grandes arquivos. Este serviço é praticamente idêntico ao serviço de tempo real, exceto pelo fato de que as conexões devem utilizar oportunidades de acesso randômico para enviar pedidos de largura de banda. Tipicamente, serviços carregados sobre essas conexões conseguem tolerar atrasos mais longos e são mais sensíveis ao *jitter* de atraso. O serviço de taxa de bits variável

não de tempo real é aplicável para acesso a Internet com taxas de garantias mínimas e para conexões ATM GFR.

3.9.4. Serviço de Menor Esforço

O serviço de melhor esforço (*Best Effort* - BE) não fornece nenhuma garantia que uma conexão consiga o acesso ao link. O assinante deve disputar a largura de banda com outros assinantes do serviço de melhor esforço. As solicitações de largura de banda são feitas em slots de tempo marcados no mapa do uplink como disponíveis para disputa. Se uma solicitação for bem sucedida, seu sucesso será notado no próximo mapa do downlink. Se ela tiver sucesso, os assinantes mal sucedidos terão de tentar de novo mais tarde. Nem garantias de vazão nem de atraso são prometidas. Os assinantes enviam pedidos por largura de banda nos slots de acesso randômico ou pelas oportunidades dedicadas de transmissão. A ocorrência de oportunidades dedicadas está sujeita à carga da rede e os assinantes não podem se basear na presença da mesma.

4. FATORES DE INTERFERÊNCIA E CARACTERÍSTICAS DE INSTALAÇÃO

Neste capítulo serão apresentadas as interferências às quais uma rede sem fio metropolitana estará sujeita, bem como os requisitos de instalação do sistema, possibilitando uma melhor escolha do cenário e da topologia para o projeto de rede sem fio metropolitana. A Seção 4.1 dá uma visão geral da importância das condições físicas as quais a rede estará sujeita. A Seção 4.2 descreve os efeitos causados pelo ambiente de propagação. A Seção 4.3 apresenta as arquiteturas de rede que os sistemas sem fio podem operar. A Seção 4.4 apresenta as características de instalação do sistema de rede sem fio metropolitana.

4.1. INTRODUÇÃO

Na decisão pela implementação de uma determinada tecnologia de rede, muitos fatores devem ser considerados, entretanto, as características de instalação física da rede constituem um dos fatores mais importante nesta escolha.

Antes do início de um projeto de rede é importante saber detalhes da instalação e das condições de interferências que essa rede enfrentará a fim de aferir a viabilidade da instalação da rede, tanto em termos econômicos quanto em termos físicos. No caso do projeto de instalação de redes sem fio metropolitanas, não é diferente. Por serem redes em que a transmissão ocorre pelo ar e pelo fato de atingirem grandes distâncias, os fatores de interferência tornam-se críticos e devem ser previamente analisados para que o projeto de rede tenha sucesso. Dessa forma, analisar as características de instalação e de interferências do padrão IEEE 802.16 constitui o ponto inicial para avaliar a viabilidade de implementação desse tipo de rede. É o que trata este capítulo.

4.2. INTERFERÊNCIAS

A interferência ocorre quando dois ou mais sinais viajando em direções diferentes podem passar um através do outro, e conseqüentemente, serem selecionados na mesma frequência, nesse caso o receptor não tem como distinguir um do outro. O sinal indesejado é chamado de interferência e pode limitar seriamente a eficiência do sinal de rádio [1].

As interferências podem ser destrutivas ou construtivas dependendo de como os seus ciclos estiverem alinhados no momento em que ocorrer a sobreposição dos sinais. A interferência

construtiva ocorre quando os sinais chegam ao mesmo tempo no ponto máximo e no mínimo, criando um sinal mais forte. A interferência destrutiva ocorre quando os sinais cancelam inteiramente um ao outro devido ao fato de um sinal estar no ponto máximo e o outro no mínimo.

O receptor deve saber a exata frequência do sinal para poder reconhecê-lo, caso ele não esteja sintonizado na frequência certa, o sinal é escutado como uma interferência. Para assegurar que os sinais de rádio permaneçam livres de interferência, as frequências precisam ser planejadas e controladas cuidadosamente [1]. No Brasil o órgão que regulamenta e restringe a operação das faixas de frequência para que a interferência seja minimizada é a Anatel [31].

4.2.1. Interferências Causadas pelo Meio de Propagação

As redes sem fio têm como principal característica a utilização do meio aéreo para a transmissão de dados. Portanto, é de fundamental importância para quem esteja planejando a construção de uma rede sem fio, estudar todas as características próprias desse peculiar meio de transmissão.

O padrão IEEE 802.16 utiliza ondas de rádio para a transmissão de dados. Como visto na Seção 2.2.4, os sinais de rádio são um tipo de radiação eletromagnética e as suas características dependem da frequência em que se encontram.

A área completa de alcance da radiação eletromagnética é conhecida como espectro. O espectro é dividido em várias regiões conhecidas como bandas ou faixas de frequência. O padrão 802.16 utiliza as bandas UHF, SHF e EHF que são conhecidas coletivamente como microondas, por causa de seus pequenos comprimentos de onda. A alta largura de banda e a faixa curta fazem com que as microondas sejam úteis para o uso em comunicações, entretanto, têm a desvantagem de serem facilmente bloqueadas por obstáculos como paredes e morros e atenuados pela chuva e pelas nuvens [1]. A Tabela 4 apresenta as faixas de ondas de rádio existentes.

Tabela 4. Faixas de ondas de rádio

Comprimento da onda	Frequência	Nome comum	Objetivos principais
Acima de 100 km	Inferior a 3 KHz	ELF (<i>Extremely Low Frequency</i>)	Comunicações submarinas
10-100 km	3-30 KHz	VLF (<i>Very Low Frequency</i>)	Comunicações marítimas
1-10 km	20-300 KHz	LF (<i>Low Frequency</i>) ou LW (<i>Low Wave</i>)	Transmissões AM
100-1000 m	300-3000 KHz	MF (<i>Medium Frequency</i>) ou MW	Transmissões AM

		(<i>Medium Wave</i>)	
10-100 m	3-30 MHz	HF (<i>High Frequency</i>) ou SW (<i>Short Wave</i>)	Transmissões AM, rádio amador
1-10 m	30-300 MHz	VHF (<i>Very High Frequency</i>)	Transmissões FM e TV
0,1-1 m	300-3000 MHz	UHF (<i>Ultra High Frequency</i>)	TV e telefones celulares
10-100 mm	3-30 GHz	SHF (<i>Super High Frequency</i>)	Fixa sem fio e satélites
1-10 mm	30-300 GHz	EHF (<i>Extra High Frequency</i>)	Satélites e radar

Fonte: Adaptado de DORNAN (2001)

4.2.1.1. Análise do Efeito das Microondas

Como as microondas viajam em linha reta, corre-se o risco de obstáculos atravessarem o caminho das ondas, portanto, as antenas devem estar bem localizadas a fim de se obter uma visão desobstruída. Devido a essa necessidade de visão desobstruída, as redes que utilizam microondas geralmente necessitam de repetidores [2].

As microondas estão sujeitas a interferências por fenômenos atmosféricos e tempestades. Um dos maiores problemas da transmissão de microondas é o efeito do desvanecimento por múltiplos percursos (*multipath fading*), ou seja, uma onda pode ser refratada pelas camadas mais baixas da atmosfera e pode demorar uma fração a mais para chegar ao receptor. Este sinal atrasado pode entrar em fase com o sinal direto e anulá-lo. As microondas são também absorvidas pela chuva. Neste caso, a única solução é desviar os sinais para uma rota alternativa, contornando a chuva [2].

O padrão 802.16 divide o espectro de frequência de rádio (RF) em blocos grandes, que se sobrepõem ligeiramente, o primeiro estendendo-se de 2 GHz a 11 GHz e o segundo de 10 GHz a 66 GHz. Tendo em vista que o padrão 802.16 e a sua variação, o padrão 802.16a, empregam frequências diferentes, as interferências as quais eles estão sujeitos também são diferentes, portanto, é necessário analisar individualmente o efeito das interferências em cada um desses padrões.

A) O Efeito das Microondas no Padrão 802.16

As ondas de rádio na faixa de 10 a 60 GHz são conhecidas como ondas milimétricas. Essas ondas milimétricas têm como principal característica o fato de trafegarem em linha reta. Em consequência disso, a estação base pode ter várias antenas, cada uma apontando para um setor diferente do terreno circundante, a fim de possibilitar a cobertura de toda a área [2]. Geralmente, quanto mais curta a extensão da onda, mais rápida a atenuação do sinal quando é propagado através do ar, e na região acima de 10 GHz a atenuação eleva-se a um nível inicial de 0.2 decibels (dB) por

quilômetro. A atenuação do sinal nas regiões acima de 10 GHz é atribuída a duas causas, absorção do vapor de água e absorção da molécula do oxigênio. As transmissões tornam-se também cada vez mais sujeitas às circunstâncias atmosféricas, particularmente à chuva. A perda da distância da transmissão durante períodos de pesada precipitação é conhecida como atenuação pela chuva (*rain fade*) [3].

Um outro problema no espectro acima de 10 GHz é o efeito de obstrução não apenas de paredes, mas também da folhagem. As transmissões nestas faixas necessitam a linha de vista absolutamente desobstruída, que faz obviamente a colocação da estação base ser muito mais difícil.

B) O Efeito Microondas no Padrão 802.16a

O padrão 802.16a utiliza as microondas das bandas UHF e SHF. A UHF (*Ultra High Frequency*) se estende de 300MHz a 3GHz, já a SHF (*Super High Frequency*) utiliza o espectro entre 3 GHz e 30 GHz.

As transmissões que ocorrem de 3 GHz a aproximadamente 10GHz são vulneráveis ao efeito que é conhecido como distorção por múltiplos caminhos (*multipath*). A distorção consiste numa alteração da forma do sinal durante a sua propagação desde o emissor até ao receptor. Distorção *multipath* é uma condição onde o sinal sofre interferência dele mesmo por causa de reflexões fora da fronteira física convergindo com a direção do sinal, causando crescimento do nível de sinal do receptor ou enfraquecimento [3]. A distorção multipath causa erros nos bits recebidos pelo receptor.

As bandas SHF possuem como problema o bloqueio pelas paredes. Acima de 2,5 GHz as transmissões através das paredes ficam altamente dificultadas. Acima de 3 GHz o problema fica ainda mais acentuado, e as antenas internas tornam-se impraticáveis para receber transmissões nessa frequência.

4.2.1.2. Licença de Uso

Um ponto importante em projeto de redes sem fio é definir se serão utilizadas faixas licenciadas ou não licenciadas. Ambas as escolhas têm suas vantagens e desvantagens, e cabe uma análise custo/benefício para definir a melhor escolha.

Sabemos que o padrão 802.16 opera em bandas licenciadas, já uma extensão do padrão, o padrão 802.16a, suporta ambos tipos de frequências: licenciada e não licenciada, logo, no caso das redes sem fio metropolitanas, a escolha da faixa a ser utilizada terá ainda maior importância, pois limitará a escolha do padrão.

Para assegurar que os sinais de rádio permaneçam livres de interferência, as frequências precisam ser planejadas e controladas. Esse controle é feito através do licenciamento das bandas de frequência. As bandas licenciadas permitem uma faixa livre de interferências, com um desempenho bem melhor do que as bandas não licenciadas, entretanto, necessitam de autorização prévia dos órgãos de controle de uso do espectro de frequências, como a Anatel no Brasil e a FCC nos EUA, e o custo dessa licença pode ser um fator restritivo para o projeto de rede [19]. Por outro lado, as bandas não licenciadas têm o problema de sofrerem interferências.

As bandas licenciadas para o padrão 802.16 são as de 10,5, 25, 26, 31, 38 e 39 GHz. No caso do padrão 802.16a, as bandas licenciadas são as de 3,5 GHz e 10,5 GHz para a maioria dos países, exceto para os Estados Unidos, onde o WiMAX funciona na faixa de 2,5 - 2,7 GHz. A regulamentação brasileira já permite a utilização das soluções sem fio de banda larga em faixas licenciadas e não licenciadas. No Brasil, a Embratel possui a banda de 3,5 GHz e a Brasil Telecom, as bandas de 3,5 GHz e 10,5 GHz. Alguns WISPs (*Wireless ISP*) brasileiros também possuem a banda de 3,5 GHz [19].

As bandas não licenciadas são as de 2,4 GHz (faixa poluída), 5,2 GHz e de 5,8 GHz. A banda de 2,4 GHz (usada também nas redes 802.11) é considerada uma faixa livre e pode sofrer uma série de interferências, não sendo recomendada para o uso nas redes sem fio metropolitanas. Em contrapartida, a banda de 5,8 GHz permite a operação em uma faixa não poluída, havendo uma tendência de uso dessa banda para as redes sem fio metropolitanas.

As faixas de 5,2 GHz e 5,8 GHz, de uso sem licença, são conhecidas nos Estados Unidos como U-NII (*Unlicensed access to the National Information Infrastructure*) e são sujeitas a mais restrições de uso do que as frequências mais baixas, sendo explicitamente designadas apenas para transmissão de dados, não sendo permitidas para operações de dispositivos de controle remoto ou telefones portáteis [1].

4.2.2. Efeitos da Falta da Linha Visada

Quando uma onda de rádio encontra um objeto físico em seu percurso, ela pode comportar-se de uma dessas três formas: pode fornecer alguma de sua energia ao objeto na forma de calor, um processo denominado absorção; pode curvar-se em torno do objeto, um processo denominado difração; ou pode ricochetear do objeto, um processo denominado reflexão. Estes três processos, não são mutuamente exclusivos, ou seja, um sinal refletido pode imediatamente ser difratado enquanto encontra um contorno diferente do objeto que o reflete, e em cada caso onde a reflexão ou a difração ocorre, alguma energia estará sendo absorvida também [3].

4.2.2.1. Absorção

A absorção não muda o sentido da onda de rádio, mas retira sua energia. Tendo em vista que o sinal perde energia simplesmente por ser propagado pelo espaço livre, o efeito da absorção da energia por estruturas físicas, tais como paredes ou árvores, favorece a redução da distância que uma conexão de confiança pode ser mantida.

As perdas pela absorção podem ser significativamente severas a ponto de interromper inteiramente o sinal. Um exemplo disto é fornecido por um parque repleto de árvores elevadas onde qualquer um que tente através das árvores, com um sinal de microondas, alcançar os edifícios no outro lado será completamente incapaz de estabelecer um *link* aéreo devido ao efeito da absorção do sinal pelas folhagens [3].

4.2.2.2. Reflexão

Reflexão se refere a modificação da direção de propagação de uma onda que incide sobre uma interface que separa dois meios diferentes, e retorna para o meio inicial. A reflexão ocorre quando as ondas eletromagnéticas se deparam com obstáculos de dimensões muito maiores do que seus comprimentos de onda, sendo que parte da onda atravessa o objeto e a outra parte é refletida. Uma onda refletida causa um fenômeno conhecido como *multipath*. *Multipath* significa que o sinal de rádio pode viajar através de múltiplos trajetos para alcançar o receptor [3].

A energia refletida pode alcançar o receptor em um nível suficiente para fornecer um sinal utilizável, embora mais fraco do que seria um o sinal direto. O problema aqui, entretanto, é mais significativo do que uma simples redução no nível do sinal porque agora o receptor está operando inteiramente no ambiente *multipath*, e é provável que ele seja sujeito não a uma, mas a múltiplas

reflexões, cada uma das quais interferirá severamente com a outra, podendo causar o cancelamento do sinal se chegarem em fases diferentes.

4.2.2.3. Difração

A difração ocorre quando existe um objeto obstruindo a passagem entre o transmissor e o receptor e as ondas de rádio se dobram em torno das bordas desse objeto, resultando em uma transmissão do feixe de luz que fica fora do eixo em relação à antena do receptor. Cabe salientar que o sinal difratado não é necessariamente inútil, mas é certamente menos útil do que um sinal direto [3]. Rádios que operaram na região acima de 2Ghz, região que é atribuída geralmente aos serviços sem fio de banda larga, são obstruídos facilmente. O grau a que tais transmissões de alta frequência são obstruídas exerce uma grande influência na capacidade do operador da rede em registrar clientes, limitando o tamanho do mercado de assinantes.

Devido a esta limitação de assinantes causada pelas obstruções, a indústria procurou tecnologias que contornam ou mesmo atravessam tais obstruções, sendo essa tecnologia conhecida como NLOS (ausência de linha de visada) [34]. NLOS refere-se a toda a técnica para diminuir os efeitos de obstruções físicas, uma vez que nenhuma técnica ou equipamento de NLOS pode inteiramente eliminar efeitos do bloqueio [3].

Em uma ligação de NLOS, um sinal alcança o receptor com reflexões, dispersões e difrações. Os sinais que chegam ao receptor consistem em componentes do trajeto direto, dos trajetos com múltiplas reflexões, dos trajetos difratados na propagação e da energia dispersada. Estes sinais possuem diferentes atrasos de propagações e atenuação em relação ao trajeto direto. A Figura 13 apresenta um exemplo do trajeto direto e do indireto.

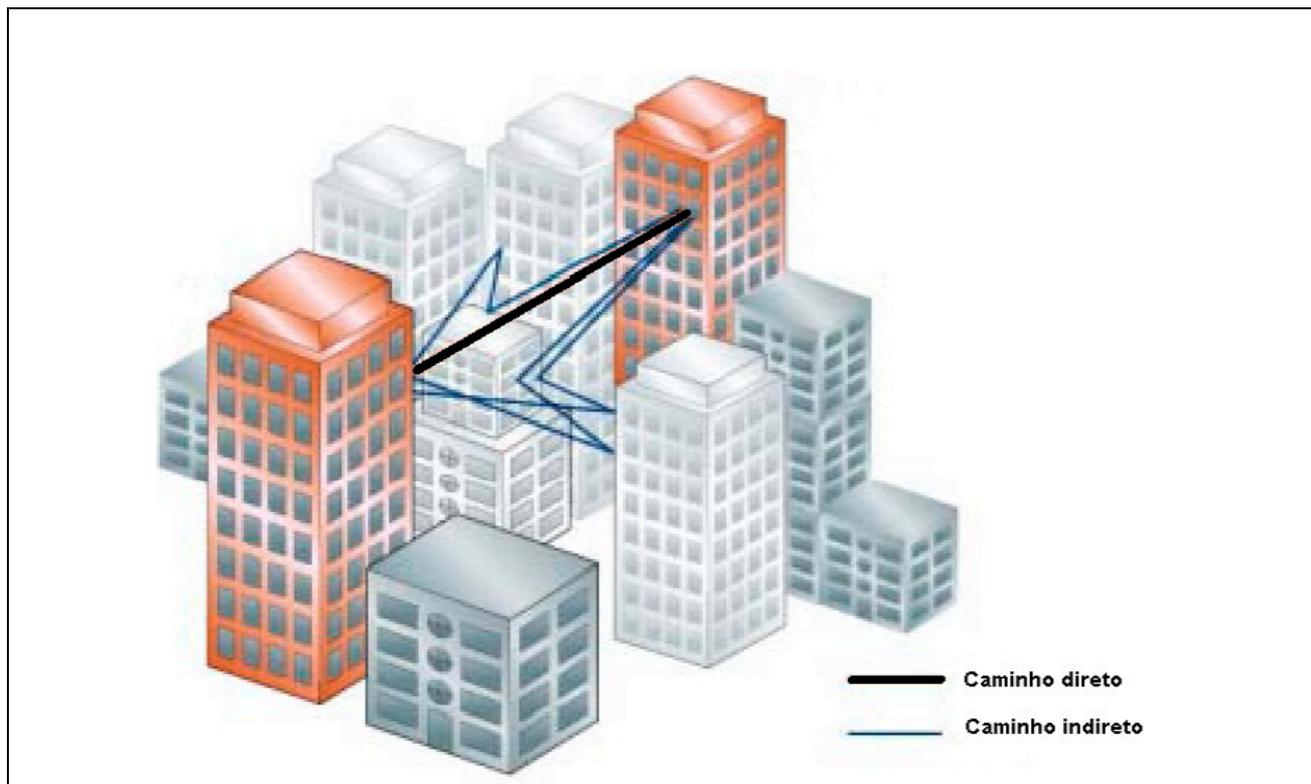


Figura 13. Propagação NLOS
Fonte: Adaptado de Swanson (2004)

4.2.3. Exame da Linha da Visada e da Zona de Fresnel

O processo de tentar estabelecer uma linha de visada desobstruída da posição do assinante à estação base é bem direto. Se for possível enxergar com os olhos ou binóculos a antena remota a partir da antena local, então existe uma linha imaginária entre duas antenas, podendo-se então supor que as condições prévias de visada direta foram encontradas e o operador tem boas chances de poder estabelecer um link de rádio.

Se as obstruções cruzarem completamente essa linha imaginária, então obviamente há uma falta linha de visada desobstruída. Se as obstruções cruzarem essa linha sem completamente chocarem-se em cima dela, então uma deve prosseguir à fase seguinte: o cálculo do que é conhecido como zona *Fresnel*. Segundo Sweeney (2004, p. 103), zona *Fresnel* consiste em uma série infinita de anéis concêntricos que cercam o ponto nodal da transmissão, com cada anel definido pelo relacionamento da fase entre o feixe principal do transmissor e os dois lóbulos laterais dominantes. Dito de uma outra forma, a propagação das microondas forma um campo elíptico envolvendo a linha de visada, sendo tal campo denominado de zona Fresnel. O campo fica mais extenso com o aumento da distância entre as antenas.

Uma ligação com linha de visada requer que a maior parte da primeira zona de Fresnel esteja livre de qualquer obstrução. Os primeiros seis décimos da primeira zona de Fresnel devem estar livres das obstruções para assegurar uma ligação de rádio de confiança. Dessa forma, no projeto de construção de redes a regra geral é que as antenas devem estar localizadas de forma a assegurar 60% da primeira zona de Fresnel livre de qualquer obstrução[32]. Se estes critérios não forem obedecidos então há uma redução significativa na força do sinal. A Figura 14 apresenta os limites para a zona Fresnel.

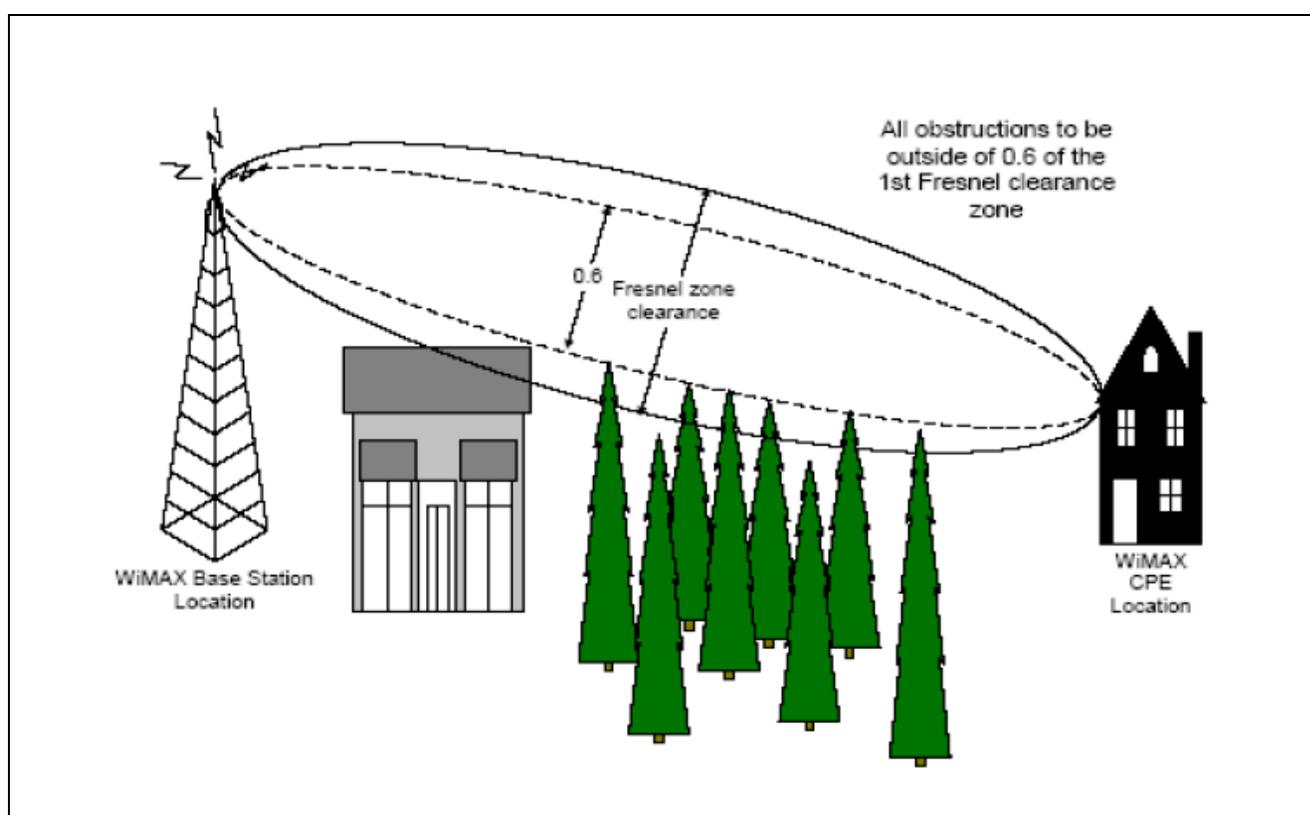


Figura 14. Zona Fresnel em ambiente WiMax
Fonte: Adaptado de Swanson (2004)

Deve-se salientar que nem todas as obstruções são equivalentes e que diferenças consideráveis podem existir entre obstruções do mesmo tipo. Sweeney (2004, p. 104) exemplifica que uma única árvore pode impor em torno de 15dB a 20dB de perda do sinal dependendo do tipo e do tamanho dela. Um bosque pode elevar essa perda a 30dB. Um edifício pode representar uma perda total de 30dB enquanto um monte baixo poderia exceder 40dB. Uma situação interessante ocorre quando as árvores balançam no vento, as variações momentâneas na perda podem exceder 10dB [3].

As distâncias envolvidas nas zonas Fresnel dependem da frequência na qual o sistema está operando, da distância entre as posições do transmissor e do receptor e são também uma função do modelo de radiação da antena utilizada [3] [32]. A melhor forma de determinar a zona Fresnel é consultar o fabricante dos equipamentos do terminal do assinante e da estação base para determinar a extensão da área acima e abaixo da linha de visada que deve estar livre de obstruções [3].

Se as obstruções estiverem entre a estação base e um local valioso de usuários, tal como um edifício de escritórios ou uma residência com múltiplos assinantes, uma solução pode ser simplesmente levantar a antena da estação base a uma elevação onde esteja bem acima de todas as obstruções. Entretanto, tal tática não deve ser considerada como uma solução perfeita porque uma antena que seja elevada não poderá alcançar assinantes na área próxima da antena.

4.3. DETERMINANDO A ARQUITETURA DA REDE

Um passo importante no início do projeto de rede é decidir qual a arquitetura de rede será utilizada. Como sabemos, o padrão 802.16 foi projetado para arquiteturas ponto-multiponto, mas a sua variação, o padrão 802.16a, também suporta a arquitetura *mesh*. Dessa forma, torna-se importante então saber as características dessas arquiteturas a fim de avaliar qual será a melhor escolha para o projeto de rede que se deseja implantar.

De uma forma geral, as arquiteturas básicas de rede são: ponto-a-ponto, ponto-multiponto e *mesh*, entretanto, é possível também que sejam utilizadas arquiteturas híbridas, consistindo de uma ou mais topologias.

É importante salientar que a escolha da arquitetura da rede é limitada pela banda de frequência na qual o operador de rede está transmitindo. Quando tecnicamente praticável nas frequências de ondas milimétricas, pode sair muito caro porque cada nó se transforma basicamente em uma estação base. De forma similar, conexões ponto a ponto são raramente encontradas abaixo de 3 Ghz, embora sejam certamente possíveis, visto que a largura de banda é também utilizada nas conexões ponto-multiponto e o potencial do lucro deste último é geralmente maior do que aquele associado com a venda da largura de banda total a um único cliente, como é o caso da arquitetura ponto a ponto.

4.3.1. Arquitetura Ponto-a-Ponto

Na arquitetura ponto a ponto tem-se uma conexão dedicada, que atende isoladamente a um único usuário, em consequência disso, há uma maior banda passante. Tal arquitetura, entretanto, é menos escalável visto que há pouca facilidade de adição de novos nós na rede. Esta é a arquitetura mais usada nas regiões superiores a da microonda. A Figura 15 exemplifica uma arquitetura de rede ponto a ponto.

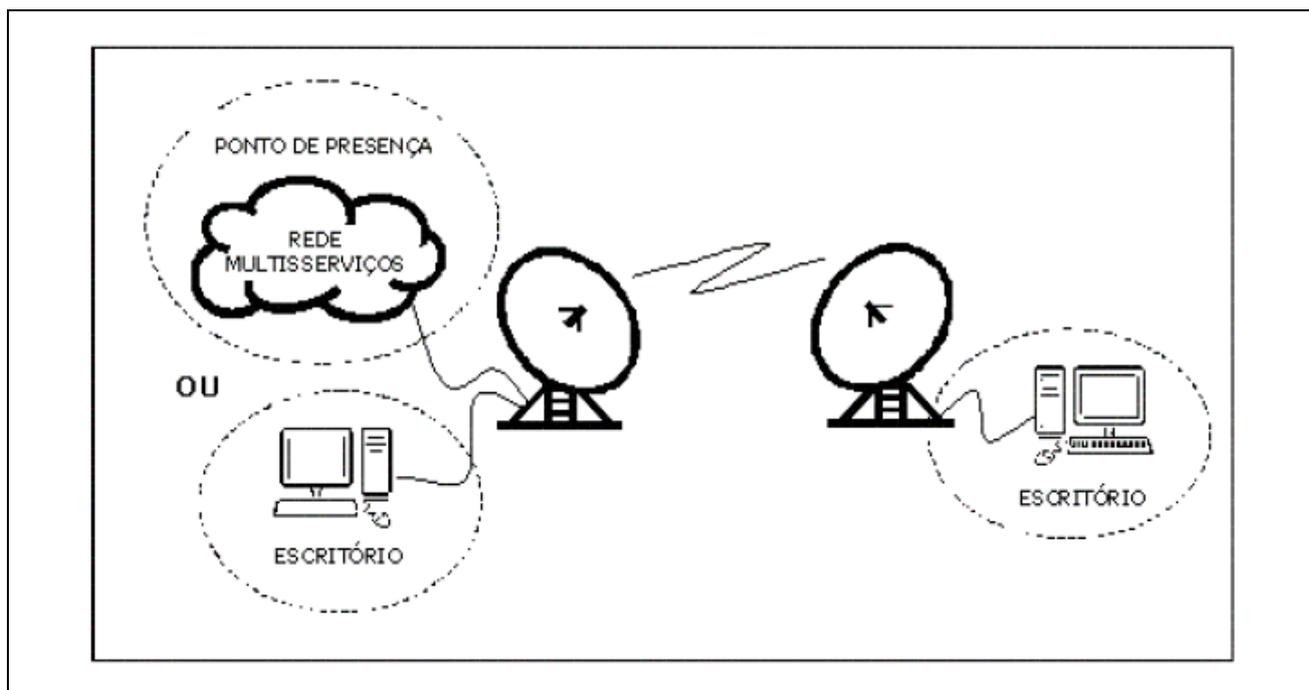


Figura 15. Arquitetura ponto a ponto

4.3.2. Arquitetura Ponto-Multiponto

Para as redes que utilizam frequências de microonda baixas, uma arquitetura ponto multiponto geralmente é a regra. A arquitetura ponto-multiponto permitirá que o operador de rede alcance um número maior de assinantes a um custo menor e limitará acentuadamente o número de roteadores e de *switches* requeridos para a rede. Nesta arquitetura é possível atender a vários usuários simultaneamente a partir de um único ponto que é estrategicamente posicionado para cobrir uma área de interesse de atendimento. A arquitetura ponto-multiponto oferece a vantagem de menor custo e facilidade de adição de nós, mas com menor banda passante que a solução ponto a ponto. A Figura 16 exemplifica uma arquitetura de rede ponto-multiponto.

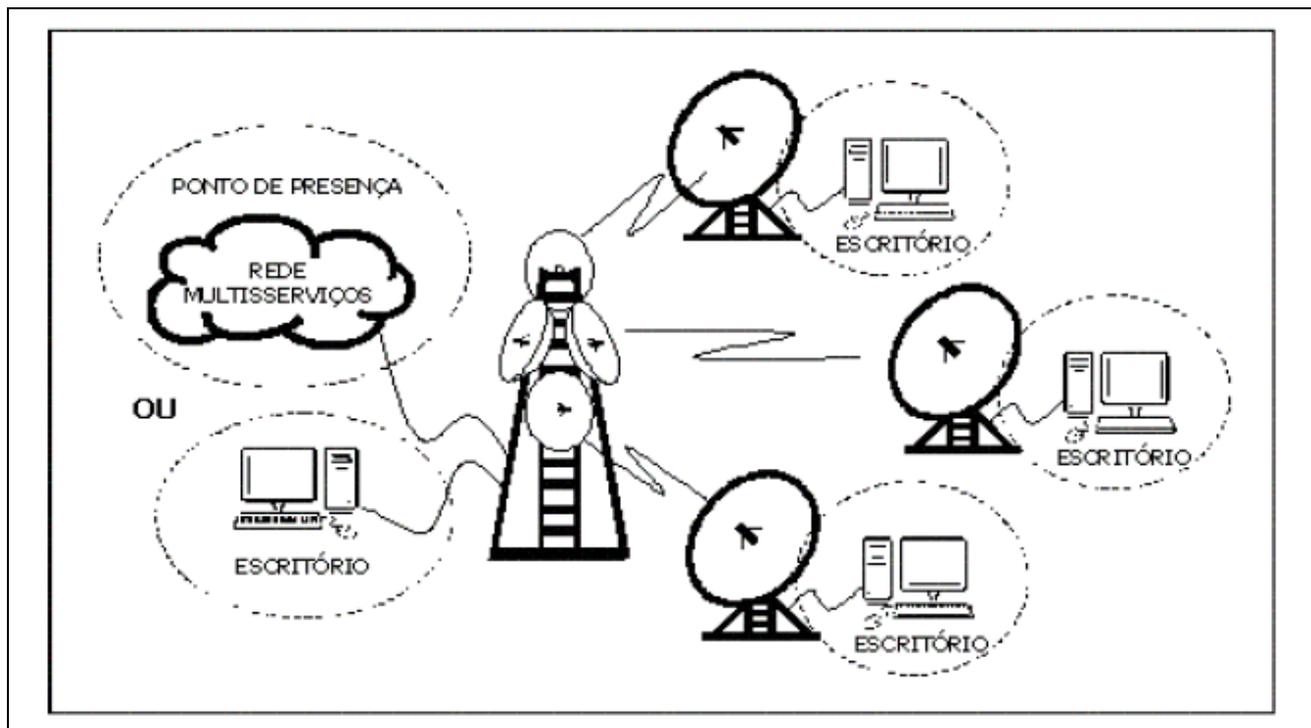


Figura 16. Arquitetura ponto-multiponto

As distribuições ponto-multiponto também têm sido freqüentemente defendidas para freqüências de onda milimétricas, mas pouco se tem realmente construído. Como esclarece Sweeney (2004, p. 92), o problema encontra-se na topografia da maioria das grandes cidades. Na maioria dessas cidades seria difícil alcançar todos os clientes potenciais dentro do raio de cobertura de uma determinada estação base por causa de bloqueios no percurso. E ao mesmo tempo, devido o custo elevado das estações bases, que custam entre US\$ 5K e US\$ 60K, os operadores seriam provavelmente incapazes de povoar o mercado com mais do que duas ou três instalações. Por causa das experiências infelizes dos operadores de rede muitas operadores têm concluído hoje que as arquiteturas ponto-multiponto são raramente aconselháveis para redes de ondas milimétricas [3].

4.3.3. Arquitetura *Mesh*

A diferença principal entre a arquitetura ponto-multiponto e a *mesh* é que na arquitetura ponto-multiponto o tráfego ocorre somente entre a estação base e os assinantes, e vice-versa, enquanto que na *mesh* o tráfego pode ser roteado através de outros assinantes e pode também ocorrer diretamente entre os assinantes.

Dentro de uma rede *mesh*, um sistema que tenha uma conexão direta para serviços de *backhaul* (concentração de tráfego em pontos das redes sem fio) fora da rede, é denominado de

estação base *mesh*. Todos os sistemas restantes da rede *mesh* são denominados de assinantes *mesh*. Dentro do contexto *mesh*, o *uplink* e o *downlink* são definidos como o tráfego no sentido da estação base *mesh* e o tráfego vindo da estação base *mesh*, respectivamente [11]. Na arquitetura *mesh* cada estação do assinante funciona como uma estação ou um "nó" repetidor que permitem que o tráfego seja distribuído em torno de uma rede interconectada. Essa capacidade de comunicação por múltiplos nós cria uma rede *mesh* com rotas alternativas para evitar os pontos de congestionamento e os obstáculos de linha de visada, aprimorando ao mesmo tempo o desempenho à medida que mais clientes entram na rede.

As redes *mesh* limitam a necessidade de *backhaul* proporcionando ao mesmo tempo benefícios adicionais como roteamento dinâmico otimizado e balanço de carga automático. A arquitetura *mesh* oferece redundância e maior confiabilidade, associada com a facilidade de adição de novos nós à rede, porém requer distâncias menores entre os nós. A arquitetura *mesh* é dentre as arquiteturas a mais cara a construir porque cada nó requer um roteador. Entretanto, conforme já foi dito uma arquitetura *mesh* diminui a necessidade por *backhaul*, que, em muitos casos, é o maior custo no ajuste de uma rede sem fio de banda larga.

O argumento a favor da arquitetura *mesh* é que as estações base individuais em uma arquitetura ponto-multiponto não poderiam alcançar todos os clientes potenciais por causa das limitações de linha de visada, o que não aconteceria em uma rede *mesh*. Entretanto, com o surgimento de equipamentos que suportam a falta de visada direta este argumento já não é tão decisivo.

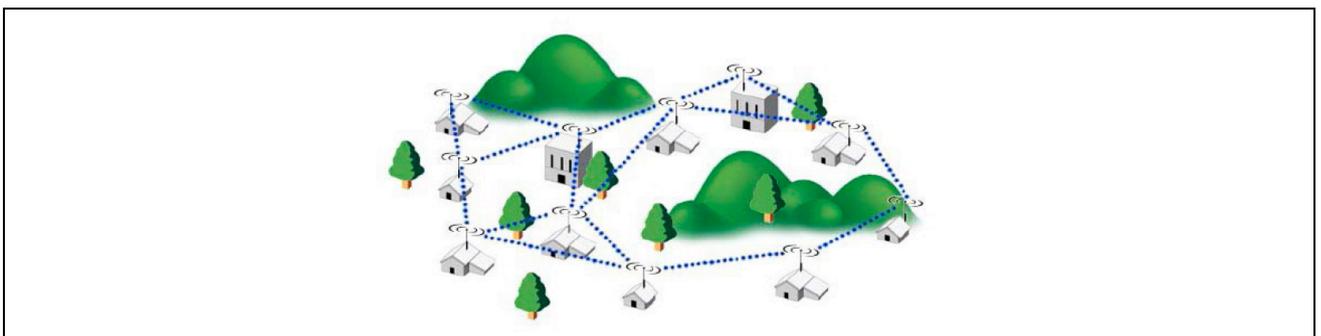


Figura 17. Arquitetura *mesh*

4.4. CARACTERÍSTICAS DE INSTALAÇÃO DO SISTEMA

O padrão IEEE 802.16, da forma como foi inicialmente projetado, define um sistema ponto-multiponto (PMP), tal sistema é basicamente composto de duas antenas, uma para o usuário e outra para a estação base. A localização das antenas depende de qual cobertura está sendo utilizada, a LOS (*Line of Sight*) ou a NLOS (*Non Line of Sight*). Com a cobertura LOS é necessário que a antena do usuário esteja instalada no topo do telhado para permitir a visada direta para a antena da estação base. Já a cobertura NLOS permite reduzir os custos com a instalação da antena uma vez que não requer visada direta e, portanto, não necessita de uma grande estrutura para a instalação da antena do usuário. Além disso, a tecnologia NLOS permite também a utilização de equipamento interno para o usuário final, no qual a antena fica localizada no interior das residências e das empresas.

A distância máxima entre as antenas é variável, no caso de um sistema operando com uma cobertura LOS, quanto mais alta estiver instalada a antena, maior será a distância permitida entre elas. A Figura 18 apresenta um exemplo de instalação de duas antenas, uma operando em um ambiente LOS e outra em um ambiente NLOS.



Figura 18. Localização das antenas em ambiente LOS e em NLOS

Os equipamentos de um sistema de rede sem fio metropolitana compreendem estações base, estações terminais, conhecidas também como CPE (*Customer Premises Equipment*), e, em alguns casos, repetidores. A Figura 19 apresenta um sistema básico de rede 802.16 ponto-multiponto, composto de dois assinantes e uma estação base.

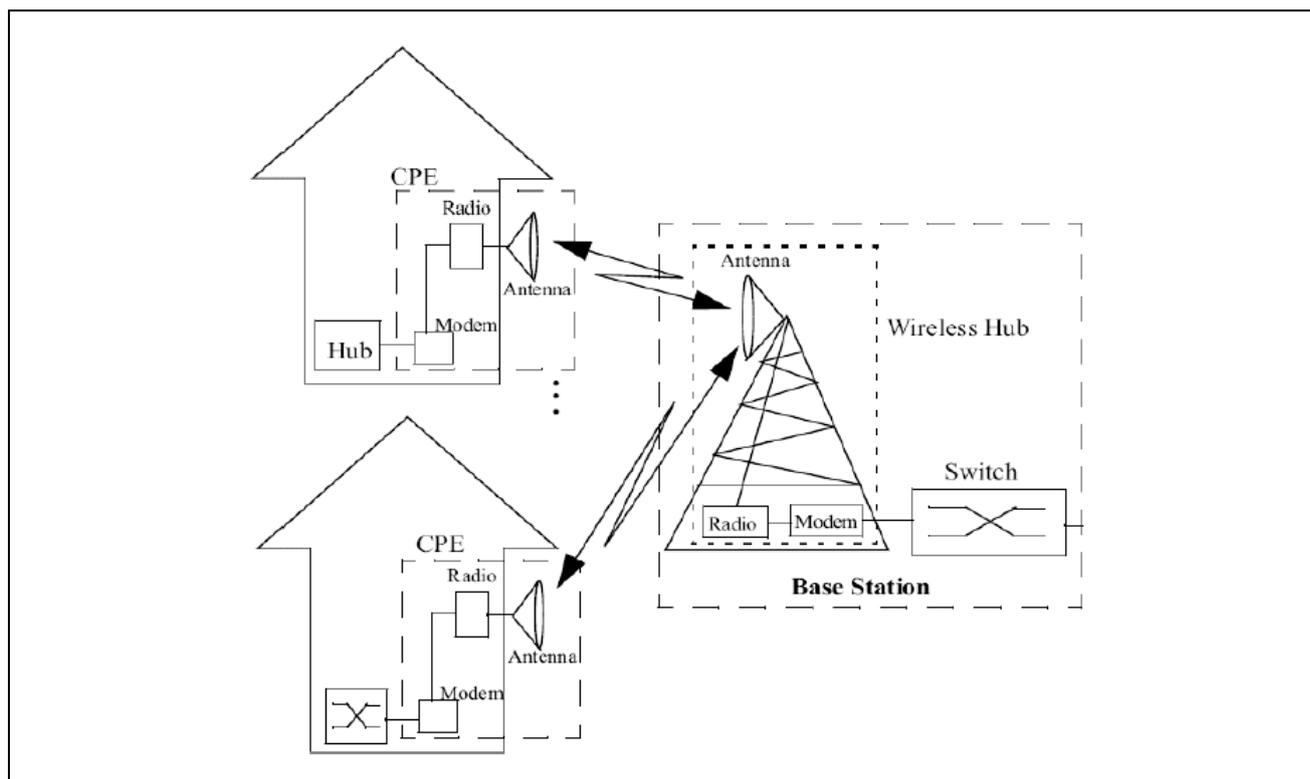


Figura 19. Instalação básica do sistema IEEE 802.16

A estação base é o local central que coleta todos os dados de e para as estações terminais dentro de uma célula. As estações base possuem antenas com feixes relativamente largos, divididos em um ou vários setores a fim de fornecer uma cobertura de 360 graus. A escolha do esquema de setores depende do espectro disponível e da densidade de assinantes. Para conseguir a cobertura completa de uma área, mais de uma estação base pode ser requerida. Os equipamentos da estação base incluem uma parte interna e uma externa, conectadas por meio de cabos. A parte externa do equipamento inclui uma unidade de rádio e a antena. A parte interna inclui equipamentos para agregar e fazer *backhaul* do tráfego do usuário. As estações base são conectadas ao escritório central ou ao ponto de presença (PoP) usando soluções cabeadas ou soluções sem fio.

Uma unidade de assinante ou CPE consiste basicamente de uma unidade externa com um rádio e uma antena conectados a uma unidade interna, basicamente um modem, que faz a interface

com o usuário final. As estações terminais usam antenas direcionais, cobrindo uma estação base e compartilhando do uso do canal de rádio. Um CPE pode suportar um, oito, ou mesmo vários usuários finais dependendo do modelo. Ou seja, único equipamento pode ser dividido entre todos os assinantes no prédio ou entre todos os usuários de uma rede local, reduzindo o custo com equipamento e manutenção. A Figura 20 mostra alguns tipos de CPE possíveis.

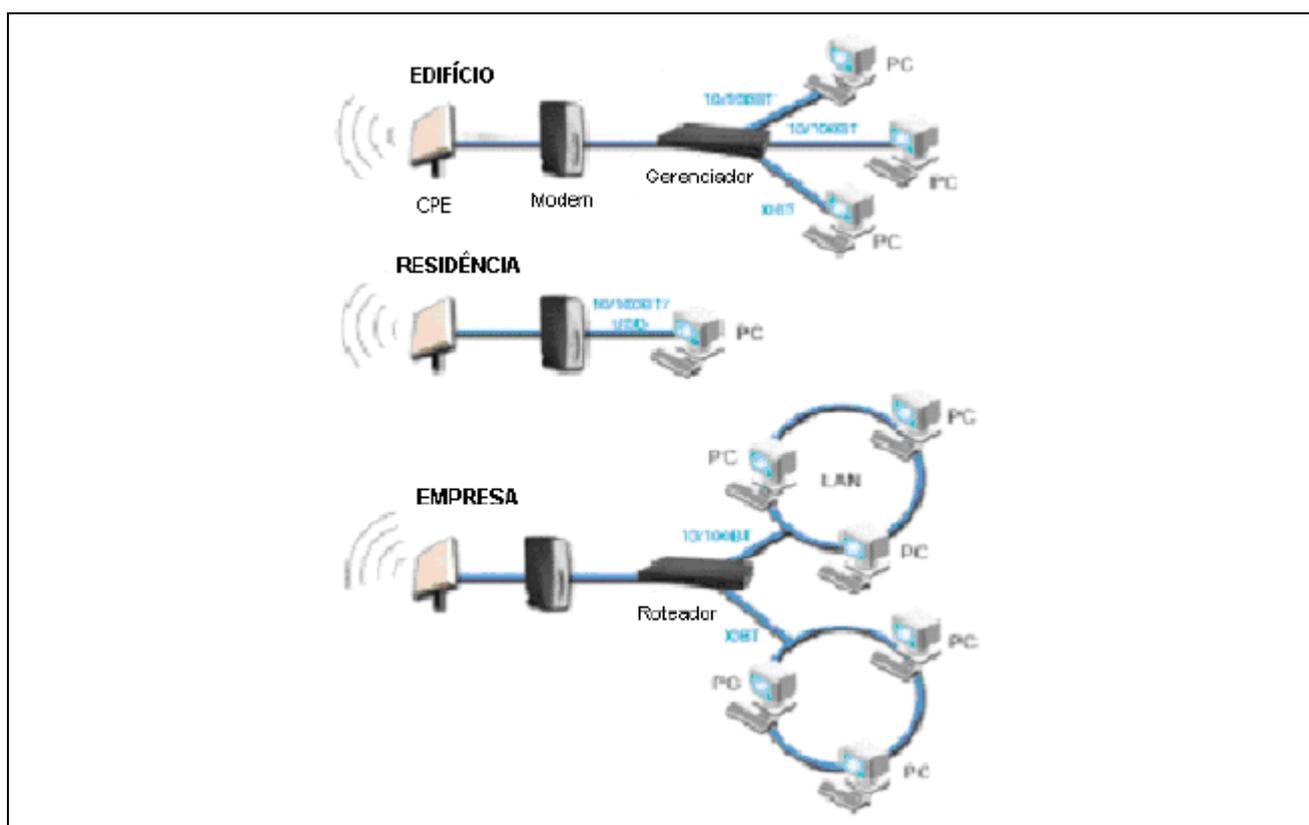


Figura 20. Tipos de equipamentos de CPE

Conforme observado na Figura 20, o primeiro CPE serve a todos os usuários de um prédio. Além do modem, é necessário neste caso o uso de um gerenciador para distribuir o sinal entre todos os computadores do edifício. O segundo CPE apresentado serve somente a um único usuário residencial, neste caso é necessário apenas que o modem esteja ligado ao computador do usuário. O último CPE é compartilhado por duas redes locais, neste caso é necessário a utilização de um roteador para distribuir o sinal às redes, após a passagem deste pelo modem.

4.4.1. Antenas

As antenas que operam em redes sem fio podem ser divididas em direcionais e onidirecionais. As antenas direcionais focalizam o sinal em uma direção específica, enviando a informação a uma certa zona de cobertura, a um ângulo determinado, o que faz com que essas

antenas tenham um grande alcance. Tais antenas são utilizadas para levar sinais de rede para longas distâncias, tais como edifício para edifício, e são montadas em mastros, em postes ou em telhados, para aumentar o seu alcance. As antenas direcionais podem ser setorizadas ou parabólicas. As setorizadas são projetadas para dividir a área de cobertura circular em setores, geralmente cada um com uma abertura de 120 graus, a fim de facilitar a alocação e o reuso. Já as antenas parabólicas são usadas principalmente em transmissões via satélite. As arquiteturas ponto-multiponto geralmente utilizam antenas setorizadas.

As antenas omnidirecionais enviam sinais em todas as direções, sendo assim possível estabelecer comunicação independentemente do ponto em que se está. Em contrapartida, o alcance destas antenas é menor que o das antenas direcionais. Geralmente são utilizadas em redes onde a mobilidade é requerida, como nos celulares e nas redes sem fio locais (802.11). Os sistemas mesh usam tipicamente antenas omnidirecionais, mas podem também utilizar antenas setoriais. As antenas geralmente estão configuradas de forma que quando uma antena transmite um sinal, a outra antena recebe, e vice-versa. Essa configuração usa uma antena de cada lado, e é chamada de SISO (*single-input, single-output*). Há uma outra configuração na qual as transmissões e recepções utilizam múltiplas antenas em ambos os lados da comunicação. Este método é chamado MIMO (*multiple-input, multiple-output*). Como a lógica de processamento do sinal é extremamente complexa, essas múltiplas antenas são chamadas de antenas *smart* (ou inteligentes). O princípio básico das antenas *smart* é que cada antena recebe um sinal separado e distinto. Dependendo de como cada sistema sem fio é configurado, o receptor pode usar um sinal para melhorar a qualidade de outro sinal, ou pode ainda combinar os dados de múltiplos sinais para aumentar a largura de banda [32]. As variações 802.16c e 802.16e suportam esquemas de antenas inteligentes (MIMO), o que permite maximizar o alcance e a potência da antena.

4.4.1.1. Processo de Instalação das Antenas

Montar a antena é a parte mais crítica do processo da instalação. As antenas são instaladas melhor em elevações consideráveis, no mínimo 25 ou 30 pés acima do nível da rua e preferivelmente muito mais elevado [3]. Quanto mais longa a distância que a transmissão deve alcançar, maior deve ser a elevação.

Em muitos exemplos, a instalação no topo do telhado requererá uma estrutura de suporte de aço, e esta deve ser firmemente presa a uma superfície estável de modo que a antena montada possa suportar o movimento dos ventos e toda a condição de tempo adversa concebível. Esta mesma

estrutura deve também ser aterrada corretamente para resistir aos efeitos de relâmpagos. É importante ressaltar que esses cuidados devem ser seguidos, pois a instalação aleatória de antenas comprometerá consideravelmente a confiabilidade da rede e pode expor o operador de rede a responsabilidades pesadas se o equipamento vier a se soltar ou mesmo a causar um incêndio.

Os procedimentos de cabeamento apropriados são igualmente tão importantes quanto o exame que posiciona e que fixa a antena do rádio e da estação base. Conexões pobres podem impor perdas inaceitáveis no sinal e conduzir ao rompimento do completo do serviço [3]. O usuário pode adquirir e instalar suas antenas ou contratar esse serviço de concessionárias que disponibilizam as antenas e repetidores ao longo do caminho, se necessário, cobrando um valor mensal pela prestação do serviço. Deve ser atentado também para o fato de que a operação de algumas frequências exige autorização do governo.

4.4.2. Análise da Disposição dos Componentes da Rede

Um dos problemas mais importantes no processo de planejamento de uma rede é a definição da disposição dos nós da rede que irão servir aos assinantes. Quanto mais cedo se definir essa disposição, maiores serão as possibilidades de sucesso na implementação da rede. Essa disposição depende da frequência em que a rede está operando, dos tipos de clientes procurados, e da capacidade do equipamento.

Uma rede operando com equipamentos que necessitem de visada direta (LOS) necessitará que a estação base esteja localizada em uma estrutura suficientemente alta de forma a permitir que as estações assinantes enxerguem a antena da estação base. Ou seja, em um ambiente LOS será necessário definir com maior precisão os telhados ou torres em que serão instaladas as antenas tanto dos usuários quanto da estação base. Já um sistema usando um equipamento sem linha de visada (NLOS) não tem preocupações com a altura das antenas, facilitando o projeto da rede. Tanto a operação em ambiente LOS quanto a operação em ambiente NLOS devem observar o raio máximo da célula da estação base de forma que sejam alcançados todos os possíveis usuários pretendidos pelo projeto de rede. Uma rede operando com equipamentos NLOS terá um raio menor que uma rede operando com equipamentos LOS, no entanto, cada estação base poderá alcançar mais clientes potenciais localizados dentro do seu efetivo raio operando com equipamentos NLOS. O raio da célula da estação base irá variar dependendo também do fabricante, mas de forma geral o raio máximo para uma célula LOS fica em torno de 50 km e o raio máximo para uma célula NLOS fica

em torno de 10 km. A Figura 21 apresenta um exemplo do raio de operação em LOS e em NLOS de dois diferentes tipos de estação base.

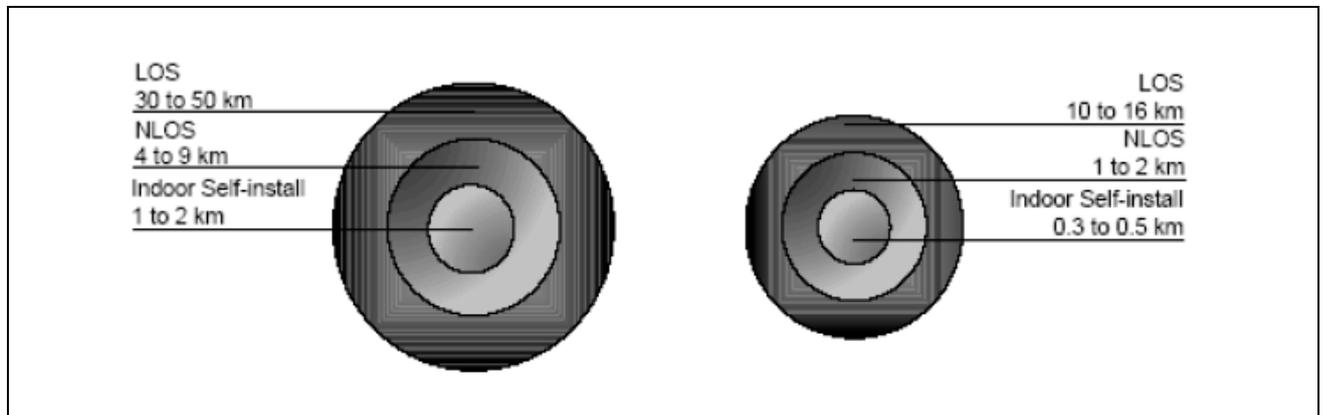


Figura 21. Raio de operação de duas estações base

A primeira providência no projeto de redes 802.16 é estabelecer o local para a estação base inicial e para a Central que irá operar toda a rede. A regra básica na decisão do local onde será instalada a estação base é que este seja adequado as especificações em termos de distribuição do sinal quanto em termos de aquisição de clientes, uma vez que tal decisão terá inevitavelmente um impacto sobre a capacidade de crescimento da rede. No caso de uma rede operando em um ambiente NLOS a escolha do local é relativamente simples e está relacionada basicamente com a distância dela aos usuários finais, ou seja, a estação base deve estar localizada de forma que a sua célula alcance todos os usuários pretendidos pelo projeto, além de possibilitar a rápida inclusão de outros possíveis usuários.

No caso de uma rede operando em um ambiente LOS, o problema principal não se resume à distância da estação base aos usuários finais, uma vez que este ambiente permite atingir distâncias maiores que o ambiente NLOS. O problema principal está na altura em que ficará a antena da estação base a fim que ela possibilite uma visão desobstruída a todos os usuários da rede e, conforme o caso, às estações base subsidiárias. Nesse contexto várias alternativas são possíveis. Uma alternativa mais óbvia seria instalar a estação base em um morro ou montanha que possibilitasse uma vista panorâmica da cidade. Esta solução é geralmente a ideal em termos de minimização de obstruções, mas pode dificultar a manutenção dos equipamentos da estação base. Outra alternativa seria a instalação da estação base dentro da própria área metropolitana. Neste caso a antena da estação base poderia ser fixada nas estruturas mais altas da cidade, como torres de televisão, ou mesmo, poderia ser instalada uma torre de antena de aço no topo de uma estrutura mais baixa, mas possivelmente a regulamentação local não permitirá tal instalação.

Uma visão um pouco mais detalhada da relação entre cobertura e desempenho na tecnologia WiMAX é representada pela Figura 22. Pode-se observar que a cobertura é maior para cenários LOS e é reduzida em cerca de 2,5 km no cenário Obstructed LOS (OLOS), que incorpora uma perda de 7 dB em relação à potência recebida no cenário LOS. As curvas relativas aos terrenos A, B e C correspondem a previsões de cobertura para terrenos tipicamente rurais e suburbanos, com razoável densidade de árvores. Nesse caso, observase que a cobertura é severamente afetada, chegando a pouco mais de 4 km, no melhor caso.

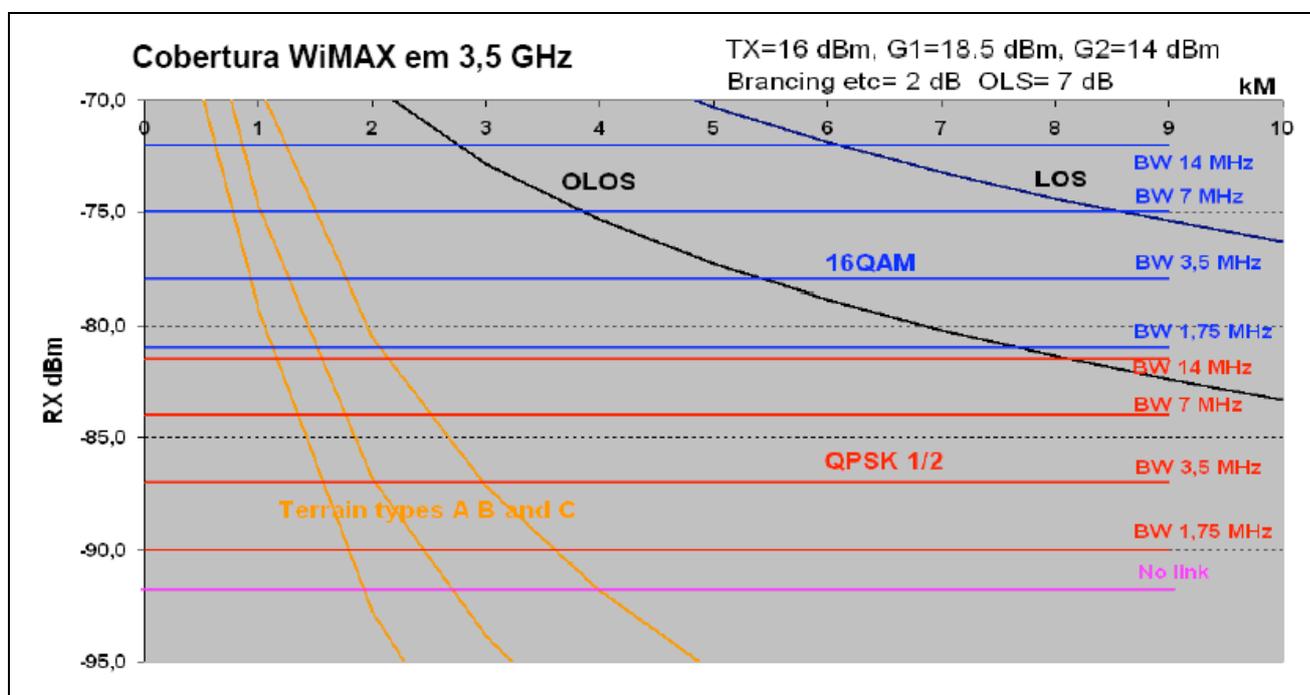


Figura 22. Previsões de cobertura e desempenho para diversas larguras de cana

4.4.3. O Uso de Repetidores

Como as microondas viajam em linha reta, às vezes as torres acabam ficando a distâncias muito grandes. Quanto mais altas são as torres, mais distantes elas precisam estar, conseqüentemente, é preciso instalar repetidores periodicamente. A distância entre os repetidores aumenta de acordo com a raiz quadrada da altura da torre. Quanto mais alta for uma torre mais longe ela poderá transmitir, para torres de 100 metros de altura, os repetidores podem estar a até 80 quilômetros de distância [2].

Um repetidor consiste em uma antena e em um *transceiver* de rádio simples, no qual usa normalmente por trás uma conexão ponto a ponto simples a uma estação base. Um repetidor não tem a potencialidade do *switch* ou do roteador, ele simplesmente estende o alcance de uma estação base

individual em um sentido dado, e é usado freqüentemente para alcançar alguns clientes isolados cujos números não justificam a criação de uma nova estação base completa.

A instalação dos repetidores somente é indicada em determinadas circunstâncias. Em regra geral, um repetidor é mais barato do que uma estação base, embora ainda se tenha que pagar pelo local e pelo rádio. Pelo fato de não ter inteligência, o repetidor não pode realmente aumentar a capacidade de uma rede de forma considerável, mas ele permite que o operador de rede estenda o limite de células em um sentido a fim abranger alguns assinantes que seriam de outra maneira inalcançáveis.

4.4.4. Estações Base Adicionais

Diversos fatores devem ser considerados na melhor localização dos pontos de acesso na rede: a natureza do equipamento (linha de visada ou sem linha de visada), o efetivo alcance do transmissor do ponto de acesso, o número de clientes potenciais dentro do alcance do transmissor, a extensão até a qual pode ser alcançado o reuso da freqüência dentro de uma área dada, e a disponibilidade de locais apropriados a um preço acessível. Nenhum desses fatores deve ser considerado de forma isolada.

Uma rede baseada em um grande número de assinantes sem linha de visada terá que dispor os mais próximos das estações base, em outras palavras, serão necessárias mais estações base. A densidade da população de assinantes e o alcance dos *transceivers* terão também influência onde as estações base estarão situadas.

A adição de estações base deve ser feita apenas quando o alcance e a capacidade das estações base existentes é insuficiente para servir o que se entende como um número razoável de clientes possíveis. Os operadores sabem quando está aproximando esta situação por causa do congestionamento crescente da rede, e fazem o ajuste necessário para encontrar um local para a nova estação base.

4.4.5. Agregação do Tráfego

Backhaul se refere à conexão de um ponto de acesso ou estação base ao equipamento da Central ou do Ponto de Presença (PoP) [3]. Em uma rede sem fio de banda larga, geralmente esta conexão ocorre sobre conexões *wireline* (com fio), embora seja possível também em *links* sem fio. O *backhaul* representa a agregação do tráfego de rede, a soma de cada transmissão de e para a

estação base e um individual nó do assinante. Por esta razão a capacidade de *backhaul* deve ser significativamente maior do que a capacidade de acesso individual ao *link* aéreo. No entanto, essa capacidade não necessita e não deve igualar ao que seria requerido se todos os assinantes em uma pilha transmitissem simultaneamente, porque tal possibilidade é altamente improvável. A capacidade de *backhaul* pode ser um décimo da capacidade agregada de todos os *links* aéreos individuais, apesar de que uma relação quatro-para-um ou seis-para-um é a mais prudente. Como exemplifica Sweeney (2004, p. 84), se para 100 clientes forem fornecidos a cada um uma conexão de 10 Mbps por segundo dentro de uma única célula, então a capacidade combinada de todos os *links* aéreos individuais é de 1 Gbps por segundo.

Um *backhaul* de 100 Mbps por segundo poderia ser suficiente nessa situação, embora 250 megabits por segundo fosse o ideal. A obtenção de conexões *backhaul* a uma taxa razoável é essencial se a rede for se operar produtivamente. Particularmente, à medida que a rede expande mais *backhaul* é requerido. Por esta razão, o operador deve previamente determinar os meios de obter o *backhaul* para determinadas localizações antes que um único elemento da rede seja colocado no lugar. Constitui um grande erro o operador primeiramente construir a rede e então calcular aproximadamente as soluções de *backhaul*.

Diversas topologias e opções de ligações de *backhaul* podem ser suportadas nas estações bases do padrão IEEE 802.16, tais como, ligação de *backhaul* em uma estrutura cabeada, ligação de *backhaul* através de conexão ponto a ponto em microonda, e ligação de *backhaul* em *WiMax*, na qual a própria estação base tem a potencialidade de *backhaul*. Isto pode ser conseguido reservando a parte da largura de banda usada normalmente para o tráfego do usuário final e usando-a para finalidades de *backhaul* [33]. Todas estas ligações são mostradas na Figura 22.

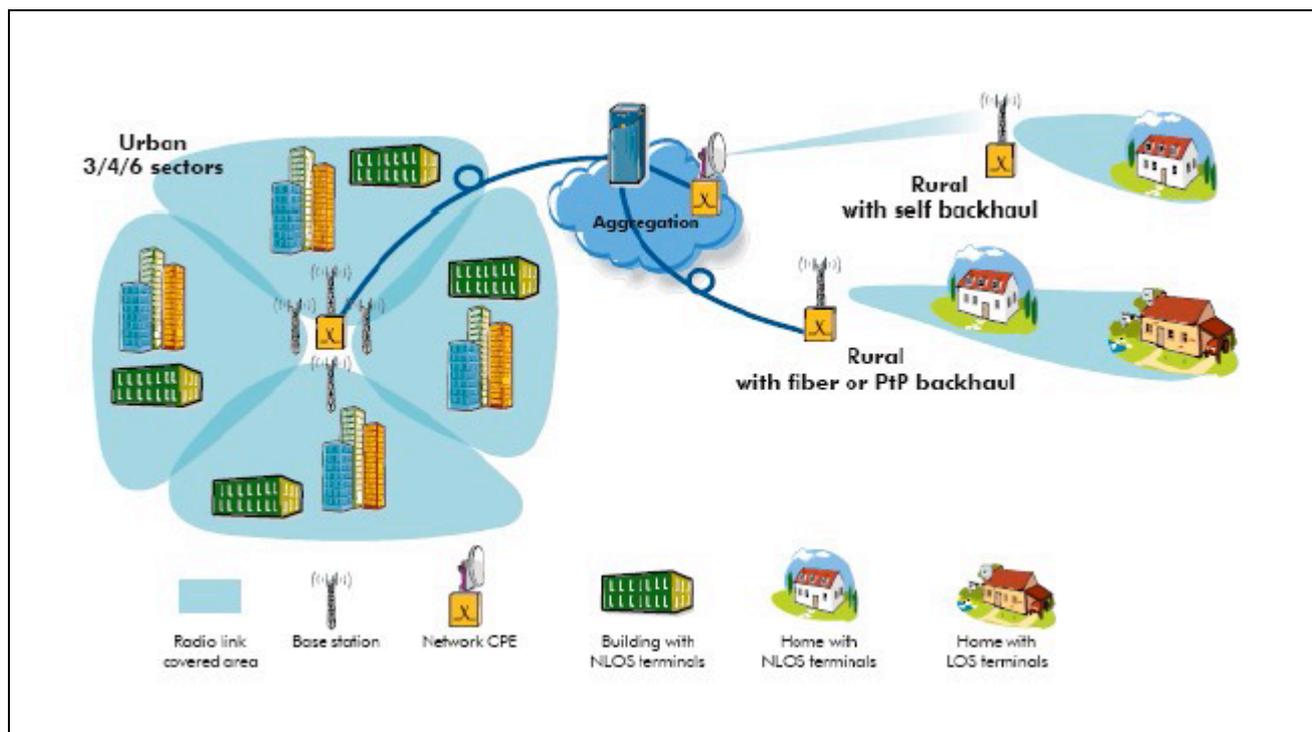


Figura 23. Arquiteturas possíveis para *backhaul*

5. IMPLEMENTAÇÃO DE UMA REDE SEM FIO

Neste capítulo será apresentado uma implementação real de uma rede sem fio utilizando rádios Pré WiMAX.

5.1. EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

Tabela 5. Equipamentos Pré WiMAX da Proxim

Modelo	Descrição	Quantidades
5054-BSUR	Tsunami MP.11 Model 5054-R Base Station Unit w/ Type-N Connector	04
5054-SUR	Tsunami MP.11 Model 5054-R Subscriber Unit w/ Integrated 23-dBi	06

Esses rádios foram usados em uma rede de segurança digital para o transporte de imagens sobre IP em uma cidade do interior de SP, por motivo de segurança não será revelado o nome da cidade e a localização dos equipamentos. Na Figura 23 o enlace marcado em azul é o que utiliza rádios Pré-WiMAX a uma distância de aproximadamente 2 Km entre a estação e a base.[39]

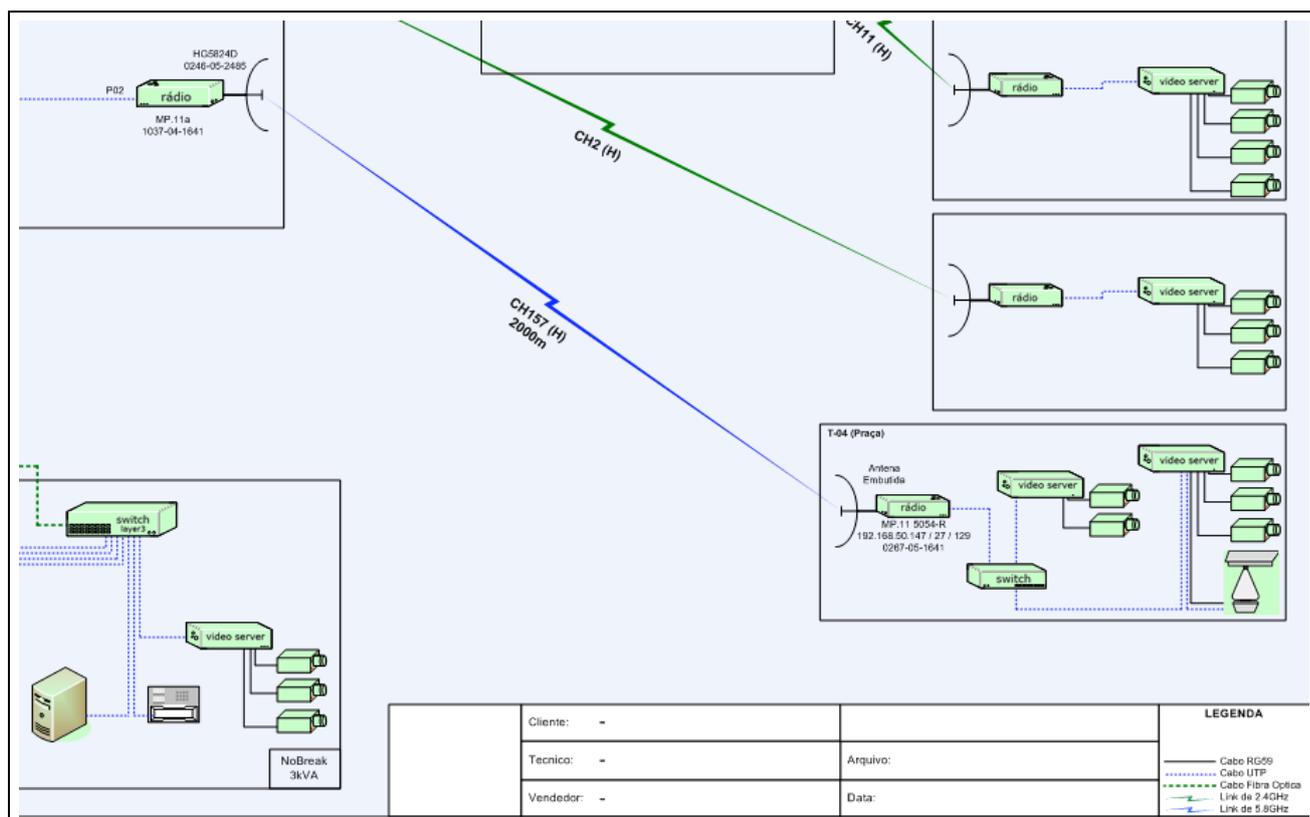


Figura 24. Parte do Projeto da Rede Sem Fio com a utilização de rádios Pré WiMAX

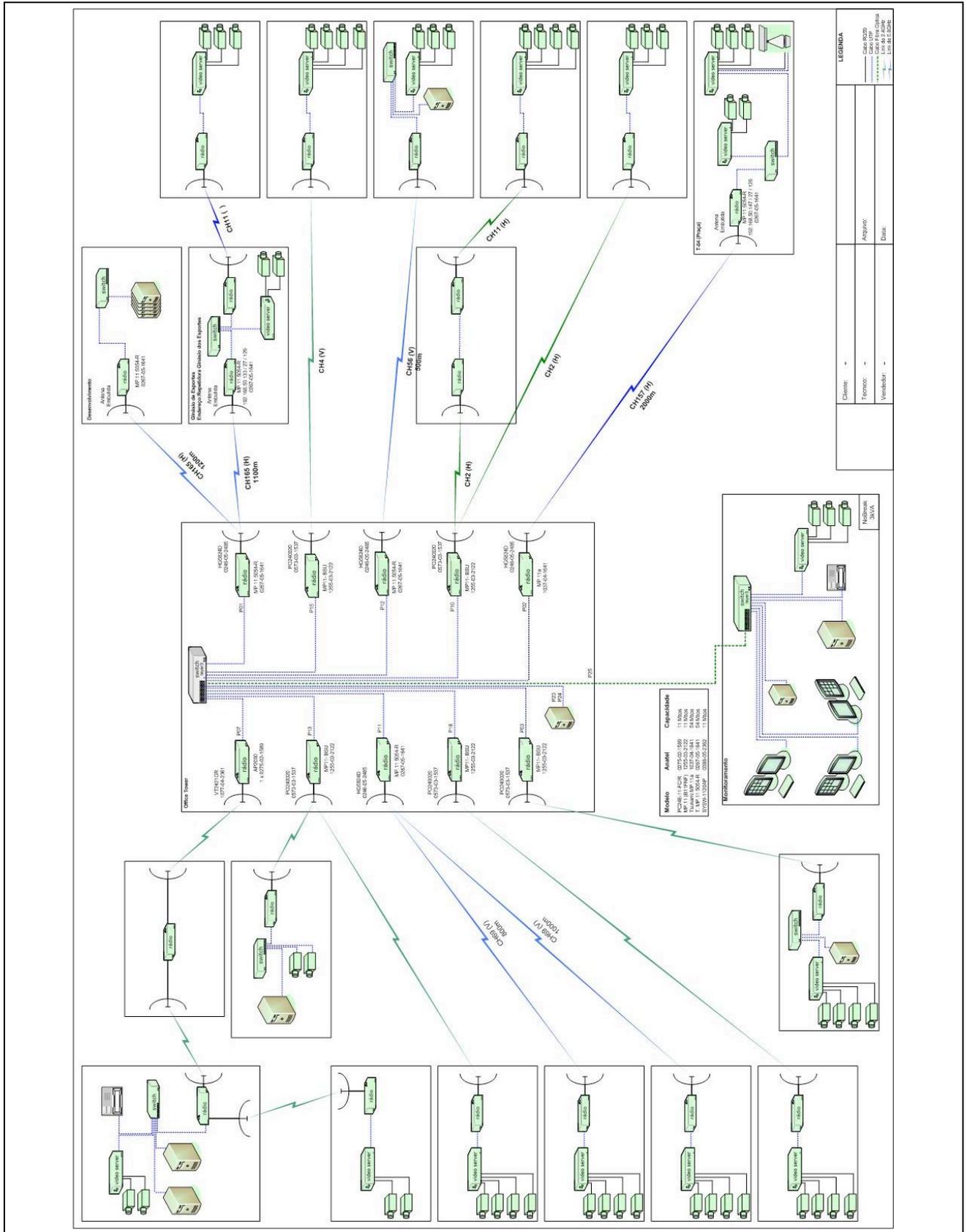


Figura 25. Projeto da Rede Sem Fio com a utilização de rádios Pré WiMAX

5.2. APLICAÇÃO

As imagens capturadas pelas câmeras de alta definição são transmitidas até o servidor de vídeo através de um cabo coaxial, no formato de vídeo composto.

O servidor de vídeo digitaliza a imagem com profundidade de cor de 8 bits, com uma taxa configurável entre 1 e 30 quadros por segundo (dependendo do objeto monitorado). A imagem já digitalizada é “empacotada” em quadros IP com possibilidade de usar como transporte o *multicast*, *unicast* ou conexão TCP (liberando em sua porta *ethernet* um *stream* de dados endereçados ao servidor de armazenamento).

Os rádios estão configurados para trabalhar como uma *bridge*, sendo totalmente transparente à aplicação. Conectado à porta *ethernet* do servidor de vídeo, está o rádio que é responsável pelo transporte da informação até a repetidora central.

Na repetidora central (quadro central da imagem) estão instaladas todas as bases em funcionamento, essas bases recebem a informação enviada pelos clientes e repassar os pacotes os *switch* L3 (Representado na Figura 23) que é responsável para pelo encaminhamento dos pacotes às central de monitoramento e seus respectivos servidores.[39]

5.3. FUNCIONAMENTO DOS RÁDIOS

Os rádios utilizados oferecem uma vazão bruta de 36 Mbps na camada física, deixando apenas uma vazão líquida entre 15 e 20 Mbps para a aplicação (como mostra a Figura 24), essa variação é causada pela distância do enlace e pela ocupação do espectro de frequência de operação.

O baixo *throughput* medido na maior parte dos rádios é devido à baixa demanda exigida pela aplicação, apesar de ser grande o número de câmeras não foi configurada alta compressão conciliada a uma baixa taxa de *frames* por segundo para cada câmera. A razão dessa instalação é a verificação da disponibilidade oferecida pelos equipamentos.

Foram fornecidos alguns gráficos, que mostram com maior exatidão o desempenho dos equipamentos utilizados na aplicação, tanto para transmissão quanto para recepção.[39]

O gráfico da Figura 26, mostra a taxa de transmissão e recepção dos equipamentos utilizados na aplicação, enquanto os gráficos das Figuras 26 e 27 mostram o tempo médio de resposta tanto para a transmissão, quanto para a recepção.

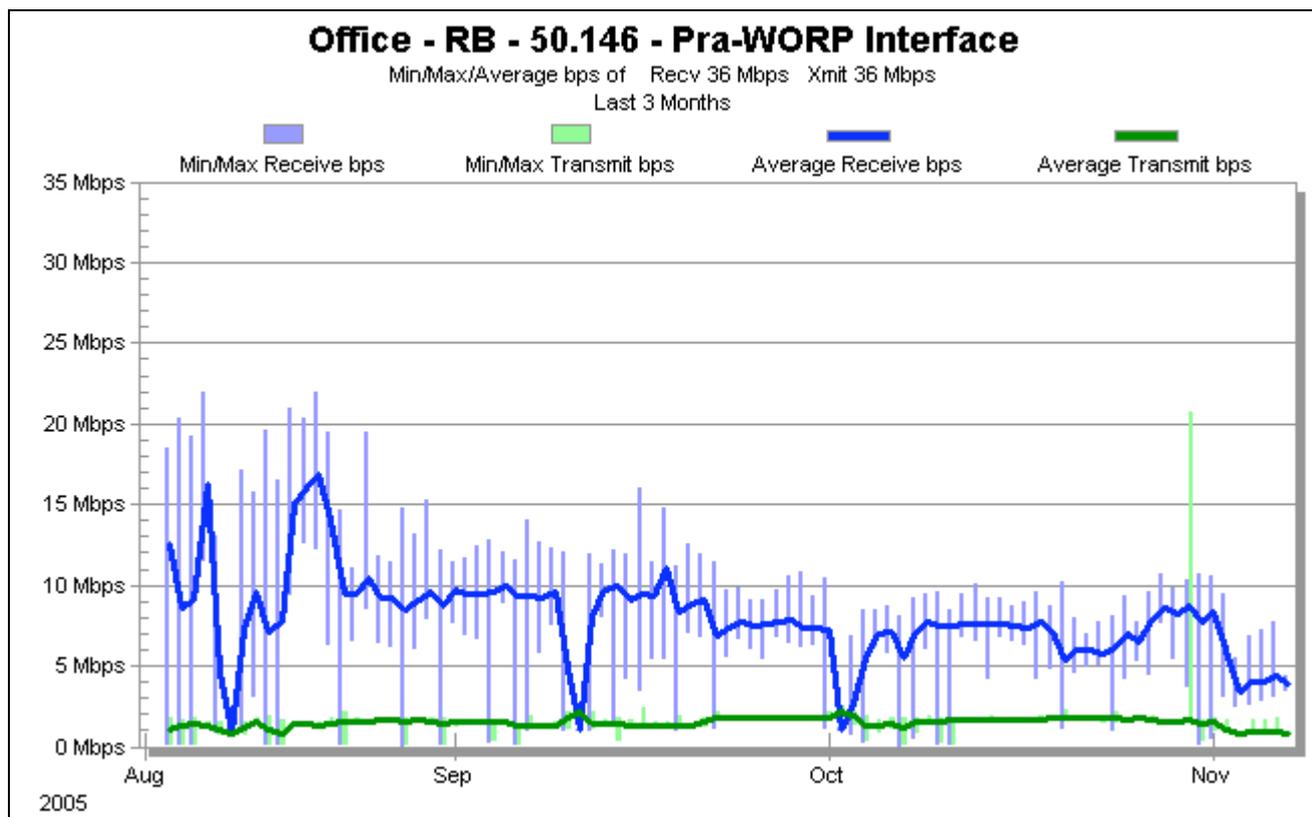


Figura 26. Gráfico da Taxa de Recepção e Transmissão do Rádio Receptor dos Últimos 3 Meses

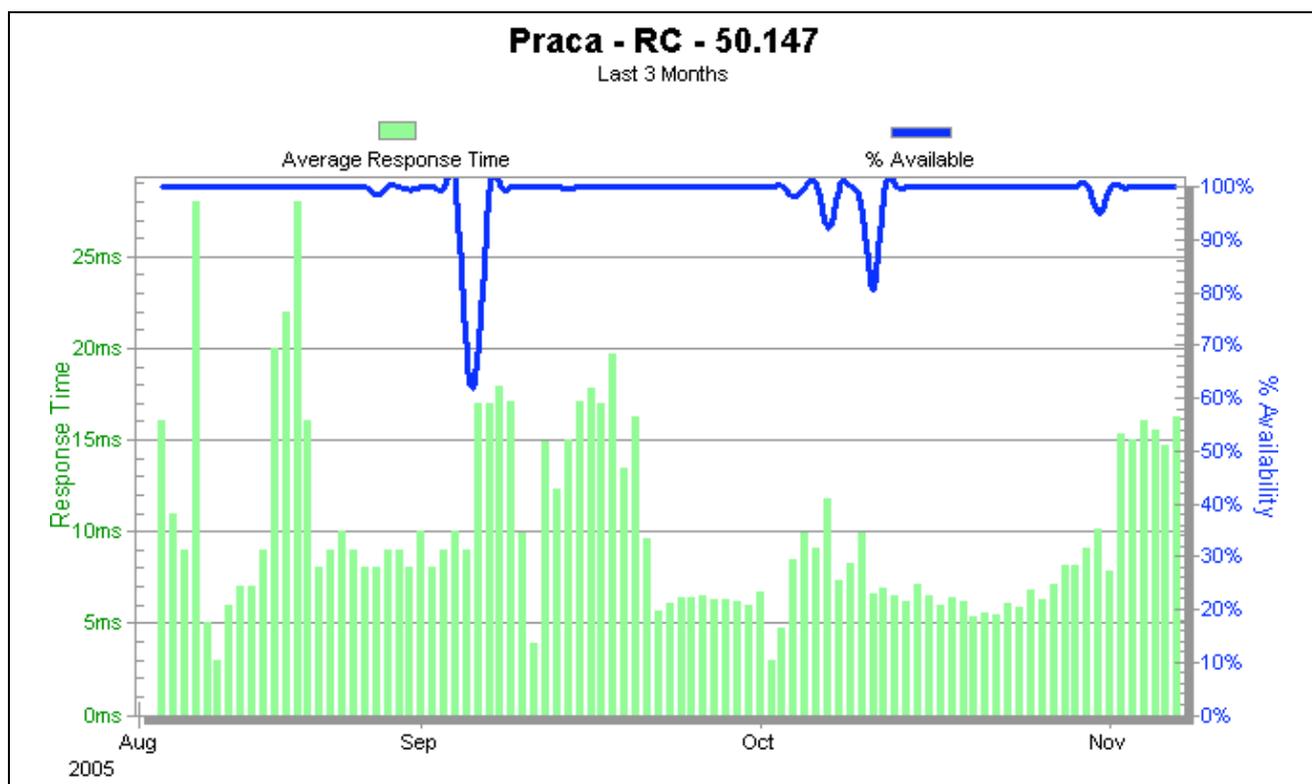


Figura 27. Gráfico do Tempo Médio de Resposta do Rádio Transmissor dos Últimos 3 Meses

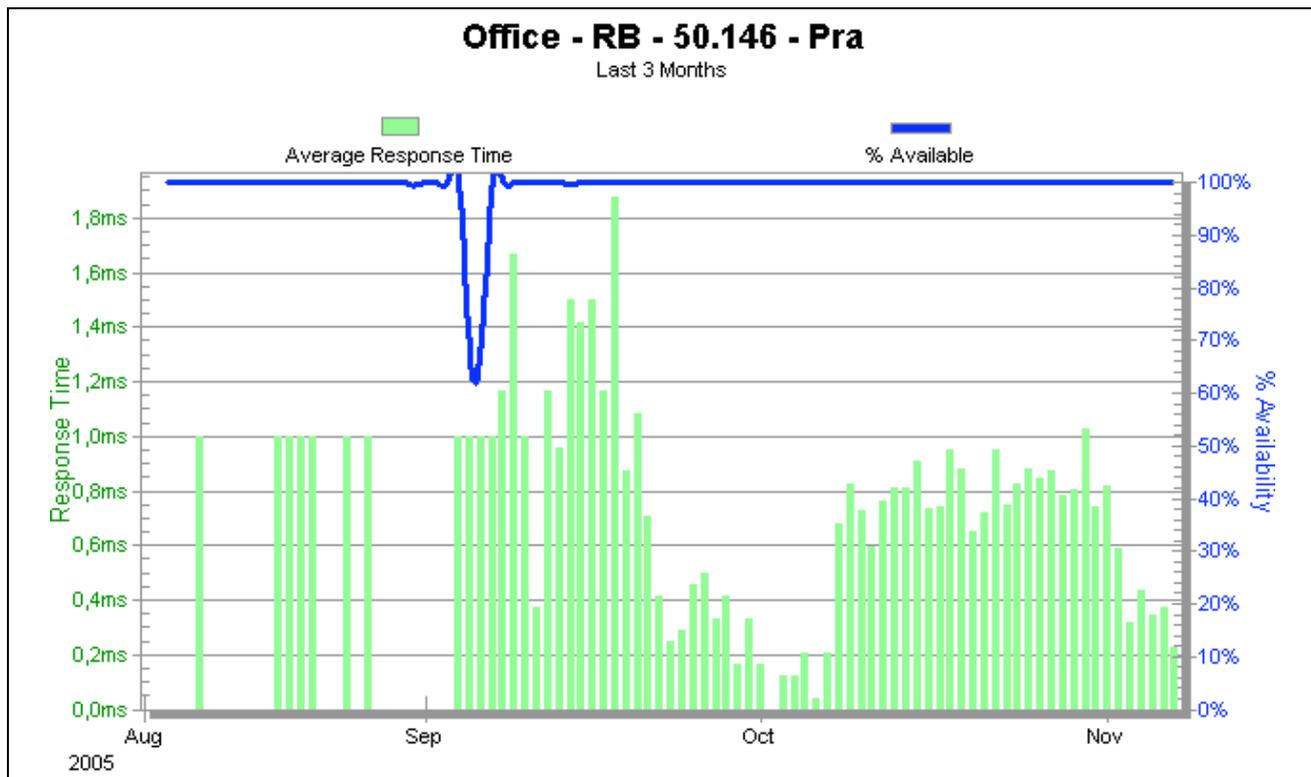


Figura 28. Gráfico do Tempo Médio de Resposta do Rádio Receptor dos Últimos 3 Meses

O gráfico da Figura 29 ilustra o total de bytes recebidos e transmitidos do rádio transmissor, enquanto o gráfico da Figura 30, registra o total de pacotes recebidos e transferidos.

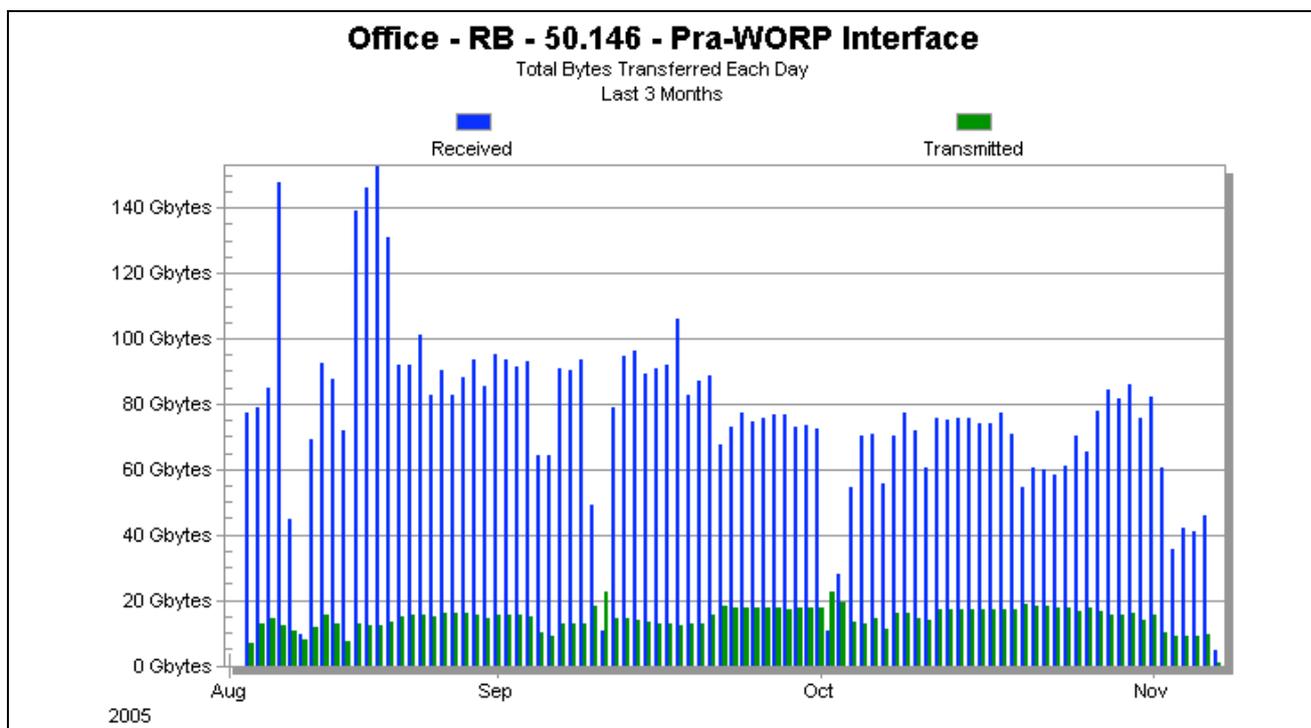


Figura 29. Gráfico do Total de Bytes Recebidos e Transmitidos do Rádio Transmissor

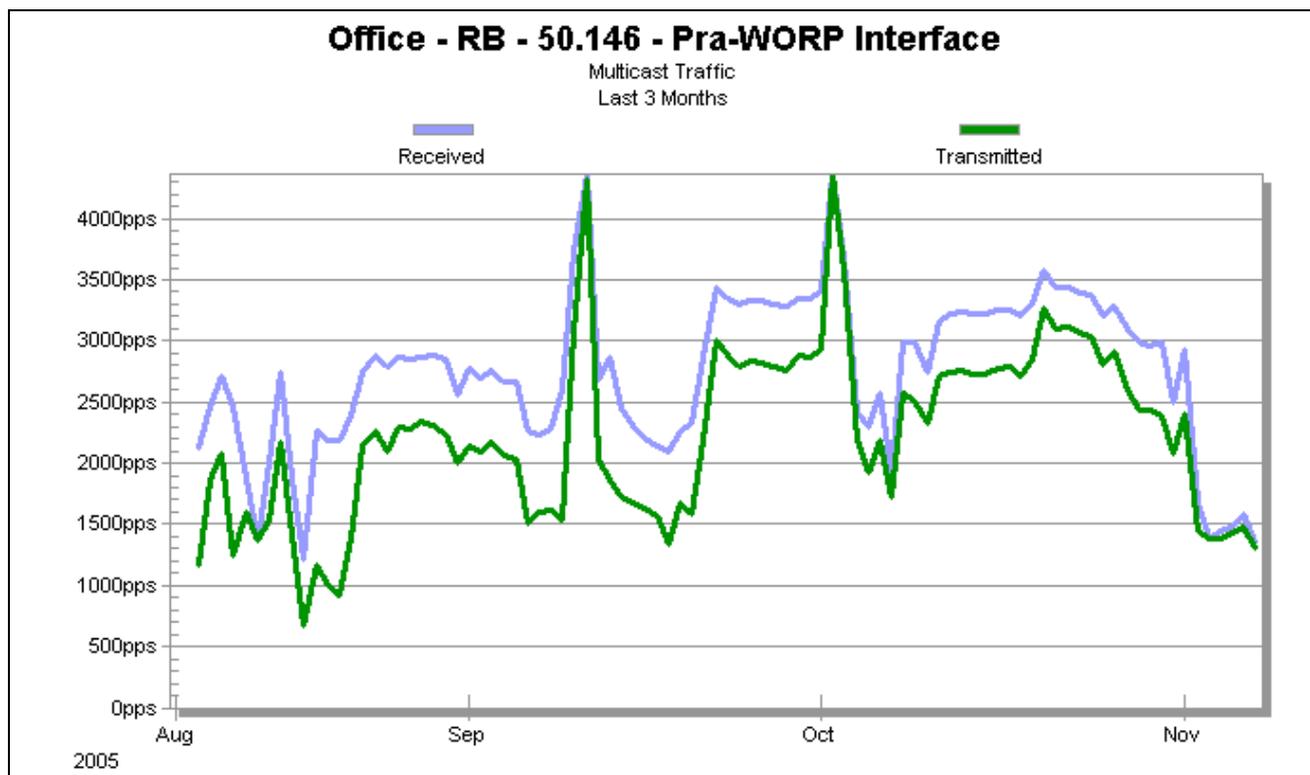


Figura 30. Gráfico do Total de Pacotes Recebidos e Transmitidos do Rádio Transmissor

No gráfico da Figura 30, podemos visualizar que o total de pacotes recebidos está muito próximo do total de pacotes transmitidos pela central, o motivo de tal proximidade se dá ao fato das câmeras instaladas na aplicação utilizarem o protocolo TCP para transporte das imagens, logo a cada pedido, temos uma resposta.

Os gráficos mostrados acima foram configurados de modo Ponto a Ponto, com linha de Visada Direta na faixa de 5,7 GHz.[39]

Esse tipo de aplicação é um exemplo, dos mais variados possíveis, meios de utilização da tecnologia WiMAX, que vem sendo usada e testada como Pré WiMAX, em todo o mundo. Muitas outras aplicações poderão utilizar o WiMAX, e é importante ressaltar que como o padrão 802.16 da IEEE foi justamente especificado para regiões metropolitanas, ele reconhece todas as dificuldades e oferece ligações robustas, viabilizando a rede mesmo em circunstâncias adversas.

5.4. CUSTOS DA IMPLANTAÇÃO

Algo importante nas redes sem fio é que não há que se falar em custo por Km, visto que esse tipo de rede não se utiliza uma infra-estrutura física para a transmissão. Os custos estão basicamente relacionados com os equipamentos da estação base e dos usuários. De uma forma geral, os custos de

implantação de uma rede WiMax estão relacionados com a aquisição do equipamento do assinante e da estação base.

Tabela 6. Custos dos equipamentos da Pré WiMAX (Proxim) [39]

	Custo médio dos equipamentos atuais
Estação Base (5054-BSUR)	U\$ 2500,00
Estação (5054-SUR)	U\$ 1200,00
Total	U\$ 3700,00

Fazendo um comparativo com fibra óptica, teríamos que utilizar 2 Km de fibra, o que representa um gasto de aproximadamente U\$10.000,00, somente com a fibra, sem contar o uso de dois equipamentos para fazer a conexão entre o cabo ethernet e a fibra, que custaria mais U\$500,00 cada, ficando num total de U\$11.000,00 a implementação total utilizando fibra óptica.

Concluindo para fazer a conexão com Pré WiMAX gastaria-se U\$ 3.700,00 contra U\$ 11.000,00 da rede cabeada utilizando fibra óptica. O custo da rede sem fio sem duvida é muito mais barata que a rede fibra óptica, neste caso de implementação não tinha-se a necessidade de uma vazão acima de 15 Mbps, o que tornou a rede eficaz, com um custo inferior a rede óptica, maso importante é sempre fazer a verificação da taxa necessária na aplicação da rede.[39]

5.5. WIMAX VERSUS FIBRA ÓPTICA

Redes sem fio oferecem muitas vantagens financeiras, de produtividade e de conveniência sobre as tradicionais redes fixas. Em contrapartida, as redes cabeadas podem oferecer serviços com velocidades superiores e com níveis mais altos de segurança de dados.

As redes sem fio apresentam problemas de segurança semelhantes aos das redes cabeadas, além dos problemas específicos decorrentes da forma de conexão sem fio. Ao contrário das redes cabeadas, onde a infra-estrutura fica dentro das corporações, as redes sem fio usam ondas de rádio como meio de transmissão, o que aumenta as chances de acessos não autorizados. Contudo, a tecnologia sem fio permite que as redes cheguem aonde cabos não podem ir.

5.5.1. Vantagens das Redes Sem Fio

A mobilidade é um dos principais atrativos de uma rede sem fio. Sistemas que utilizam esse tipo de rede podem prover aos usuários acesso à informação em qualquer lugar em suas instituições

ou fora delas, até aonde a rede oferecer cobertura. Além do mais, instalar uma rede sem fio pode ser rápido e fácil, podendo também eliminar a necessidade de atravessar cabos através de paredes, instalar cabos em postes ou cabos subterrâneos. E no caso de a infra-estrutura da organização já estiver montada, os dois tipos de rede (com e sem fio) podem coexistir sem problemas.

Dentro da área de cobertura os nós podem se comunicar sem qualquer restrição (Wireless Mesh), desde que os dispositivos sigam os mesmos padrões. Para uma rede cabeada, cabeamento adicional, plugs adequados e, provavelmente, elementos de interconexão de redes (como comutadores) precisam ser utilizados. Os cabos não só restringem a liberdade de alteração de layout, mas também a utilização de pequenos PDAs e Laptops em uma empresa moderna. Além disso, transmissores e receptores sem fio podem ser utilizados em prédios históricos sem a necessidade de se fazer qualquer modificação nas estruturas físicas destes prédios. As ondas de rádio atravessam certos tipos de obstáculos, de maneira que transmissores e receptores podem ser colocados em locais que os tornem invisíveis (dentro de estantes).

Certos tipos de redes sem fio podem, possivelmente, resistir a desastres como, por exemplo, terremotos. Se os dispositivos e antenas, ou seja, a infra-estrutura, sobrevivem ao desastre, os usuários continuam podendo se comunicar. Redes que requerem um cabeamento provavelmente não resistiriam a tais dificuldades e deixariam de funcionar.

Adaptadores Ethernet de alta velocidade são, em geral, 10 vezes mais baratos que adaptadores para redes sem fio. Porém, a implementação de redes sem fio reduziria significativamente os custos mensais de telecomunicações, o que proporcionaria uma rápida recuperação do capital investido nestes equipamentos.

5.5.2. O Alto Custo da Fibra Óptica

Fibra óptica possui muitas características interessantes do ponto de vista de um projeto de interconexão. Primeiro, é um meio físico puramente passivo. Isto significa que ele não pode deixar de funcionar, exceto por acidentes externos que resultam no corte da fibra. Este problema também pode afetar uma rede sem fio, porém a solução dele seria bem mais barata com o WiMax, pois uma interrupção no serviço por motivo de corte na fibra somente pode ser evitado se houver uma redundância na rede no caso de rede cabeada, enquanto que com a utilização de uma rede WiMax, com o mesmo equipamento, a redundância pode ser garantida.

Segundo, a capacidade de transmissão é praticamente ilimitada, é determinada pelos equipamentos eletrônicos colocados nas pontas do cabo óptico. A capacidade teórica de uma única fibra é de 50 Tbps (terabits por segundo: 1 Tbps = 1012 Gbps), e hoje existem equipamentos relativamente baratos da tecnologia Gigabit Ethernet, que permitem seu uso a 1 Gbps. Neste ponto, a rede WiMax poderia ser superada pela fibra óptica. Porém, a utilização desta para uso de Gigabit Ethernet só seria justificada se todos, ou a maioria dos equipamentos das redes pudessem usufruir desta tecnologia, o que encareceria ainda mais o projeto.

Terceiro, a vida útil de uma infra-estrutura de cabo óptico deverá exceder 15 anos. Futuramente, os equipamentos poderão ser substituídos por novos, de capacidade maior, reutilizando a fibra já existente. Neste aspecto, a fibra óptica leva vantagem em relação aos padrões para redes sem fio, apesar de que estes também têm evoluído muito nos últimos anos, como é o caso do 802.11g e do 802.16a do IEEE. Essas variações permitem que os dispositivos mais antigos continuem sendo compatíveis com os novos produtos para redes sem fio, desde que possuam padrões como os dos dispositivos certificados WiFi e WiMax.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho apresentou o padrão IEEE 802.16 para redes sem fio metropolitanas. O padrão 802.16 permite a transmissão de dados sem fio em banda larga com qualidade de serviço, sendo este o grande diferencial do padrão. O padrão atende as necessidades crescentes do mercado em transmissão de voz e vídeo, aliado com uma eficiência de transmissão obtida com técnicas de modulação e propriedades de transmissão adaptáveis aos diferentes tipos de tráfegos e às necessidades específicas da transmissão.

Para demonstrar toda a potencialidade do padrão foram apresentadas as características de transmissão do padrão e o funcionamento em cenários com e sem visada direta, diferentemente das outras tecnologias de banda larga em que fatores como distância, obstáculos, localização remota, entre outras, limitavam ou mesmo impediam a expansão da rede, no caso das redes WiMAX, que permitem tanto a operação em ambiente com visada direta quanto a operação em ambiente sem visada direta, a questão se resume apenas em escolher a melhor opção balanceando a necessidade de alcance de usuários mais distantes (operação em LOS) com a dificuldade de visada direta (operação em NLOS).

A grande vantagem das redes sem fio metropolitanas, quando comparado com outras tecnologias de banda larga, está na capacidade de conectar grandes áreas geográficas sem a necessidade de se investir em uma infra-estrutura de alto custo. O custo de uma rede WiMAX chega a ser, em alguns casos, um décimo do custo de uma rede óptica equivalente. Outra grande vantagem é a capacidade de prover acesso a uma grande quantidade de usuários através de uma única estação base, sem comprometer o desempenho da rede.

Comparada com a fibra óptica, a rede WiMAX tem como grande vantagem o baixo custo da solução e a facilidade de implementação física do projeto, uma vez que a instalação da rede se resume basicamente à instalação dos equipamentos do transmissor e do receptor.

O padrão 802.16 elimina antigas restrições físicas permitindo a interligação de equipamentos tanto em áreas urbanas como em áreas rurais, uma vez que não necessita de infra-estrutura de ligação, permitindo, assim, aumentar o escopo de usuários. Isto é possibilitado também pela flexibilidade do padrão que aceita frequências e topologias diferenciadas permitindo a adaptação aos diversos tipos de cenários.

Pode-se concluir com este trabalho que as contribuições do Padrão IEEE 802.16 para um projeto de rede sem fio metropolitana são:

(i) Suporte em banda larga a transmissão de dados multimídia, com qualidade de serviço;

(ii) Interligação de computadores em regiões onde os sistemas cabeados não permitem acesso, tanto pela dificuldade de implementação da infra-estrutura física de interligação quanto pelo alto custo da solução.

6.1. TRABALHOS FUTUROS

Atualmente, além da flexibilidade, a mobilidade também é fator fundamental nos projetos de rede, entretanto, essa mobilidade não é permitida nos padrões 802.16 e 802.16a da IEEE, uma vez que ambos os padrões são sistemas fixos de rede sem fio de banda larga. Unir a potencialidade das redes metropolitanas em abranger grandes áreas e em atingir altas taxas de transferência de dados, com a mobilidade comum nas redes celulares é um grande atrativo do mercado de redes.

Dessa forma, é proposto como trabalhos futuros o estudo do padrão IEEE 802.16e, destinado a atender as aplicações portáteis e móveis em redes metropolitanas. O padrão 802.16e, que permitirá mobilidade às redes sem fio metropolitanas, promete ser uma alternativa sólida às redes de telefonia de 3G que oferecem multimídia móvel com transmissão de dados de até 2 Mbps.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] DORNAN, Andy. Wireless Communication: O guia essencial da comunicação sem fio. Rio de Janeiro: Campus, 2001. 304p.
- [2] TANENBAUM, Andrew S. Computer Networks. 4. ed. New Jersey: Prentice Hall, 2002.
- [3] SWEENEY, Daniel. WiMAX Operator s Manual: Building 802.16 Wireless Networks. New York: Apress, 2004.
- [4] ALVES, Luiz. Comunicação de dados. 2. ed. São Paulo: Makron Books, 1994.
- [5] <http://www.intel.com/netcomms/bbw/302026.htm> (Acesso em 12 de setembro de 2005).
- [6] <http://grouper.ieee.org/groups/802/16> (Acesso em 13 de setembro de 2005).
- [7] <http://www.isi.edu/nsnam/ns/> (Acesso em 13 de setembro de 2005).
- [8] http://www.ieee802.org/16/docs/02/C80216-02_05.pdf (Acesso em 13 de setembro de 2005).
- [9] <http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.16-2001.pdf> (Acesso em 13 de setembro de 2005).
- [10] <http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.16.2-2004.pdf> (Acesso em 20 de setembro de 2005).
- [11] <http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.16a-2003.pdf> (Acesso em 13 de setembro de 2005).
- [12] http://www.cableaml.com/website3/wireless_internet/pdf/BWA-2003.pdf (Acesso em 09 de setembro de 2005).
- [13] <http://docenti.ing.unipi.it/ew2002/proceedings/pmp002.pdf> (Acesso em 09 de setembro de 2005).
- [14] <http://WirelessMAN.org> (Acesso em 09 de setembro de 2005).
- [15] Abras, Gustavo Eduardo; Sanches, Jayme César Guarenghi. WIRELESS LAN. 2002. Monografia. Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba.
- [16] www.ibge.gov.br
- [17] http://wirelessbrasil.org/eduardo_prado/revista_wimax/guia.html (Acesso em 11 de setembro de 2005).
- [18] http://www.wirelessbrasil.org/eduardo_prado/revista_wimax/espectro.html (Acesso em 11 de setembro de 2005).

- [19] http://www.wirelessbrasil.org/eduardo_prado/revista_wimax/casos.html (Acesso em 11 de setembro de 2005)
- [20] http://www.wirelessbrasil.org/wirelessbr/colaboradores/eduardo_prado/artigo_33.html (Acesso em 11 de setembro de 2005).
- [21] Ferline, Odair Perianêz. INTERCONEXÃO DE REDES BLUETOOTH Uma aplicação em Telemetria de Serviços de Distribuição de Energia. 2003. Dissertação (Mestrado). Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba.
- [22] www.wimaxforum.org/news/downloads/WiMAXWhitepaper.pdf (Acesso em 18 de outubro de 2005).
- [23] <http://www.arcchart.com/pr/blueprint/pdf/BluePrintWiFiREPORTI.pdf> (Acesso em 07 de outubro de 2005).
- [24] <http://www.cbcomp.univali.br/anais/pdf/2001/red008.pdf> Acesso em 09 de outubro de 2005.
- [25] www.etsi.org
- [26] http://www.intel.com/idf/india/fall03/presentations/comms_wireless/802_16_broadband_wireless.pdf (Acesso em 13 de outubro de 2005).
- [27] http://www.iec.org/events/2002/natlwireless_nov/featured/tf2_beyer.pdf (Acesso em 28 de outubro de 2005).
- [28] <http://www.sims.berkeley.edu/~mukeshd/index1.htm> (Acesso em 26 de setembro de 2005).
- [29] www.anatel.gov.br.
- [30] http://www.ufpa.br/portalufpa/imprensa/clipping.php?id_clip=366&data=20041117 (Acesso em 08 de outubro de 2005).
- [31] http://www.wimaxforum.org/news/downloads/WiMAX-The_Business_Case-Rev3.pdf (Acesso em 11 de outubro de 2005).
- [32] <http://www.wimaxforum.org/news/downloads/WiMAXNLOSgeneral-versionaug04.pdf> (Acesso em 11 de outubro de 2005).
- [33] http://www.alcatel.com/com/en/appcontent/apl/S0406-WiMAX-EN_tcm172-44791635.pdf (Acesso em 11 de outubro de 2005).
- [34] <http://www.intel.com/portugues/update/contents/wi09041.htm> (Acesso em 18 de outubro de 2005).
- [35] www.intel.com/netcomms/technologies/wimax/304471.pdf (Acesso em 18 de outubro de 2005).
- [36] <http://media.wiley.com/productdata/excerpt/58/04712328/0471232858.pdf> (Acesso em 18 de outubro de 2005).

[37] Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer Specifications, High Speed Physical Layer Specification in 5 GHz Band”, ANSI/IEEE Std 802.11a, 1997.

[38] Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer Specifications, Further Higher Data Rate Extension in the 2.4 GHz, ANSI/IEEE Std 802.11g, 1999.

[39] Belgin, David, Rede digital de vídeo, AT4 Solutions, 2005.

GLOSSÁRIO

Anatel	Órgão que controla o uso do espectro de frequências.
DAMA	Técnica de atribuição da capacidade do link, que se adapta quando necessário para responder a mudanças na demanda entre múltiplas estações.
Difração	Modificação semelhante de outras ondas, tais como ondas sonoras ou dielétricas, que ocorre quando a frente plana da onda não é conduzida a um foco ou utilizada, o que resulta na curvatura da onda ao redor do objeto na sua trajetória.
Frequência	Número de oscilações de um movimento vibratório por segundo.
OFDM	Multiplexação por Divisão em Frequências Ortogonais.
OFDMA	Acesso Múltiplo por Divisão em Frequências Ortogonais.
Repetidor	Consiste em uma antena e em um <i>transceiver</i> de rádio simples.
TDMA	Opera com divisão da banda em vários intervalos de tempo, denominados de slots, cada um dos quais corresponde a um canal de comunicação.
Zona Fresnel	É um campo elíptico que envolve a linha de visada.

