

Universidade Federal do Rio de Janeiro

Núcleo de Computação Eletrônica

Luiz Alexandre Dominguez de Oliveira

**REDE WIMAX: Um Estudo sobre
Resiliência na Topologia Mesh**

Rio de Janeiro

2007

Luiz Alexandre Dominguez de Oliveira

**REDE WIMAX: Um Estudo sobre Resiliência na
Topologia Mesh**

Monografia apresentada para obtenção do título de Especialista em Gerência de Redes de Computadores no Curso de Pós-Graduação Lato Sensu em Gerência de Redes de Computadores e Tecnologia Internet do Núcleo de Computação Eletrônica da Universidade Federal do Rio de Janeiro – NCE/UFRJ.

Orientador:

Prof. Sergio Guedes de Souza, NCE - UFRJ, Brasil

Rio de Janeiro

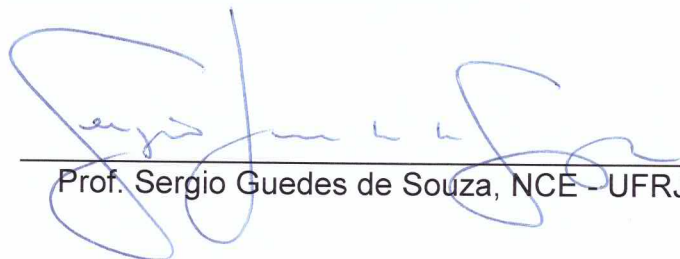
2007

Luiz Alexandre Dominguez de Oliveira

**REDE WIMAX: Um Estudo sobre Resiliência na
Topologia Mesh**

Monografia apresentada para obtenção do título de Especialista em Gerência de Redes de Computadores no Curso de Pós-Graduação Lato Sensu em Gerência de Redes de Computadores e Tecnologia Internet do Núcleo de Computação Eletrônica da Universidade Federal do Rio de Janeiro – NCE/UFRJ.

Aprovada em abril de 2007.



Prof. Sergio Guedes de Souza, NCE - UFRJ, Brasil

Dedico este trabalho a todas as pessoas que tentam, mas tentam mesmo, realizar os seus sonhos.

AGRADECIMENTOS

Não poderia deixar de agradecer, como grande reconhecimento: A minha querida mamãe, Maria Lúcia, pelo alicerce que me proporcionou; a minha querida esposa Fabiana, pela paciência e compreensão; a Escola Superior de Guerra (ESG) por proporcionar financeiramente a realização deste sonho; a Capitão-de-Fragata (T) Maria Salete Alves de Lima Mendes, chefe da Divisão de Informática da ESG, pelo apoio e principalmente confiança a mim creditada; ao meu orientador, Prof. Sergio Guedes de Souza, pela paciência, horas e inúmeros e-mails trocados de incansáveis orientações; e aos companheiros da turma MOT2005/2006, pelo que considero o ganho mais precioso do curso, a troca de experiências.

RESUMO

OLIVEIRA, Luiz Alexandre Dominguez de. **REDE WIMAX: Um Estudo sobre Resiliência na Topologia Mesh**. Monografia (Especialização em Gerência de Redes e Tecnologia Internet). Núcleo de Computação Eletrônica, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2007.

A demanda pelo acesso de forma integrada a serviços multimídia, por meio de rede sem fio que suportasse mais usuários, para que pudesse cobrir maiores distâncias e atender à necessidade de aumento da banda larga por parte do usuário, com melhoria na qualidade do serviço, segurança e mobilidade, impulsionou o surgimento de tecnologias como o *Worldwide Interoperability for Microwave Access* (WiMAX), do padrão 802.16 do *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE 802.16). Por conseguir conciliar estas características, WiMAX vem se destacando em detrimento de outras tecnologias correlatas e se tornando o principal concorrente de outras redes já difundidas, seja sem fio seja cabeada. O IEEE 802.16 suporta uma topologia denominada *mesh* (malha), em que a comunicação é efetuada através de rotas *multi-hop*, possibilitando que trajetos alternativos sejam estabelecidos em caso de falha, provendo um mecanismo resiliente. Neste contexto, este trabalho consubstancia a resiliência e o WiMAX, através de referenciais teóricos, apresentando as características presentes nesta tecnologia que possibilitam a concepção de um modelo de rede de banda larga sem fio resiliente.

ABSTRACT

OLIVEIRA, Luiz Alexandre Dominguez de. **REDE WIMAX: Um Estudo sobre Resiliência na Topologia Mesh**. Monografia (Especialização em Gerência de Redes e Tecnologia Internet). Núcleo de Computação Eletrônica, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2007.

The access demand, in an integrated way, for multimedia services through wireless network which support more subscribers, with service quality, security, and mobility, covering farther distances and fulfilling their expectations on broadband enlargement, propelled the appearing of technologies such as World Wide Interoperability for Microwave Access (WiMax) and the pattern 802.16 of Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE 802.16). For being successful in conciliating these features, WiMax has been arousing attention in relation to other technologies and turning out to be the principal competitor of other networks that have already been launched, no matter if they are wireless or cable. The IEEE 802.16 supports a topology which is denominated mesh, where communication is effected through multi-hop routs, enabling alternative courses being established in case there is failure, providing a resilient mechanism. In this context, this work establishes resilience, and WiMax, through theoretical references, presenting the characteristics which are present in that technology which enables the conception of a resilient wireless broad-band network model.

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1 – A pilha de Protocolos do Padrão	23
Figura 2 – Técnicas de Duplexação	25
Figura 3 – Sistema de Modulação Adaptativa	26
Figura 4 – Propagação de Trajetória Múltipla	30
Figura 5 – Ampliação do Feixe de Luz por Propagação Angular	32
Figura 6 – Sistema MIMO	33
Figura 7 – Pilha de Protocolos do IEEE 802.16	34
Figura 8 – Topologia Mesh	44
Figura 9 – Estrutura do Frame Mesh	46
Figura 10 – Árvore de Sincronização	47

LISTA DE TABELAS

	Página
Tabela 1 – Características para Obtenção de Resiliência	20
Tabela 2 – Largura de Banda e Taxa de Transferência por Modulação	27
Tabela 3 – Características da Camada Física do IEEE 802.16a	27

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AAS	Advanced Antenna Systems
ABP	Adaptive Burst Profiles
AP	Access Point
ATM	Asynchronous Transfer Mode
DSL	Digital Subscriber Line
BS	Base Station
BWA	Broadband Wireless Access
CDMA2000 EVDO	Evolution-Data Optimized - Evolution-Data Only
CMAC	Cipher Message Authentication Code
DAMA	Demand Assignment Multiple Access
DFS	Dynamic Frequency Selection
DHCP	Dynamic Host Configuration Protocol
DL-MAP	DownLink Map Message
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
FDD	Frequency Division Duplex
FEC	Forward Error Correction
FFT	Fast Fourier Transform
FLASH-OFDM	Fast Low-latency Access with Seamless Handoff Orthogonal Frequency Division Multiplexing
HIPERMAN	High Performance Radio Metropolitan-Area Network
HMAC	Keyed-hash Message Authentication Code
ID	Identifier
IEEE	Institute of Electrical and Electronic Engineers
IFFT	Inverse Fast Fourier Transform
IP	Internet Protocol
LAN	Local Area Network
LDPC	Low-Density Parity Check
LOS	Line Of Sight
MAC	Medium Access Control
MAN	Metropolitan Area Network
MIMO	Multiple-Input Multiple-Output
NLOS	Non Line Of Sight
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiplexing Access
PMP	Point-Multi- Point
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QoS	Quality of Service
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying
RF	Radio Frequency
RLC	Radio Link Control
SCM	Single Carrier Modulation
SCT	Space-Time Coding
SDU	protocol data unit
SISO	Simple Input, Simple Output
SNMP	Simple Network Management Protocol
S-OFDMA	Scalable Orthogonal Frequency Division Multiple Access
SS	Subscriber Station

TD-CDMA	Time-division CDMA
TDD	Time Division Duplex
TDM	Time-Division Multiplexing
TDMA	Time Division Multiple Access
TFTP	Trivial File Transfer Protocol
UL-MAP	UpLink Map Message
VLAN	Virtual Local Area Network
W-CDMA	Wideband Code Division Multiple Access
Wi-Fi	Wireless Fidelity
WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access
WLAN	Wireless Local Area Network
WMAN	Wireless Metropolitan Area Network

SUMÁRIO

	Página
1 INTRODUÇÃO	13
1.1 MOTIVAÇÃO	13
1.2 OBJETIVOS	15
1.3 RELEVÂNCIA	16
1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	16
1.5 METODOLOGIA	17
2 REFERENCIAL TEÓRICO	18
2.1 REDE SEM FIO	18
2.2 RESILIENCIA	19
2.3 O PADRÃO 802.16 E SUAS EVOLUÇÕES	21
2.4 PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DO PADRÃO IEEE 802.16	23
2.4.1 A Pilha de Protocolos	23
2.4.2 A Camada Física (PHY)	24
2.4.2.1 Freqüências de 10 A 66 Ghz	24
2.4.2.2 Freqüências Abaixo de 11 Ghz – Padrão Fixo	27
2.4.2.3 O Padrão Móvel	29
2.4.2.4 Sistema de Antenas Adaptativas	31
2.4.2.5 Sistema de Múltipla Entrada e Múltipla Saída	32
2.4.3 Camada de Controle de Acesso ao Meio (MAC)	34
2.4.3.1 Subcamada de Segurança	35
2.4.3.2 Parte Comum da Subcamada MAC - CPS	36
2.4.3.3 Subcamada de Convergência de Serviços Específicos - CS	38
2.4.4 Qualidade de Serviço	38
2.4.4.1 Conexões	39
2.4.4.2 Fluxos de Serviços (SF)	40
2.4.4.3 Escalonamento de Serviços	40
2.4.5 Mesh	43
2.4.5.1 Rede Mesh e seus Atores	45
2.4.5.2 A Estrutura do Frame	45
2.4.5.3 Estabelecimento e Manutenção da Rede	46
2.4.5.4 Escalonamento	47
2.4.5.5 Comunicação	49
3 RESILIENCIA NO WIMAX	51
3.1 INDEPENDÊNCIA DO NÓ CENTRAL	51
3.2 PROTEÇÃO ACONTRA INTERFERÊNCIA	52
3.3 ACESSO MAIS EFICIENTE	53
3.4 MODULAÇÃO ADAPTATIVA	54
3.5 SEGURANÇA	54
4 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS	55
REFERÊNCIAS	57

1 INTRODUÇÃO

Para um melhor entendimento deste trabalho, este capítulo apresenta a motivação, os objetivos, a relevância, a organização e a metodologia de uma pesquisa que visa apresentar um estudo sobre resiliência na Topologia *Mesh*, existente em redes de banda larga sem fio do tipo WiMAX.

1.1 MOTIVAÇÃO

O acesso a informações de forma instantânea tornou-se um fator fundamental para diversas organizações e cada vez mais invade as residências e o cotidiano do homem [23]. Atualmente existem inúmeras tecnologias que têm por objetivo atender às diversas demandas de um mercado cada vez mais dinâmico e exigente. 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.

Neste mundo globalizado, competitivo e estratégico, pessoas e organizações querem ter acesso às informações de forma móvel, com qualidade, rapidez, confidencialidade, integridade e disponibilidade [14]. Estes fatores possibilitaram e possibilitam o surgimento e o avanço de tecnologias sem fio que permitem maior flexibilidade que redes de computadores cabeadas, como os sabores DSL, pois estas dependem da infra-estrutura e efetivamente prendem o usuário a um local físico.

A tecnologia de redes de computadores sem fio, também conhecida como *wireless*, tem, hoje, grande aceitação na aplicação em redes de computadores [14]. Entretanto, as redes locais sem fio denominadas *Wireless Fidelity* (Wi-Fi) têm como grande restrição a sua pouca largura de banda e deficiência no suporte de

Qualidade de Serviço (QoS) a aplicações robustas como voz e vídeo, além de atingirem poucos usuários. Os atuais sistemas celulares, por sua vez, embora forneçam cobertura de grandes distâncias, são relativamente caros, menos eficientes espectralmente e oferecem baixa capacidade de banda se comparados a outros sistemas de acesso sem fio de banda larga (*Broadband Wireless Access - BWA*) [23].

A fim de prover uma tecnologia sem fio que suportasse mais usuários, cobrisse maiores distâncias, permitisse tráfego multimídia e atendesse à necessidade de aumento da demanda de banda larga por parte do usuário, com a qualidade de serviço, segurança mínima para suas aplicações e mobilidade, o IEEE propôs o padrão 802.16, conhecido como WiMAX. Com custos menores e como solução ao uso da tecnologia sem fio para a última milha ou para longos enlaces, este padrão vem se destacando e hoje é alvo de investimentos maciços de grandes organizações, tais como Alvarion, Aperto Networks, AT&T, Intel Corporation, Samsung, Sprint Nextel, entre outras [27].

Um sistema de comunicação, por mais eficiente que seja, deve possuir requisitos mínimos para que esteja sempre disponível. Caso contrário, pode não ser eficiente para o fim a que se destina e vir a destruir aplicações, provocar súbitas falências ou não suportar qualquer nível de catástrofe, seja esta de causa natural, tecnológica ou social [1]. O Tsunami ocorrido no final de 2004, no oceano Índico, onde um violento tremor sob o mar enviou ondas gigantes para as regiões costeiras do sul e sudeste da Ásia, e o atentado terrorista de 11 de setembro de 2001 nos Estados Unidos, em que aviões foram seqüestrados e lançados sobre prédios, são exemplos recentes de catástrofes. Em calamidades como estas, súbitas e brutais, sobre vários aspectos, prejuízos enormes são computados a sistemas que não

possuam mecanismos que o mantenham disponíveis em caso de uma perda considerável.

Resiliência, no sentido estrito, é uma propriedade física de materiais elásticos, pela qual a energia armazenada em um corpo deformado é restituída quando cessa a tensão causadora de uma deformação, sem apresentar indisponibilidade em qualquer momento da sua variação [9]. Subtende-se então que, para uma rede ser considerada resiliente, ela deve prover mecanismos que a torne disponível em caso de uma perda considerável. Mas como obter tal característica, com uma rede sem fio WiMAX?

Redes WiMAX possuem suporte a uma topologia em malha (*Mesh*), possibilitando que um determinado ponto da rede assuma o papel de um outro ponto que venha apresentar problemas e devolva o comando assim que o ele recupere seu estado normal de operação.

Em face dos fatos citados nos parágrafos anteriores, o estudo de uma arquitetura resiliente torna-se um fator muito interessante, desafiador e merecedor de um estudo detalhado do que o WiMAX está proporcionando e pode proporcionar, de acordo com padrão estabelecido pela norma.

1.2 OBJETIVOS

Diante do potencial existente no WiMAX, surge a seguinte pergunta: Quais recursos presentes nesta tecnologia que possibilitam a concepção de um modelo de rede de banda larga sem fio resiliente?

O principal objetivo deste trabalho é de apresentar um estudo sobre a tecnologia WiMAX, suas principais características, enfatizando seu suporte à topologia *Mesh*, buscando iniciar um alicerce para uma rede sem fio resiliente.

1.3 RELEVÂNCIA

O WiMAX está entre as principais tecnologias em que os mais renomados especialistas e as principais organizações do mundo das telecomunicações estão apostando [27].

Adotar uma determinada tecnologia, seja ela qual for, demanda um estudo do que ela pode proporcionar tanto para as aplicações já existentes quanto para as aplicações que se deseja implantar. Face ao exposto, realizar um trabalho de uma tecnologia tão promissora como o WiMAX, buscando iniciar um alicerce para uma rede sem fio resiliente, torna-se tão importante como subsídios para uma possível implantação, seja em prol de uma organização, seja em caso preventivo de catástrofes ou pesquisa acadêmica.

1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O presente trabalho está organizado em quatro capítulos. Após esta introdução, será feito um estudo sobre o conceito de redes sem fio, resiliência, as evoluções do padrão IEEE 802.16 e suas principais características, abordando sua pilha de protocolos e suas camadas física (PHY) e de controle de acesso ao meio (MAC). Ainda neste capítulo, a QoS será abordada e um destaque maior será dado à topologia *Mesh*. No terceiro capítulo serão abordados os requisitos resilientes encontrados no WiMAX. Por fim, serão apresentadas a conclusão e sugestões para trabalhos futuros.

1.5 METODOLOGIA

Por ser realizada com base em material publicado, consubstanciando o conceito de resiliência, muito utilizado em outras áreas diferentes da em questão, esta pesquisa é classificada como do tipo bibliográfica. Serão também detalhadas características deste conceito em detrimento dos recursos providos pela tecnologia WiMAX, descrevendo quais fatores estão associados à ocorrência do fenômeno, por meio de uma pesquisa descritiva.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo destina-se a apresentar um estudo sobre o conceito de resiliência e sobre a tecnologia foco deste trabalho. Inicialmente a tecnologia de rede sem fio será apresentada, discernindo suas principais formas de operação. Numa segunda etapa será abordado o conceito de resiliência, visando um bom entendimento do seu conceito. Por se tratar de uma tecnologia emergente, serão também apresentadas as evoluções que o padrão vem sofrendo. Por fim, mas extremamente importante para o entendimento do objetivo da pesquisa, serão abordadas as principais características do padrão IEEE 802.16.

2.1 REDES SEM FIO

A comunicação digital sem fio, também conhecida como *wireless*, não é novidade e várias são as tecnologias existentes. Usando o ar como meio de transmissão, tais tecnologias possibilitam desde a comunicação entre dispositivos periféricos de um computador, como teclado e mouse, até equipamentos pertencentes a uma rede local de uma organização ou interligação de matriz e filial situadas a quilômetros de distância entre si [23].

O avanço tecnológico das redes sem fio tem proporcionado soluções que garantem desempenhos similares a redes cabeadas, além de proporcionarem mobilidade, rapidez na instalação, possibilidade de implantação em locais onde é impróprio o uso de cabeamento e, dependendo do projeto, menor custo [19].

As redes de computadores sem fio podem operar de formas diferentes. Existe um tipo de rede sem fio em que há necessidade de um elemento central para coordenar toda a comunicação, ou seja, vários clientes acessam a rede através de

uma ligação sem fio direta a um elemento central, caracterizando uma rede de "hop único". Em redes WiFi, esse papel é realizado pelo ponto de acesso (*Access Point - AP*), e numa WAN sem fio, como o WiMAX, Estações Base possuem essa tarefa. Já nas redes consideradas "*multi-hop*", qualquer dispositivo serve como um roteador ou AP. Se o AP mais próximo está congestionado ou simplesmente parou de funcionar, os dados são roteados ao nó de menor tráfego mais próximo, pulando de um nó ao outro, até alcançar seu destino final.

O conceito "*multi-hop*" fez surgir a rede em malha, ou *mesh*. A rede de hop único é estreitamente dependente do elemento central, que, se desativado, a rede deixa de funcionar. Na arquitetura da rede *mesh*, se o nó mais próximo for desativado ou se houver interferência localizada, a rede continua a funcionar, pois os dados serão simplesmente roteados a um caminho alternativo, tornando-se mais robusta e flexível [22].

2.2 RESILIÊNCIA

O conceito de resiliência é comumente utilizado pela Física e pela Engenharia, sendo um de seus precursores o cientista inglês *Thomas Young*, que, em 1807, considerando tensão e compressão, introduz pela primeira vez a noção de módulo de elasticidade. *Young* descrevia experimentos sobre tensão e compressão de barras, buscando a relação entre a força que era aplicada num corpo e a deformação que esta força produzia. Silva Jr. (1972) denomina como resiliência de um material a energia de deformação máxima que ele é capaz de armazenar sem sofrer deformações permanentes. Dita de uma outra maneira, a resiliência refere-se à capacidade de um material absorver energia sem sofrer deformação plástica ou permanente [28].

Resiliência é definida como a propriedade pela qual a energia armazenada em um corpo deformado é devolvida quando cessa a tensão causadora de uma deformação elástica. No sentido figurado, o termo é apontado como “resistência ao choque” [9].

Na física, resiliência é a propriedade de alguns materiais acumular energia, quando exigidos e estressados, e voltar ao seu estado original sem qualquer deformação. Muitas das vezes, conceitos antigos utilizados em algumas áreas profissionais, são utilizados na prospecção ou aperfeiçoamentos em outras áreas. Profissionais das áreas da engenharia, ecologia e, até mesmo, odontologia, revelam certa familiaridade com a palavra, quando ela se refere à resistência de materiais [28].

Após estas definições, conclui-se que o nível de resiliência em materiais é obtido através de medições sucessivas em laboratório, avaliando o relacionamento de tensão e deformação de sua estrutura. Reportando este conceito para tecnologia, seja numa solução em hardware, software ou ambos em conjunto, acredita-se que a resiliência seja obtida mediante um conjunto de características. A tabela abaixo apresenta algumas características, suas definições e justificativas.

Tabela 1 – Características para Obtenção de Resiliência

Características	Definição¹	justificativa
Flexível	Fácil de manejar, domável. Que se acomoda facilmente às circunstâncias	Uma tecnologia resiliente é flexível por possibilitar reconfigurações em face de circunstâncias estranhas e obtenção da forma adequada.
Dinâmica	Que se modifica continuamente, que evolui.	Uma tecnologia resiliente é dinâmica por não estar

¹ Retirado do Dicionário Houaiss da língua portuguesa. Instituto Antônio Houaiss. São Paulo: Objetiva, 2001.

Características	Definição¹	justificativa
		subordinada a ações mecânicas para sua modificação.
Eficiente	Cujas características ou qualidades ou cujo equipamento cria condições apropriadas ou ideais para a consecução de determinada finalidade.	Uma tecnologia resiliente é eficiente por garantir seu funcionamento, mesmo estando em situações adversas.
Disponível	Não está ocupado; livre, desimpedido.	Uma tecnologia resiliente deve prover um certo grau de disponibilidade e, conseqüentemente, garantir seu funcionamento.
Seguro	Ação ou efeito de assegurar e garantir alguma coisa. Conjunto de processos, de dispositivos, de medidas de precaução que asseguram o sucesso de um empreendimento, do funcionamento preciso de um objeto, do cumprimento de algum plano.	Uma tecnologia resiliente deve possuir requisitos de segurança visando garantir sua confidencialidade e integridade.
Resistente	Qualidade de algo que reage a ação indesejada.	Uma tecnologia resiliente deve possuir um certo grau de resistência visando contribuir para sua eficiência.

2.3 O PADRÃO 802.16 E SUAS EVOLUÇÕES

O grupo de trabalho IEEE 802.16 foi criado em 1999 pelo *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE) no intuito de especificar redes sem-fio banda larga metropolitanas. A primeira versão do padrão foi aprovada em dezembro de 2001, e, inicialmente, estava focado em ambiente fixo, com visada, denominado *Line of Sight* (LOS), onde as microondas se propagam em linha direta, operando em bandas de frequência de 10 a 66Ghz. Desde então, diversas emendas do padrão foram surgindo. A emenda 802.16a abordou problemas relacionados ao espectro de frequências e foi projetada para atender as frequências mais baixas, de 2 a 11 GHz, utilizando modulação *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM) e *Orthogonal Frequency Division Multiplexing Accesss* (OFDMA) e empregando

antenas fixas *Non Line of Sight* (NLOS), possibilitando conexão sem necessidade de visada direta. A emenda 802.16b apresentou aspectos relativos à qualidade de serviço. A emenda 802.16c abordou aspectos relativos à interoperabilidade do padrão, protocolos e especificação de testes de conformação. Em junho de 2001 foi formado o WiMAX Fórum.

Posteriormente, um projeto de revisão do padrão surgiu com o objetivo de tratar maior conformidade com os aspectos do padrão europeu *High Performance Radio Metropolitan-Area Network* (HiperMAN), do *European Telecommunications Standards Institute* (ETSI), com o propósito de assegurar sua unificação, sendo concluído em 2004. A revisão foi chamada de IEEE 802.16REVd ou 802.16-2004, tornando-se o padrão base a partir daquele momento. Entre as alterações pode-se destacar a provisão de suporte para antenas *Multiple-Input Multiple-Output* (MIMO), o que aumenta a confiabilidade do alcance com multipercurso.

Concluída em 2005 e lançada em fevereiro de 2006, a emenda IEEE 802.16e ou 802.16-2005 é o padrão de acesso sem fio de banda larga móvel, adicionando especificações de mobilidade (WMANs móveis), em frequências de 2 a 6 GHz. Esse padrão utiliza um esquema de modulação denominado *Scalable Orthogonal Frequency Division Multiple Access* (S-OFDMA) e introduz funcionalidades para permitir o *handoff* entre células [13]. Essa variante traz novas melhorias como o aumento do ganho do sinal, melhorando a penetração em ambientes internos, e o aumento da área de cobertura, com a introdução das tecnologias *Adaptative Antenna Systems* (AAS) e MIMO.

2.4 PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DO PADRÃO IEEE 802.16

Conforme abordado na seção anterior, o padrão 802.16 vem sofrendo atualizações e mudanças. Em face dessa evolução, algumas características novas foram surgindo e outras foram preservadas, até mesmo para a manutenção da desejada interoperabilidade. As características aqui abordadas servirão de subsídio para o entendimento do objetivo deste trabalho, bem como apresentar de que forma está fundamentado o padrão.

2.4.1 A Pilha de Protocolos

A pilha de protocolos do padrão possui uma estrutura semelhante à de outras redes 802. Porém, possui um número maior de subcamadas, conforme ilustrado na figura 1 [23].

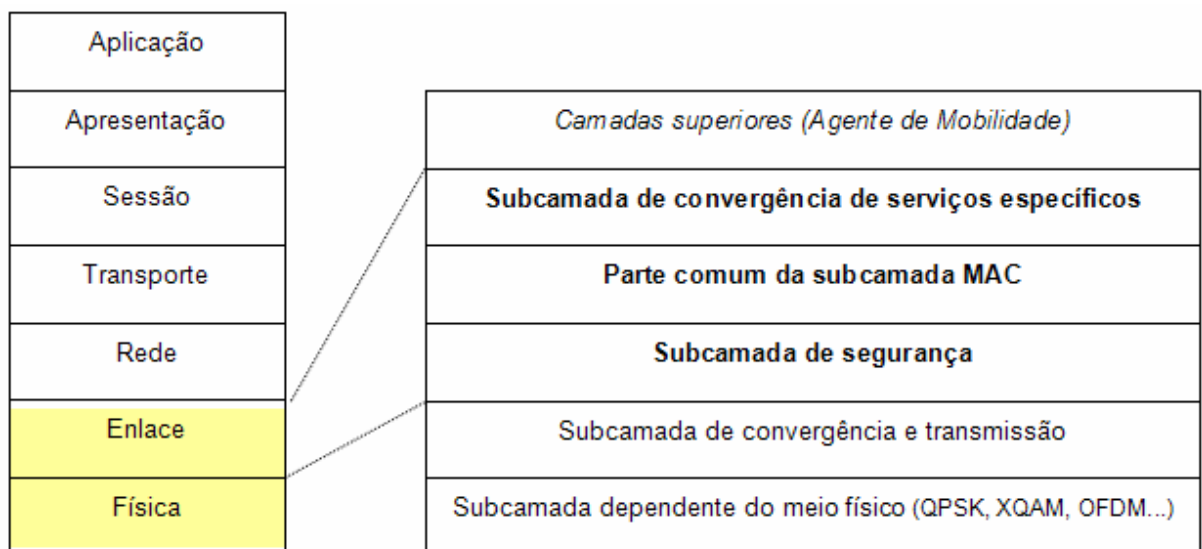


Figura 1 – A pilha de Protocolos do Padrão

A camada física é subdividida em uma parte que é dependente do meio físico, que lida com a transmissão, e outra de convergência e transmissão, responsável por ocultar as diferentes tecnologias da camada superior. A camada de enlace de dados é subdividida em subcamada de segurança, parte comum da subcamada MAC e subcamada de convergência de serviços específicos.

2.4.2 A Camada Física (PHY)

O IEEE 802.16 organiza a comunicação, definindo intervalos através de mapa para garantir acesso livre de colisão, diferentemente de outras tecnologias de transmissão sem fio, como o 802.11, que mecanismos de disputa do meio são empregados. O mapa define a utilização dos intervalos, informando quando começa o intervalo liberado para uma determinada comunicação, seja no tráfego *uplink* (UL-MAP) seja no tráfego *downlink* (DL-MAP).

Numa topologia básica do tipo ponto-multi-ponto (PMP), a Estação Base (*Base Station* - BS) é a antena principal, que consolida toda a comunicação, e a Estação Subscritora (*Subscriber Station* - SS) é a que fica do lado do cliente. A transmissão da Estação Subscritora para a Estação Base é chamada de tráfego *uplink* e a transmissão da Estação Base para a Estação Subscritora é chamada de tráfego *downlink*.

2.4.2.1 Freqüências de 10 A 66 Ghz

Inicialmente, para especificação da camada física, foi adotada a propagação que necessitava de linha de visada (sem obstáculo), denominada LOS, que utilizava faixas de freqüências mais altas, de 10 a 66 GHz. A técnica de modulação adotada foi a *Single Carrier Modulation* (SCM) com *Forward Error Correction* (FEC), o que acarretou numa especificação de interface aérea denominada *WirelessMAN-SC*.

WirelessMAN-SC suporta Duplexação por Divisão de Tempo (TDD) e Duplexação por Divisão de Freqüência (FDD) e permite utilizar vários perfis de transmissão adaptativos, nos quais os parâmetros de transmissão podem ser ajustados individualmente, para cada estação, quadro por quadro.

O tráfego *uplink* é baseado em uma combinação denominada *Demand Assignment Multiple Access - Time Division Multiple Access (TDMA-DAMA)*. 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 [7].

O tráfego *downlink* é TDM, fazendo o broadcast da informação destinada às estações de um mesmo setor. Para permitir o uso flexível do espectro são suportadas tanto configurações TDD, onde o *uplink* e o *downlink* dividem o canal mas não transmitem simultaneamente, quanto configurações FDD, onde o *uplink* e o *downlink* estão em canais separados e podem operar concorrentemente. A provisão de suporte para assinantes FDD *half-duplex* foi adicionada visando baixar custos. Ambas as alternativas, TDD e FDD, oferecem suporte a perfis adaptativos de tráfego em rajada nos quais as opções de modulação e codificação podem ser associadas dinamicamente [8].

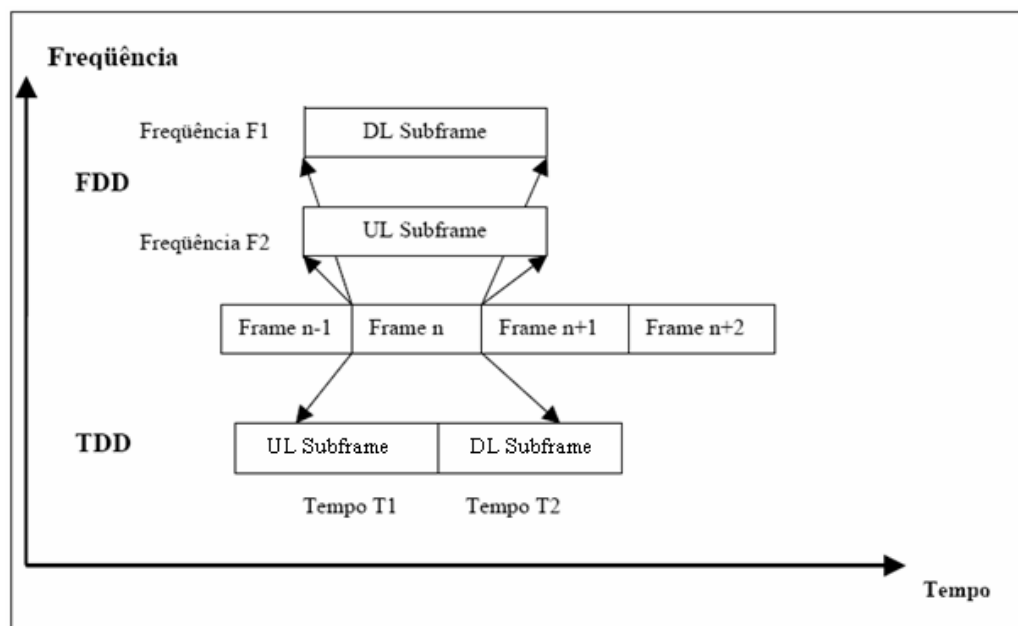


Figura 2 - Técnicas de Duplexação

O padrão IEEE 802.16 emprega um sistema de modulação adaptativa, com a utilização de três esquemas de modulação diferentes, denominadas QAM-64, QAM-16 e QPSK. Nesse sistema, o esquema de modulação do sinal é ajustado dependendo da condição do link, conforme exemplificado na Figura 3².

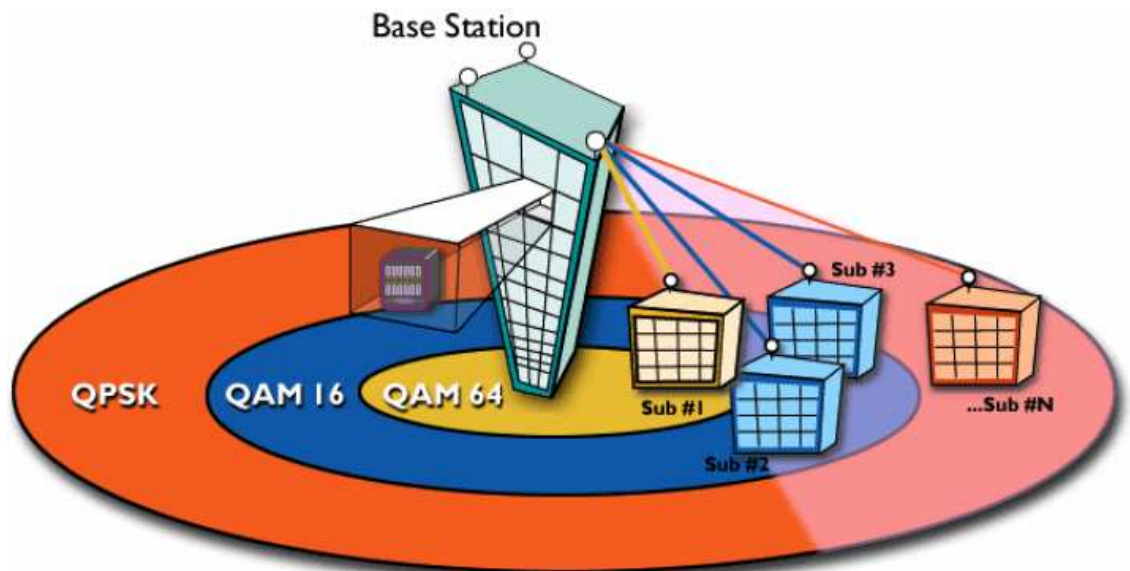


Figura 3 - Sistema de Modulação Adaptativa

Quando o enlace de rádio é de alta qualidade, o esquema de modulação mais elevado (QAM-64) é usado. 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 diminui com o aumento da distância da Estação Base, o esquema de modulação é modificado dependendo da distância em 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

² Retirada da Nota de Aula de Redes sem Fio. Programa Management of Technology in Computer Networks (MOT CN) do Núcleo de Computação Eletrônica da Universidade Federal do Rio de Janeiro , 16 Nov 2004.

com 4 *bits/ baud*. Para assinantes distantes é usado o QPSK com 2 *bits/ baud* [23]. Os esquemas QAM-16 e QPSK, embora tragam como consequência a redução da taxa de transferência, permitem um aumento no alcance do sinal e contribuem para a disponibilidade e a eficiência do WiMAX.

Tabela 2 - Largura de Banda e Taxa de Transferência por Modulação

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

2.4.2.2 Frequências Abaixo de 11 Ghz – Padrão Fixo

Projetado para atender as frequências mais baixas e a não necessidade de linha de visada (NLOS), contemplando algumas faixas livre de licenças, o padrão IEEE 802.16a especificou da camada física para as frequências entre 2 e 11GHz. Este padrão incorporou características interessantes, que possibilitavam canais com largura flexível, perfis de rajada adaptativos e encaminhamento de correção de erro com concatenação *Reed-Solomon* [12].

Tabela 3 – Características da Camada Física do IEEE 802.16a

Características	Benefícios
OFDM FFT (<i>Fast Fourier Transform</i>) usando 256 sub-portadoras	Construído para oferecer suporte ao endereçamento multipercurso para LOS e NLOS (outdoor)
Modulação adaptativa e codificação para correção de erro variável por rajada RF	Garante um enlace RF robusto enquanto maximiza a taxa de transmissão (bits por segundo) para cada assinante
Duplexação TDD e FDD	Uma ou outra pode ser utilizada cobrindo um vasto conjunto de regulamentações vigentes em todo o mundo
Canais com tamanhos flexíveis (ex: 3,5 MHz, 5 MHz, 10 MHz, etc)	Oferece a flexibilidade necessária para operar globalmente em diferentes bandas de frequência com requisições de canais variáveis
Projetado para oferecer suporte a sistemas de antenas inteligentes	Antenas inteligentes (SA – <i>Smart Antennas</i>) estão se tornando cada vez mais acessíveis e como os custos vêm caindo, a sua capacidade para suprimir interferências e aumento no ganho do sistema as tornarão importantes para a expansão da BWA

O padrão oferece quatro especificações para a interface aérea nesta faixa de frequência, conforme a seguir [12]:

- **WirelessMAN-SCa:** Utiliza o formato de modulação de portadora simples (*Single Carrier - SC*), projetada para operar na faixa de 11 GHz e sistemas sem visada direta (NLOS). Suporta TDD e FDD. *Downlink* é TDM ou TDMA. *Uplink* é TDMA. Suporta *Adaptive Burst Profiles* (ABP) e FEC, tanto no *uplink* como no *downlink*. Acrescenta melhorias na estrutura dos quadros visando contornar as condições do meio de transmissão NLOS.
- **WirelessMAN-OFDM:** Utiliza OFDM, projetada para sistemas sem visada direta (NLOS) e para operar na faixa de 11 GHz. Possui 256 sub-portadoras. O controle de acesso ao meio é feito por TDMA. Suporta TDD e FDD. Suporta ABP e FEC, tanto no *uplink*, como no *downlink*. Esta camada possui estruturas de transmissão diferentes, dependendo se a topologia é PMP ou *Mesh*.
- **WirelessMAN-OFDMA:** Utiliza 2048 sub-portadoras, com acesso múltiplo feito por OFDM. Nesse sistema, o acesso múltiplo é disponibilizado através de um subconjunto de endereçamento de múltiplas portadoras para receptores, de forma individual, tornando-se, na prática, mais lenta que os sistemas de 256 sub-portadoras.
- **WirelessHUMAN:** Interface aérea utilizada com faixas de frequências não licenciadas. Utiliza Seleção de Frequência Dinâmica (*Dynamic Frequency Selection - DFS*) para detectar e evitar interferências. Opera de 5 GHz até 6 GHz, com 5 MHz de espaçamento entre canais.

2.4.2.3 O Padrão Móvel

Com o intuito de padronizar mecanismos de suporte à mobilidade, o Grupo Tarefa “e” do padrão IEEE 802.16 foi estabelecido e terminou o desenvolvimento do novo padrão em dezembro de 2005. O padrão permite o funcionamento de estações móveis em uma banda de frequência de 2 a 6 GHz, com suporte às taxas de dados de até 30 Mbps [16]

Incompatível com o padrão fixo, o padrão IEEE 802.16e ou 802.16-2005 (WiMAX Móvel), embora tenha as bandas de 2,3 e 2,5 GHz como prováveis candidatas iniciais, ainda não teve as bandas de frequência anunciadas pelo WiMAX Fórum. Utiliza um esquema de Acesso Múltiplo por Divisão de Frequência Ortogonal Escalar (*Scalable Orthogonal Frequency Division Multiple Access - S-OFDMA*) [20].

S-OFDMA é uma variação do OFDMA que adiciona escalabilidade, permitindo associar um subconjunto variável de sub-portadoras para diferentes usuários, possibilitando que múltiplos usuários possam se conectar ao mesmo tempo, na mesma frequência, sem interferência. Cada usuário é tratado separadamente, independente da localização, distância para a estação rádio-base, interferência e requisitos de potência.

OFDM é um tipo de comunicação *Spread Spectrum* que divide a banda total em 8 faixas, onde cada faixa é dividida em 52 canais, sendo 48 para dados e 4 para controle, todas ortogonalmente, fazendo um uso melhor da banda visto que um canal não interfere no outro e não há necessidade de intervalos [2]. SOFDM ajusta, em escala, a capacidade do *Fast Fourier Transform* (FFT) a largura do canal enquanto mantém a frequência da sub-portadora se espaçando constantemente pelas diferentes faixas de frequência de transmissão dos canais.

WiMAX Móvel compete com diversas tecnologias de banda larga móvel, tais como o WCDMA, o CDMA2000 EVDO, o TD-SCDMA e o *Flash-OFDM*. Porém, destaca-se entre elas por ser inerente baseado em IP, de arquitetura aberta para redes móveis de dados, com boa sustentação para gerência de QoS voltados para aplicações de multimídia, e por fazer uso justamente da modulação S-OFDMA, que eleva significativamente seu desempenho, oferecendo uma alta taxa de transmissão de dados, principalmente em ambiente de multipercurso [3].

Um ambiente sem fio sofre com a propagação de trajetória múltipla. Esse tipo de propagação, também conhecido simplesmente como multipercurso, é uma condição da qual reflexões múltiplas da forma da onda do transmissor chegam ao receptor em momentos diferentes, conforme exemplificado na figura 4.

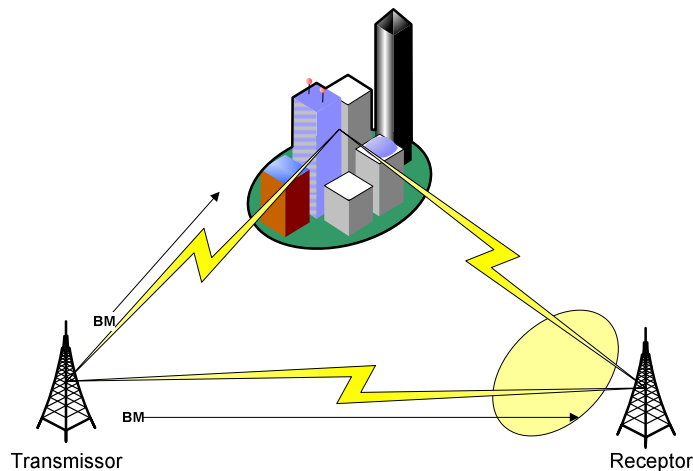


Figura 4 – Propagação de Trajetória Múltipla

A possibilidade de trabalhar em diferentes escalas de canais, variando de 1.25 MHz a 20 MHz, permite que seja empregado tanto em áreas rurais, provendo acesso de baixo custo, como em áreas urbanas e suburbanas, melhorando a capacidade do acesso móvel de banda larga. [26]

O padrão IEEE 802.16e, em relação ao padrão fixo, provê melhor suporte para AAS e MIMO [24].

2.4.2.4 Sistema de Antenas Adaptativas

O Sistema de Antenas Adaptativas (*Adaptive Antenna System - AAS*) descreve técnicas de direcionamento de ondas de rádio onde um sistema explora adaptativamente mais de uma antena para aumentar sua capacidade e alcance enquanto anula as interferências de outras estações bases e de outras fontes de interferências.

O sistema AAS utiliza um arranjo de antenas que utiliza uma técnica conhecida como *beamforming*, que emite sinais direcionados usando propriedades de difração dos sinais para estimar o deslocamento necessário para a fase [21], proporcionando serviços com uma maior penetração *indoor*, sem necessidade de uma Estação Rádio-Base muito densa. Ao direcionar o feixe de luz para diferentes usuários na área de cobertura, consegue suportar múltiplos usuários. Essa abordagem é também intensiva no processamento de sinais e se baseia num controle preciso dos sinais para cada antena, exigindo um arranjo de antenas tradicionais rigorosamente associadas ao processamento do sinal e cuidadosamente calibradas [18].

Em ambientes de crescimento desordenado, tais como cidades, o sinal transmitido pode resvalar nos prédios, resultando em trajetórias múltiplas para o receptor. Com a formação *beamforming* do sistema AAS, essas reflexões efetivamente tornam o feixe mais amplo, reduzindo o benefício, caracterizando uma propagação angular, conforme ilustrado na Figura 5³.

³ Retirada do Nortel White Paper. MIMO or AAS: Key technology choice in deploying WiMAX, 2006.

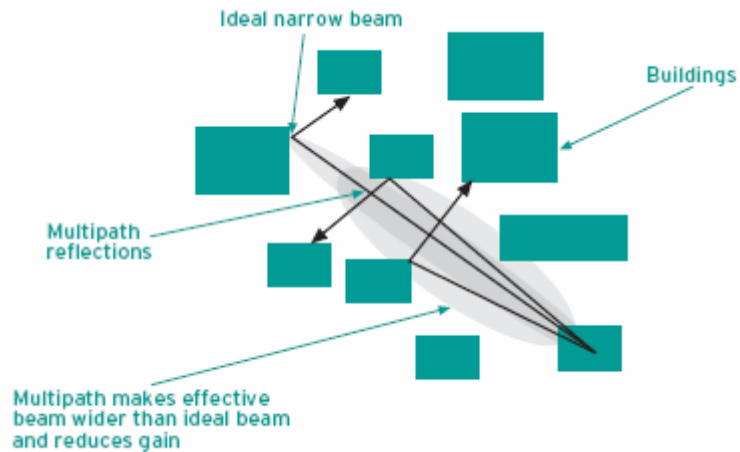


Figura 5 - Ampliação do feixe de luz por propagação angular

2.4.2.5 Sistema de Multipla Entrada e Multipla Saída

Este sistema, na prática, compete com o AAS. Tanto o Sistema MIMO quanto o AAS são tecnologias que utilizam múltiplas antenas para melhorar as características da transmissão. Contudo, a abordagem e as características de cada sistema são diferentes.

O sistema MIMO multiplica a eficiência espectral ponto-a-ponto ao utilizar antenas múltiplas e correntes RF tanto no transmissor quanto no receptor. O sistema MIMO obtém um aumento multiplicativo na qualidade comparado à arquitetura do SISO (Simple Input, Simple Output) através de uma codificação cuidadosa do sinal transmitido através das antenas, dos símbolos OFDM, e dos tons de frequência [17].

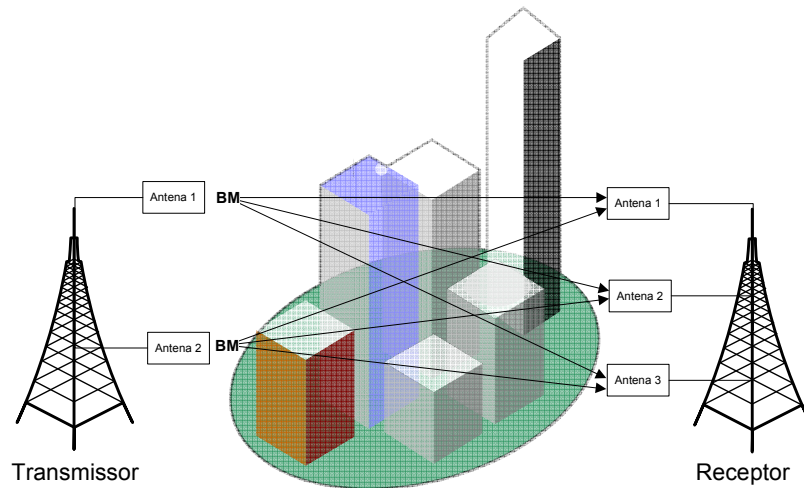


Figura 6 – Sistema MIMO

O sistema se beneficia dos múltiplos sinais paralelos, enviado pelas antenas, permitindo explorar os múltiplos sinais em partes diferentes da célula. Os receptores finais utilizam um processamento de sinal especial para identificar os múltiplos sinais. Os fluxos paralelos contribuem para uma melhoria em escala, como uma progressão geométrica, e os efeitos de trajetórias múltiplas utilizados pelo sistema, como reflexões nos prédios, faz com que o sistema MIMO seja bastante eficiente em ambientes desordenados, como áreas urbanas. Onde o sinal está forte, cada sinal pode transportar dados diferentes para os mesmos usuários ou usuários diferentes, aumentando a capacidade. Onde o sinal é fraco, próximo à beira da célula, os mesmos dados são transmitidos em todos os sinais para aquele usuário, criando um sinal mais forte para o usuário e aumentando o alcance. Essa última abordagem cria sua própria trajetória múltipla, assegurando os benefícios do sistema MIMO mesmo em condições de falta de obstrução direta [18].

Algumas das técnicas do sistema MIMO exigem previamente informações de canal no transmissor. Essa informação pode ser implicitamente estimada utilizando a reciprocidade nos sistemas TDD ou pode ser explicitamente retornada ao transmissor nos sistemas FDD. Em um sistema de mudança lenta como o padrão

IEEE 802.16-2004, o conhecimento do canal pode permanecer válido por um bom tempo, já no sistema móvel 802.16e, o canal pode mudar rapidamente e exigir freqüentes atualizações de avaliação. O sistema MIMO é uma solução atraente para tais sistemas pois alguns métodos não exigem conhecimento do canal, mantendo a ligação através da exploração da diversidade espacial, diferentemente do sistema AAS, que eminentemente trabalha dessa forma [17].

2.4.3 Camada de Controle de Acesso ao Meio (MAC)

A camada de controle de acesso ao meio é subdividida em subcamada de segurança (privacidade), subcamada de parte comum e subcamada de convergência de serviços específicos, e tem como principal função o fornecimento dos serviços para a camada superior.

Inicialmente, o protocolo MAC foi projetado para suportar arquiteturas de rede ponto a ponto e ponto-multiponto. As bandas de freqüências mais baixas possibilitaram suportar topologias em malha (*mesh*), foco deste trabalho.

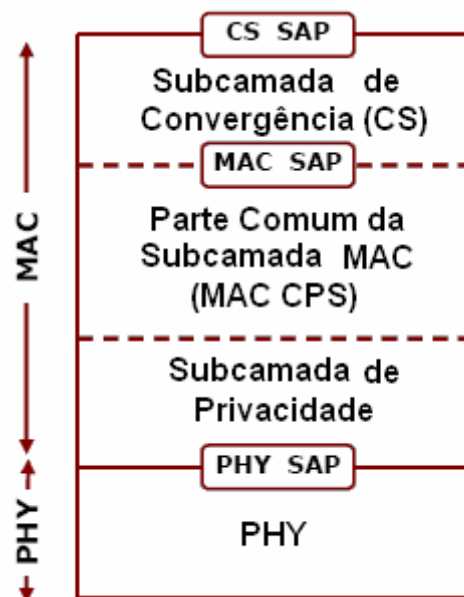


Figura 7 – Pilha de Protocolos do IEEE 802.16

2.4.3.1 Subcamada de Segurança

Esta subcamada proporciona o sigilo das informações, a autenticação e autorização, a troca de chaves e a certificação digital.

O protocolo de privacidade do padrão IEEE 802.16 é baseado num protocolo de Gerenciamento de Chaves Privadas (*Privacy Key Management - PKM*) da especificação DOCSIS BPI [8] e fornece segurança aos assinantes da rede *wireless* através da encriptação das conexões entre o transmissor e o receptor [12].

O protocolo PKM utiliza certificados digitais X.509 em conjunto com algoritmo RSA de chave pública para autenticação dos assinantes e troca de chaves de autorização. Foi criado através do conceito de Associações Seguras (*Security Associations - AS*), que são um conjunto de métodos de criptografia e dados da chave associados. As SA contêm, dentre outras informações, quais algoritmos devem ser utilizados e qual chave utilizar. Cada assinante estabelece pelo menos uma AS durante a inicialização. Cada conexão, exceto a de gerenciamento básico, é mapeada em uma AS no momento de estabelecimento de conexão e durante a operação, que pode ser alterada dinamicamente.

O WiMAX móvel usa autenticação baseada num Protocolo de Autenticação Extensível (*Extensible Authentication Protocol - EAP*), um protocolo genérico que permite que os pontos de acesso à rede suportem múltiplos métodos de autenticação. Provê também criptografia autenticada baseada em *Advanced Encryption Standard* e *Counter Mode Encryption e Cipher Block Chaining Message Authentication* (AES-CCM), e esquemas de proteção de controle de mensagens baseados em *Keyed-hash Message Authentication Code* (HMAC) e *Cipher Message Authentication Code* (CMAC). Suporta um diversificado conjunto de dispositivos para

proteger os usuários, incluindo: Cartões SIM/USIM; *Smart Cards*; certificados Digitais; e o uso de *Username/Password* baseados nos métodos EAP [26].

2.4.3.2 Parte Comum da Subcamada MAC - CPS

Uma das grandes vantagens do padrão é que ele organiza a comunicação, e esta principal subcamada MAC provê mecanismos eficientes de compartilhamento, fornecendo funções de acesso ao sistema, de alocação de largura de banda, de estabelecimento de conexão, manutenção de conexão e término da conexão. Orientada a conexão, faz com que todos os serviços, incluindo os originalmente sem conexão, como o tráfego IP, sejam mapeados para uma conexão. Para tal, ela provê mecanismo para requisitar largura de banda, associar parâmetros de Qualidade de Serviço (QoS) e de tráfego, transportar e rotear os dados para a subcamada de convergência apropriada, entre outras ações.

Uma vez estabelecidas, as conexões 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 [12].

As conexões são referenciadas através de Identificadores de Conexão de 16 bits e podem requisitar largura de banda assegurada ou largura de banda sob demanda.

O endereçamento MAC referente a cada estação de usuário é composto por 48 bits e identifica o equipamento pelo qual o assinante utiliza para a conexão. Este endereço é utilizado para estabelecer conexões e autenticar SS e BS. Após entrar na rede, atribui-se para aos assinantes três conexões de gerenciamento em cada direção. As conexões designadas são conexão base, a conexão primária de gerenciamento e a conexão secundária de gerenciamento. A primeira é utilizada para

transmissão de mensagens curtas de MAC, mensagens de Controle do enlace de Rádio (*Radio Link Control* - RLC) e de tempo crítico. A segunda transfere mensagens mais longas e que não sejam sensíveis ao atraso. A terceira transfere mensagens de gerenciamento com base em padrões *Dynamic Host Configuration Protocol* (DHCP), *Trivial File Transfer Protocol* (TFTP) e *Simple Network Management Protocol* (SNMP) [8].

Conexões de transporte aos assinantes para os serviços contratados também são alocadas. Estas conexões são unidirecionais para facilitar a diferenciação entre parâmetros de tráfego e QoS no *uplink* e no *downlink*. Para tal, estes parâmetros são tipicamente atribuídos em pares aos serviços [8].

Esta subcamada provê o suporte a duas topologias: Ponto-Multiponto (*Point-Multipoint* - PMP) e Malha (*Mesh*). Na topologia PMP o tráfego só ocorre entre a BS e as SS, onde toda comunicação de uma estação de assinante passa sempre pela BS, nunca entre SS. Na topologia *Mesh*, o tráfego pode ser roteado através das SS, passando diretamente entre elas sem passar pela BS, onde cada estação funciona como um “nó repetidor” distribuindo tráfego para os seus vizinhos. Em grandes distâncias onde uma determinada SS não esteja em linha de visada com a BS, muito comum em grandes cidades, atender a todos os clientes pode não ser possível. Para aumentar a quantidade de usuários, sem acrescentar novas BS, o que tornaria o custo do projeto muito elevado, a topologia *mesh* surge como uma alternativa interessante.

Na topologia *Mesh*, além do endereço de 48 bits, existem ainda dois outros identificadores usados para estabelecer as conexões. São eles: *Node ID*, de 16 bits, e *Link ID*, de 8 bits. O *Node ID* é a base para identificar os nós da rede e o *Link ID* é

usado para identificar os seus nós vizinhos através dos enlaces físicos existentes entre cada nó.

2.4.3.3 Subcamada de Convergência de Serviços Específicos - CS

Esta subcamada provê o mapeamento de dados externos da rede nas Unidades de Dados do Serviço (SDUs), que são recebidas pela subcamada da parte comum do MAC, vista na seção anterior. Isto inclui a classificação de SDUs de redes externas e sua associação ao apropriado fluxo de serviço do MAC e identificador de conexão.

O Padrão IEEE 802.16 define duas subcamadas de convergência específicas ao serviço (CS): CS ATM para redes ATM e CS pacotes para a *Ethernet*, PPP, e TCP/IP.

Ao receber dados de camadas superiores, estes são classificados como uma célula ATM ou um pacote, e a primeira tarefa é dividir as SDUs entre as conexões MAC apropriadas, preservar ou ativar o QoS e permitir a alocação de banda, antes dos dados serem passados para a subcamada da parte comum do MAC. Caso o pacote não se encaixe em nenhum dos critérios de comparação, a subcamada CS deve descartá-lo [12]. Em adição a estas funções básicas, a subcamada de convergência também pode realizar funções mais sofisticadas como supressão e reconstrução de cabeçalho da carga útil, para melhorar a eficiência do enlace aéreo [8].

2.4.4 Qualidade de Serviço

Na arquitetura PMP do padrão IEEE 802.16 o QoS é mantida através de conexões, fluxos de serviço e serviços de agendamento (*Scheduling Services*). As

exigências do QoS de camada mais alta são mapeadas para os parâmetros do padrão na subcamada CS baseada em exigências de QoS dos fluxos de serviço.

Na arquitetura em Malha, os requisitos de QoS não são associados ao link, mas sim a mensagem que é trafegada nele, mantendo uma base pacote por pacote, onde cada pacote tem seus próprios parâmetros de serviço [19]. O padrão não introduz nenhum mecanismo para que se possa lidar com os parâmetros de QoS.

2.4.4.1 Conexões

As conexões são baseadas nos serviços registrados pelo usuário durante a inicialização de uma SS. Se um usuário mudar de serviço, o qual assina, conexões adicionais podem ser incluídas à rede ou uma conexão pode ser alterada ou uma conexão existente pode ser extinta. Mais de uma transmissão de nível mais alto pode ser mapeada para uma conexão simples. Dessa forma, uma conexão pode representar muitas comunicações de alto nível.

No modo PMP, cada conexão possui Identificador de 16 bits (*Connection Identifier* - CID). Na inicialização de uma SS, dois pares de conexões são organizados. No caso de uma SS gerenciada, um terceiro par de conexão é organizado [15].

Para o estabelecimento da conexão na topologia em Malha, a identificação da ligação e outros quatro parâmetros são utilizados para construir o CID. Esses quatro parâmetros são os seguintes: tipo, confiabilidade, prioridade/classe e prioridade de enfraquecimento. Nesse modo, cada *Mesh* SS (MSS) tem um Identificador de nó de 16 bits adquirido da *Mesh* BS (MBS) quando a MSS é inicializada [15].

2.4.4.2 Fluxos de Serviços (SF)

Cada conexão na rede é associada a um SF, que é composto por um grupo de parâmetros de QoS, um Identificador SF (*SF Identifier* - SFID), e um CID [19]. Os SF podem ou não ser ativos em determinado momento e são associados a uma conexão quando ativos. Quando um SF é estabelecido, um grupo amplo de parâmetros de QoS são selecionados. Esse grupo de parâmetros é denominado de *ProvisionedQoSParamSet* (PQPS). Quando um SF é reconhecido para ativação, um grupo de PQPS menor, denominado *AdmittedQoSParamSet* (AQPS) é então selecionado. O SF selecionado se torna ativo quando o receptor aceita o fluxo. Posteriormente, o último grupo de parâmetro, denominado de *ActiveQoSParamSet* (ACQPS) é inicializado. Além disso, para esses grupos de parâmetros, há também um módulo de autorização para os SF [15].

Dois tipos de métodos de autorização estão disponíveis para os SF: estática e dinâmica. Na autorização estática, os grupos de parâmetros de um SF não podem ser trocados depois do estabelecimento de um SF e SF adicionais não podem ser incluídos. Na autorização dinâmica, existe uma política de servidor em separado na qual os grupos de parâmetros são armazenados. O módulo de autorização testa a política do servidor para confirmar se a admissão e a ativação do novo SF são apropriadas. A política do servidor envia essa informação ao módulo de autorização no qual o estabelecimento dos SF dinâmicos é feito, após a realização da inicialização da SS [15].

2.4.4.3 Escalonamento de Serviços

Inicialmente, quatro categorias de agendamento de serviço foram definidas: a *Unsolicited Grant Service* (UGS), a *Real-Time Polling Service* (rtPS), a *Non Real-*

Time Polling Service (nrtPS) e a *Best Effort* (BE) [12]. Recentemente, com o objetivo de prover melhor mecanismo para os serviços como VoIP, o padrão introduziu o serviço de agendamento *Extended Real Time Polling Service* (ertPS) [13]. Porém, todas são tratadas de forma diferenciada pelo mecanismo de escalonamento da camada MAC, com o intuito de transportar dados em uma conexão, e parâmetros de QoS são definidos para cada uma. Ao total, existem seis parâmetros de QoS, onde suas alocações variam entre as classes de serviço [15]:

- **UGS** – Desenvolvido para suportar fluxo de serviço de tempo real que geram pacotes de tamanho fixo, periodicamente, como serviços tipo CBR (E1/T1) e Voz sobre IP sem supressão de silêncio. Oferece concessões de banda de tamanho fixo, periodicamente, eliminando o overhead das solicitações e garantindo que banda esteja disponível para atender às necessidades. Entretanto, banda reservada pode ser desperdiçada quando os fluxos UGS correspondentes estiverem inativos. Com a exceção do parâmetro *traffic priority*, todos os cinco parâmetros QoS restantes são definidos nos SF UGS: *Maximum Sustained traffic*, *Maximum Latence*, *Tolerated Jitter*, *Request/Transmission Pollicy* e *Minimum Reserved Traffic Rate*.
- **rtPS** – Enquanto o UGS dá suporte ao tráfego CBR em tempo real, o rtPS dá suporte ao tráfego de Taxa de Bit Variável (VBR) em tempo real, requerendo obviamente mais *overhead* de solicitação. Suporta fluxos em tempo real que geram pacotes de tamanho variável, periodicamente, como, por exemplo, vídeo MPEG. 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. Os parâmetros QoS permitidos nos SFs UGS estão também disponíveis em SF rtPS, com exceção do parâmetro *Tolerated Jitter*.

- **nrtPS** – Suporta fluxos de dados tolerante a atraso, de tamanhos variáveis e taxa de dados mínima. Esse Serviço envia *polls unicast* periodicamente, garantindo oportunidades de transmissão mesmo durante congestionamento. Destina-se a transmissões pesadas que não são de tempo real, como por exemplo o FTP. Quanto à política de solicitação/transmissão, SS são permitidas a usar oportunidades de solicitação em contenção, oportunidades de solicitação *unicast* e concessão de banda não solicitada por SS. Os SF nrtPS possuem os mesmos parâmetros QoS como nos SF rtPS. Contudo, os SF nrtPS não possuem o parâmetro *Maximum Latence*, visto que esses SFs não carregam pacotes críticos de tempo, e possuem um parâmetro de prioridade de tráfego especial, denominado *Traffic Priority*.
- **BE** – A intenção é prover serviço eficiente a tráfego de melhor esforço. A política de solicitação/transmissão deve ser tal que a conexão possa usar oportunidades de contenção para a solicitação. O serviço de melhor esforço 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 *uplink* como disponíveis para disputa. Se uma solicitação for bem sucedida, seu sucesso será notado no próximo mapa *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. Como no nrtPS, os SF BE não possuem os parâmetros de *tolerated jitter* e *maximum jitter*. O BE não possui o parâmetro *minimum reserved traffic rate* também. Assim como no nrtPS, os SF BE possuem um parâmetro de prioridade de tráfego especial, denominado *Traffic Priority*.

- **ertPS** - O padrão de IEEE 802.16 mais recente introduziu este serviço, pois havia necessidade de melhorias para os serviços de VOIP, não providos apropriadamente pelos serviços de escalonamento anteriores (vistos acima). ertPS é similar ao UGS, desde que não tenha nenhum mecanismo de exigência de largura de banda e em cada quadro da BS seja alocado a largura de banda para a conexão. Contudo, a largura de banda alocada à conexão pode mudar com o tempo, igual ao rtPS. Uma conexão ertPS pode diminuir ou aumentar sua largura de banda alocada baseada no tráfego. Os SFs ertPS possuem os mesmo parâmetros QoS com os SF rtPS.

2.4.5 Tecnologia *Mesh*

O IEEE 802.16 suporta modos de operação *Point-to-Multipoint* (PMP) e *mesh*. No modo PMP cada SS se comunica diretamente com a BS através de um enlace do tipo *single-hop* (salto simples ou único), exigindo que todas as MSS estejam dentro

da faixa de transmissão da MBS. No modo *mesh*, as SS podem se comunicar com a BS *mesh*, e aquelas umas com as outras, através de rotas *multi-hop*, tornando-se tanto transmissor quanto roteador/repetidor e estendendo a área de cobertura da rede, conforme ilustrado na figura 8. A topologia *mesh* aumenta a capacidade em ambientes N-LOS e provê maior confiabilidade na rede e disponibilidade quando falhas de nós ou de links ocorrem, ou quando as condições de canal sofrem degradação. Como este trabalho tem o objetivo de apresentar um modelo de rede sem fio resiliente, o modo *mesh* será enfatizado.

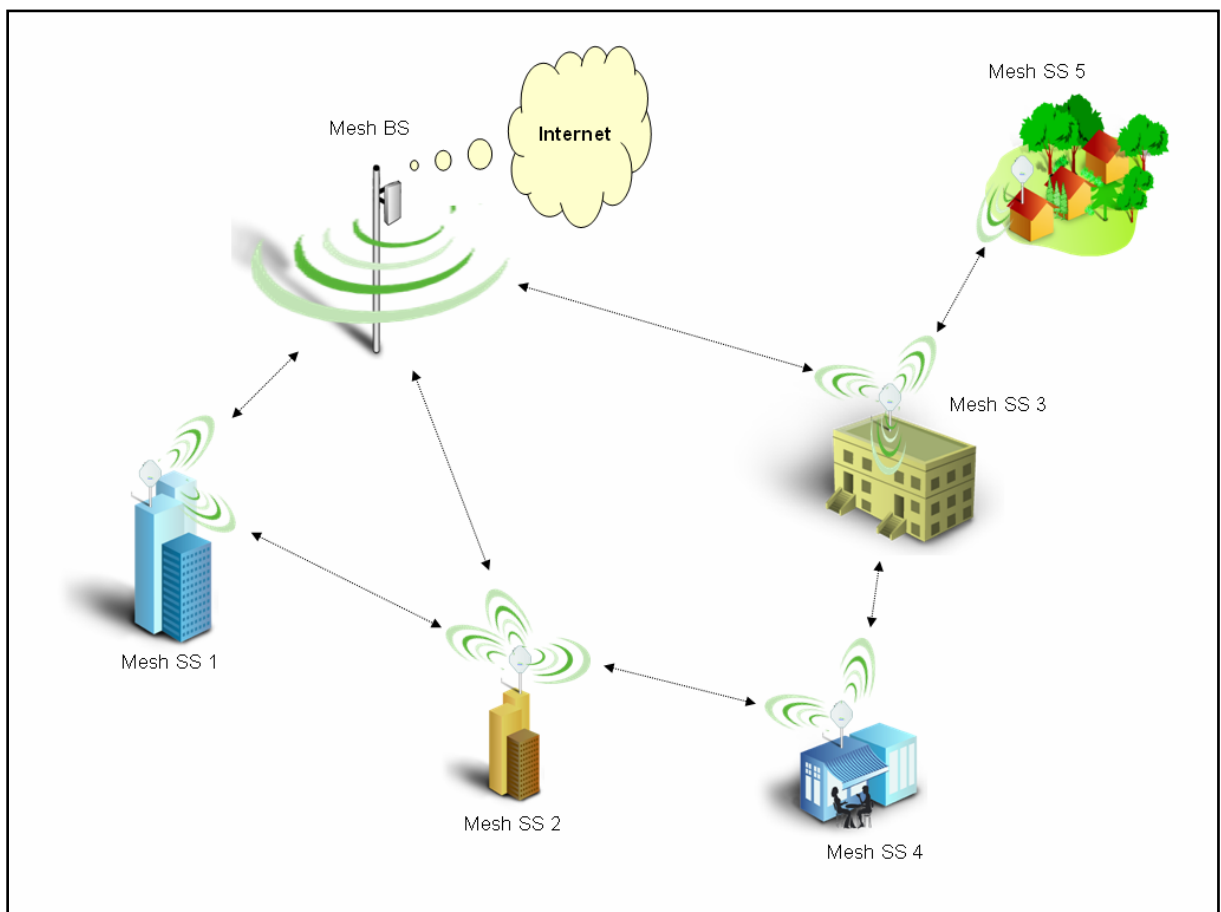


Figura 8 - Topologia *Mesh*

Sistemas *Mesh* tipicamente usam antenas omnidirecionais, mas também podem usar antenas setoriais [11].

2.4.5.1 Rede *Mesh* e seus Atores

Alguns termos são importantes para compreender esta tecnologia. Um sistema que tem conexão direta com serviços pertencente a uma rede central (*backhaul*) fora da rede *Mesh* é denominado *Mesh* BS (MBS). Todos os outros sistemas pertencem à rede *Mesh* são chamados de *Mesh* SS (MSS). Comparando com a topologia ponto-multiponto, a SS é a MSS e a BS é a MBS. Os sistemas de uma rede *Mesh* são chamados de nós. Na topologia *mesh*, cada MSS tem um nó pai, que é o nó, dentre os nós de seu alcance, que possui menos contagem de *hops* com a MBS. Se uma MSS for diretamente conectada a MBS, então a MBS é o seu nó pai. Os links entre as MSS e seus nós pai formam uma árvore de sincronização. Os significados de *uplink* e *downlink* também são diferentes. As transmissões de uma MSS para seu pai são chamadas transmissões de *uplink*. A transmissão de uma nó pai para seu filho é chamada de transmissão *downlink* [12].

Outros importantes termos em sistemas *Mesh* são: vizinho; vizinhança; e vizinhança estendida. As estações com as quais um nó tem ligação direta são chamadas de vizinhos, ou seja, aqueles que estão a um salto de distância de um nó. Vizinhos de um nó formam uma vizinhança. Uma vizinhança estendida contém adicionalmente todos os vizinhos da vizinhança, ou seja, nós que estão a dois saltos distantes de um dado nó [11].

2.4.5.2 A Estrutura do Frame

O modo *mesh* do IEEE 802.16 utiliza TDMA para acesso ao canal entre a MBS e os nós MSS, onde um canal de rádio é dividido em dois *frames*. Posteriormente, cada *frame* é dividido em dois *slots* de tempo que podem ser atribuídos a MBS ou aos diferentes nós MSS. Um *frame* consiste em um *sub-frame*

de controle e em um *sub-frame* de dados. Cada *frame* é mais tarde dividido em 256 *minislots* para a transmissão de dados do usuário e mensagens de controle. No *sub-frame* de controle, oportunidades de transmissão, que tipicamente consistem *minislots*, são utilizadas para transportar mensagens de sinalização para a configuração da rede (*subframe* de controle de rede) e sincronização da alocação do *minislot* do *subframe* de dados (*subframe* de controle de sincronização) [4].

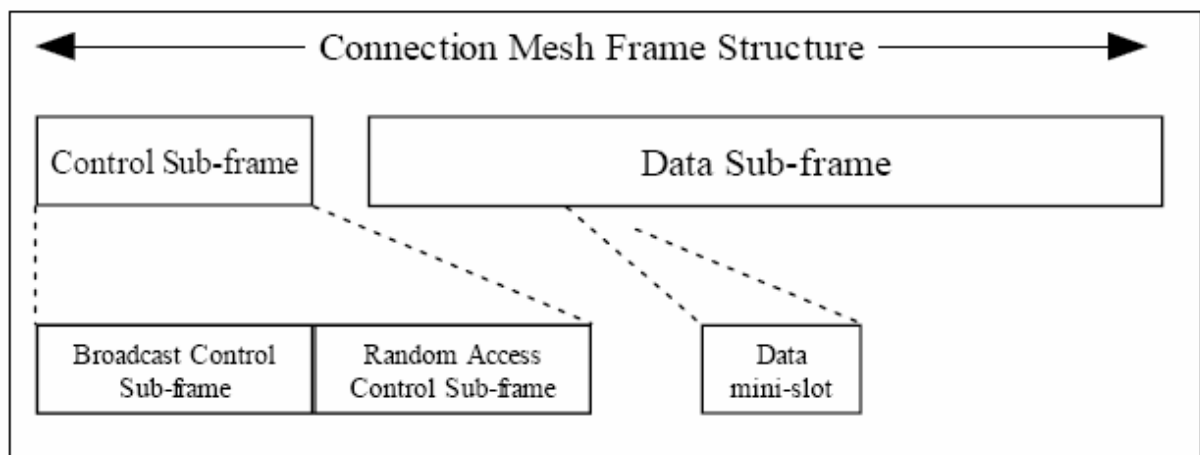


Figura 9 - Estrutura do Frame *Mesh*

2.4.5.3 Estabelecimento e Manutenção da Rede

Nos *subframes* de controle de rede, as mensagens *Mesh Network Configuration* (MSH-NCFG) e a *Mesh Network Entry* (MSH-NENT) são transmitidas para criação e manutenção da configuração da rede. A Árvore de Sincronização criada na MBS é estabelecida para o trajeto do roteamento entre cada MSS e a MBS. Nós ativos dentro da rede *mesh* periodicamente enviam mensagens MSH-NCFG que contém o Descritor de Rede que inclui as informações de configuração da rede. Um novo nó que deseja se juntar a rede *mesh* procura por redes ativas escutando as mensagens MSH-NCFG [11].

Com o recebimento da mensagem MSH-NCFG, o novo nó estabelece sincronia com a rede *mesh*. Dentre todos os nós vizinhos possíveis que enviam

mensagens MSH-NCFG, o novo nó seleciona outro nó como patrocinador. Então o novo nó envia a mensagem MSH-NENT com as informações de registro para a MBS através do nó patrocinador. Com o recebimento da mensagem de registro, a MBS adiciona o novo nó como filho do nó patrocinador na árvore de sincronização, e então transmite a configuração atualizada da rede para todas as MSS. A figura 10 representa a árvore de sincronização hipotética para a topologia mostrada na figura 8.

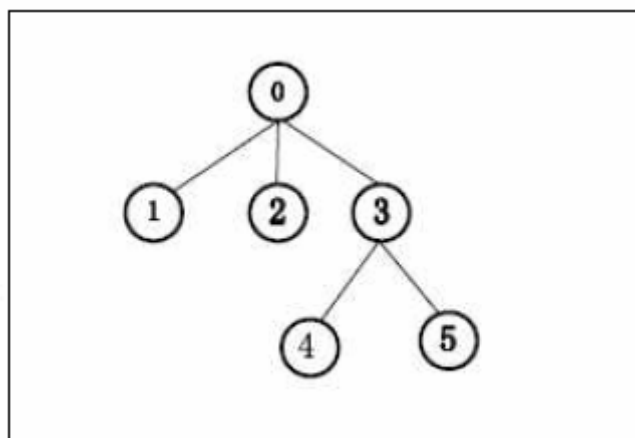


Figura 10 – Árvore de Sincronização

2.4.5.4 Escalonamento

O escalonamento é tratado na camada MAC e pode ser distribuído, centralizado ou uma combinação de ambos. Em um sistema *Mesh*, nem mesmo a MBS pode transmitir sem coordenação com os outros nós [11]. As mensagens de Sincronia *Mesh* Centralizada (MSHCSCH) e de Sincronia *Mesh* Distribuída (MSHDSCH) são trocadas no sub-frame de controle de sincronização para designar *mini-slots* de dados para diferentes estações. O número de oportunidades de transmissão para a MSH-CSCH e para a MSH-DSCH em cada sub-frame de controle de sincronização são parâmetros de rede que podem ser configurados [4].

No escalonamento distribuído, todos os nós, incluindo a MBS, devem coordenar suas transmissões com suas vizinhanças, ou seja, dois saltos, e devem difundir suas agendas, contendo recursos disponíveis, solicitações e ofertas, para todos seus vizinhos. Opcionalmente a agenda pode também ser estabelecida por solicitações e ofertas diretas sem coordenação entre dois nós. Através de um algoritmo de eleição pseudo-aleatório coordenado, os nós garantem que as transmissões resultantes não causarão colisões com o tráfego de dados e de controle agendados por qualquer outro nó numa vizinhança de dois saltos de diâmetro [11]. Um procedimento de *hand-shaking* é empregado para reservar *mini-slots* para transmissão de dados entre MSS vizinhas e não há diferença no mecanismo usado para determinar a agenda *uplink* e *downlink* [4].

No escalonamento centralizado, que lembra bastante a arquitetura PMP, a MBS deve coordena as solicitações de recursos para todas as MSS dentro de certa faixa de saltos. A MBS deve determinar a disponibilidade de recursos de cada enlace na rede, tanto *downlink* quanto *uplink*, e comunicar estas ofertas para todas as MSS dentro desta faixa de saltos. As mensagens de oferta não contêm a agenda, mas cada nó deve computá-la usando o algoritmo pré-determinado com os parâmetros passados [11]. O período de tempo é chamado de Período de Sincronização, que é tipicamente um par de *frames* em comprimento. Há dois estágios em cada período de sincronização. No primeiro estágio, as MSS enviam pedidos de largura de banda usando a MSH-CSCH, que são mensagens de requisição para seus nós patrocinadores, sendo roteadas para a MBS através da árvore de sincronização. Cada MSS não só envia seu próprio pedido de largura de banda como também transmite os de seus descendentes na árvore de sincronização. As MSS transmitem a MSH-CSCH, que são mensagens de requisição que os nós patrocinadores sempre

transmitem depois de seus filhos. Dessa forma, a MBS recolhe as requisições de largura de banda de todas as MSS. No segundo estágio, a MBS calcula e distribui a sincronia espalhando a MSH-CSCH, que são mensagens de permissão, que é propagada para todas as MSS ao longo da árvore de sincronização [4].

O escalonamento centralizado é utilizado principalmente para transferir dados entre a MBS e as MSS, que corresponde ao tráfego externo da internet, enquanto os dados alvo do escalonamento distribuído são enviados entre duas MSS na mesma rede *Mesh WiMax*, que corresponde ao tráfego da *intranet*. No padrão, o *sub-frame* de dados é dividido em duas partes para os dois mecanismos de sincronização respectivamente. O escalonamento centralizado reconhece ambos o *uplinks*, no qual o tráfego vai das MSS para a MBS, e o *downlink*, no qual o tráfego vai da MBS para as MSS. No modo *Mesh*, TDD é utilizada para compartilhar o canal entre o *uplink* e o *downlink* [4].

Se ambos os métodos de escalonamento são utilizados, o *frame* é dividido em duas partes, uma para sincronização centralizada e outra para sincronização distribuída [5].

2.4.5.5 Comunicação

Todas as comunicações são realizadas através de link que é estabelecido entre dois nós. Um link deve ser usado para todas as transmissões de dados entre os dois nós e a QoS é conseguida nos *links* mensagem-a-mensagem, onde cada mensagem *unicast* tem parâmetros de serviço no cabeçalho. A classificação de tráfego e regulação de fluxo são feitos no nó de ingresso pelo protocolo de classificação/regulação da camada acima. Os parâmetros de serviço associados com

cada mensagem são comunicados juntos com o conteúdo da mensagem, através da MAC SAP [4].

3 RESILIÊNCIA NO WIMAX

No Capítulo anterior, estudos sobre as características da resiliência e sobre os recursos do WiMAX, foco deste trabalho, foram realizados. Como se pôde observar, resiliência engloba diversas características, das quais podem ser encontradas no padrão IEEE 802.16 e suas variantes.

Este capítulo vem a consubstanciar as características da resiliência e os recursos do WiMAX, apontando onde elas se relacionam.

3.1 INDEPENDÊNCIA DO NÓ CENTRAL

Conforme visto na seção 2.4.5, o padrão 802.16 provê suporte à topologia *Mesh*. Esta topologia, diferentemente de outras do tipo *hop* único, não depende do desempenho de um nó central para o seu funcionamento, pois todos os nós da rede se comunicam diretamente entre si, dentro de uma determinada área. Em redes do tipo *hop* único, se o ponto de acesso principal é desativado, conseqüentemente, a rede também será. Em redes *Mesh*, se a estação mais próxima for desativada ou se houver interferência localizada, a rede continuará funcionando, pois os dados são roteados a um caminho alternativo. A topologia *mesh* provê maior confiabilidade na rede e disponibilidade quando falhas de nós ocorrem, ou quando as condições do canal sofrem degradação. Outro recurso inerente a esta tecnologia é a possibilidade de usar várias rotas para a entrega de dados, aumentando a largura de banda eficiente da rede.

Os recursos citados no parágrafo anterior englobam várias características inerentes a resiliência. A possibilidade de obtenção de caminhos alternativos em caso de falha ou degradação de um nó, de forma automática, sempre buscando a

melhor rota, justifica a flexibilidade, possibilitando alterações, face às circunstâncias estranhas; e dinamicidade, por não estar subordinada às ações mecânicas para sua modificação. Levando-se em consideração a garantia da finalidade da rede, que efetivamente é proporcionar a transmissão com todas as características oferecidas pelo padrão, mesmo estando em situações adversas; e a possibilidade de reação à ações indesejadas, os recursos mencionados no parágrafo anterior podem ser considerados eficientes e resistentes, respectivamente.

3.2 PROTEÇÃO CONTRA INTERFERÊNCIA

A interferência é um dos grandes problemas existentes em redes de um modo em geral, principalmente em redes sem fio por utilizar o ar como meio de transmissão.

A probabilidade de ocorrência de interferência e de outros fatores que contribuem para a perda de dados é maior em enlaces de longas distâncias, aumentando à medida que a distância aumenta. Tal ocorrência influencia na qualidade da banda, que, em contra partida, corre menos riscos em enlaces de pequenas distâncias.

A existência de múltiplos *hops* possibilita maior alcance, devido à regeneração do sinal. Porém, estes mesmos múltiplos *hops* possibilitam a obtenção de melhor largura de banda em toda a rede em relação a rede de hop único, pois os dados são transmitidos através de vários *hops* pequenos, menos expostos à interferência que longos enlaces, apresentando qualidade do sinal com menos probabilidade de degradação. Além disso, como é necessária pouca energia para transmitir dados a curtas distâncias, a rede *mesh* suporta maior largura de banda com menor consumo de energia. Tal recurso se protege contra regulamentos como o da Comissão

Federal de Comunicações (*Federal Communications Commission* - FCC) americana ou da Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL) brasileira, que limitam a máxima energia de transmissão.

A principal característica inerente a resiliência que estes recursos proporcionam é a eficiência, pois contribui na criação de condições apropriadas ou ideais para a consecução da desejada transmissão.

3.3 ACESSO MAIS EFICIENTE

O IEEE 802.16 organiza a comunicação, definindo intervalos através de mapas para garantir acesso livre de colisão. Estes mapas definem a utilização dos intervalos, informando onde começa o intervalo liberado para uma determinada comunicação, seja no tráfego *uplink* (UL-MAP) ou no tráfego *downlink* (DL-MAP). Rede *Mesh* introduz outro benefício, não existente em redes de *hop* único, que é o reuso de espaço.

Conforme explicado anteriormente, numa rede de *hop* único, os dispositivos devem compartilhar um AP e dependem de sua existência para seu funcionamento. Se vários dispositivos tentarem acessar a rede de uma só vez, um congestionamento de tráfego pode ocorrer e o sistema se torna mais lento, ou até mesmo inoperante. Por outro lado, numa rede de múltiplos *hops*, vários dispositivos podem conectar-se à rede na mesma hora, através de nós diferentes, sem necessariamente degradar o desempenho do sistema. Faixas menores de transmissão numa rede em malha limitam a interferência, permitindo fluxos de dados simultâneos.

Se o acesso ao meio é organizado, diminuindo a possibilidade de colisão, e pontos ou nós alternativos são possíveis, evitando um provável congestionamento,

tais fatores contribuem para a disponibilidade da rede, tornando-a livre e desimpedida.

3.4 MODULAÇÃO ADAPTATIVA

Conforme abordado na seção 2.4.2.1, WiMAX provê um Sistema de Modulação Adaptativa que, embora tenha como consequência a redução da taxa de transferência, permite um aumento no alcance do sinal, variando seu esquema de modulação em QAM-64, QAM-16 ou QPSK. Com isso, a rede mantém sua finalidade, que efetivamente é proporcionar a transmissão, mesmo estando em situações adversas; e possibilita reação à ação indesejada. Tais recursos contribuem para sua eficiência e resistência, características estas também inerentes a resiliência.

3.5 SEGURANÇA

Conforme abordado na seção 2.4.3.1, a Subcamada de Segurança do padrão proporciona o sigilo das informações, a autenticação e autorização, a troca de chaves e a certificação digital, através de técnicas e protocolos eficientes. Tais recursos possibilitam uma comunicação segura e confiável no WiMAX, característica não menos importante e também inerente a resiliência.

4 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

WiMAX hoje é fato. Sua forma de prover uma tecnologia sem fio que possibilita suportar mais usuários, alcançar maiores distâncias, permitir tráfego multimídia e fornecer banda larga, com a qualidade de serviço, segurança mínima para suas aplicações e mobilidade, tornou-a uma tecnologia interessante e desafiadora.

A possibilidade de atuar numa topologia *Mesh*, possibilitando que um determinado ponto da rede assuma o papel de outro que venha apresentar problemas, e devolva o comando assim que ele recupere seu estado normal de operação, suscitou na concepção de um modelo de rede de banda larga sem fio resiliente. Porém, para a obtenção da resiliência, características devem ser observadas, tais como: flexibilidade; dinamicidade; eficiência; disponibilidade; segurança; e resistência.

No Capítulo 3, pôde-se observar diversos recursos encontrados no WiMAX, que abrangem as citadas características inerentes a resiliência, obtidas com a topologia *Mesh*, tais como: a independência do nó central (Seção 3.1); a proteção à interferência (Seção 3.2); a obtenção de uma forma de acesso mais eficiente (Seção 3.3); o uso do sistema de modulação adaptativa (Seção 3.4); e, por fim, mas não menos importante, sua forma de obtenção de segurança (Seção 3.5).

Diante das circunstâncias, redes WiMAX em topologia *mesh* possibilitam a concepção de um modelo de rede de banda larga sem fio resiliente.

A maioria das implementações, senão todas, voltadas para segurança, contingência e tolerância a falhas, envolvem custo. Quanto maior, mais caro será. Se combater uma ameaça for mais caro do que seu dano potencial, talvez não seja aconselhável tomar qualquer medida preventiva para combatê-la [6].

Para implantar uma tecnologia resiliente, uma minuciosa análise de risco torna-se fator fundamental para a concepção de um projeto em que se deseja obter resiliência. Contudo, a confirmação de uma tecnologia poder obter esta característica, agregando boa capacidade de conexão, banda larga, alcance a maiores distâncias, qualidade de serviço para tráfego multimídia, segurança e mobilidade, é fator importante para decisão.

Como proposta para trabalhos futuros, torna-se interessante a simulação de uma rede WiMAX na topologia *Mesh*, com o objetivo de obter informações quantificadas e estatísticas que comprovem sua resiliência.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ARANTES, Nélio. **Sistemas de Gestão Empresarial**: conceitos permanentes na administração de empresas válidas. 2. ed. São Paulo: Atlas, 1998.
- [2] AZEVEDO, Moacyr H. C. **Nota de Aula de Comunicação de Dados e Teleprocessamento**. Programa Management of Technology in Computer Networks (MOT CN) do Núcleo de Computação Eletrônica da Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2005.
- [3] BAINES, Rupert. **The Roadmap to Mobile WiMAX**. Disponível em <http://www.iee.org/oncomms/sector/communications/magazine.cfm?issue=66ID&articleID=A594851B-E511-5B9E-67F7F6A9D38281C9>. Acesso em Outubro de 2006.
- [4] CAO, Min; RAGHUNATHAN, Vivek; KUMAR, P. R. **A Tractable Algorithm for Fair and Efficient Uplink Scheduling of Multi-hop WiMax Mesh Networks**. Disponível em http://decision.csl.uiuc.edu/~prkumar/ps_files/06-08-11-WiMax-WiMesh.pdf. Acesso em dezembro de 2006.
- [5] CHENG, Shin-Ming; LIN, Phone; HUANG, Di-Wei; YANG, Shun-Ren. **A study on distributed/centralized scheduling for wireless mesh network**. International Wireless Communications and Mobile Computing Conference 2006, Vancouver, British Columbia, Canada, 2006.
- [6] DIAS, Cláudia. **Segurança e Auditoria da Tecnologia da Informação**. Rio de Janeiro: Axcel Books, 2000.
- [7] DORMAN, Andy. **Wireless Communication**: O Guia essencial da comunicação sem fio. Rio de Janeiro: Campus, 2001. 304p.
- [8] EKLUND, Carl; MARKS, Roger B.; STANWOOD, Kenneth L; WANG, Stanley. **IEEE Standard 802.16: A Technical Overview of the WirelessMAN™ Air Interface for Broadband Wireless Access**. IEEE C802.16-02/05. 4 Jun 2002.
- [9] FERREIRA, A. B. de H. **Novo Aurélio**: O Dicionário do Século XXI. São Paulo: Nova Fronteira, 1999.
- [10] HOUAISS, Antônio. **Dicionário Houaiss da língua portuguesa**. Instituto Antônio Houaiss. São Paulo: Objetiva, 2001.
- [11] RATH, Kamlesh; KOTECHA, Lalit; PERSH, Howard; DAS, Deb R.; TON, Dat. **Scalable Connection Oriented Mesh Proposal**. IEEE C802.16d-03/18. 6 Mar 2003.
- [12] IEEE Standard for Local and metropolitan area networks. **Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems**. IEEE Std 802.16™ – 2004, 1 Out 2004.

- [13] _____. **Part 16: Air Interface for Fixed and Mobile Broadband Wireless Access Systems**. IEEE Std 802.16e™-2005 and IEEE Std 802.16™-2004/Cor1-2005, 28 Feb 2006.
- [14] JÚNIOR, Arthur R. S. **Projetos de redes locais sem fio (Wireless LAN)**. Belo Horizonte: Instituto Online Informática, 2005.
- [15] KURANA, Mehmet S.; TUGCU, Tuna; ALAGOZA, Fatih. **A survey on emerging broadband wireless access technologies**. aComputer Engineering, Bogazici University, Bebek 34342, Istanbul, Turkey. Dezembro 2006.
- [16] LAWTON, George. **What lies ahead for cellular technology**. IEEE International Symposium on Multimedia (ISM2005). Dez 2005, Irvine, California, USA. pp. 14–17.
- [17] NAIR, Govindan. **IEEE 802.16 Medium Access Control and Service Provisioning**. Intel Technology Journal. Volume 08, Issue 03. 2004. Disponível em http://download.intel.com/technology/itj/2004/volume08issue03/art05_multiantenna/vol8_art05.pdf. Acesso em janeiro de 2007.
- [18] Nortel White Paper. **MIMO or AAS: Key technology choice in deploying WiMAX**. 2006. Disponível em <http://www.nortel.com/solutions/wimax/collateral/nn118160.pdf>. Acesso em janeiro de 2007.
- [19] PIRMEZ, Luci. **Nota de Aula de Redes sem Fio**. Programa Management of Technology in Computer Networks (MOT CN) do Núcleo de Computação Eletrônica da Universidade Federal do Rio de Janeiro – 16/11/2004.
- [20] PRADO, Eduardo. **Uma grande notícia: O WiMAX móvel foi aprovado!** Disponível em http://www.wirelessbrasil.org/wirelessbr/colaboradores/eduardo_prado/artigo_53.html. Acesso em Julho de 2006.
- [21] RORIZ, Ricardo B. **Antenas Inteligentes**. Monografia apresentada como requisito parcial para conclusão da disciplina de Transmissão de Dados, Bacharelado em Ciência da Computação. Universidade de Brasília. 2006.
- [22] ROSA, Hélio. **Construindo um mundo sem fios com tecnologia de rede em malha (Mesh Network)**. Jun 2006. Disponível em http://www.wirelessbrasil.org/wirelessbr/index.php?option=com_content&task=view&id=128&Itemid=57. Acesso em Janeiro de 2007.
- [23] TANENBAUM, Andrews S., **Redes de Computadores**. Tradução da quarta edição. Rio de Janeiro: Editora Campus, 2003.
- [24] WiMAX Forum. **Fixed, nomadic, portable and mobile applications for 802.16-2004 and 802.16e WiMAX networks**. Nov 2005. Disponível em: http://www.wimaxforum.org/technology/downloads/Applications_for_802.16-2004_and_802.16e_WiMAX_networks_final.pdf. Acesso em fevereiro de 2007.

[25] White Paper WiMAX Forum. **IEEE 802.16a Standard and WiMAX Igniting Broadband Wireless Access**. 2004.

[26] WiMAX Forum. **Mobile WiMAX – Part I: A Technical Overview and Performance Evaluation**. Fev 2006. Disponível em http://www.intel.com/netcomms/technologies/wimax/WiMAX_Overview_v2.pdf. Acesso em Outubro de 2006.

[27] _____. **WiMAX Forum Board Members**. Disponível em <http://www.wimaxforum.org/about/board/>. Acesso em Janeiro de 2007.

[28] YUNES, M. A. M. **Psicologia Positiva e Resiliência: o foco no indivíduo e na família**. Maringá, 2003.