

**Charlene Souza Chiella**

***Utilização de Técnicas de Múltiplas Antenas no  
Padrão IEEE 802.16***

São José – SC  
setembro / 2008

**Charlene Souza Chiella**

***Utilização de Técnicas de Múltiplas Antenas no  
Padrão IEEE 802.16***

Monografia apresentada à Coordenação do Curso Superior de Tecnologia em Sistemas de Telecomunicações do Centro Federal de Educação Tecnológica de Santa Catarina para a obtenção do diploma de Tecnólogo em Sistemas de Telecomunicações.

Orientador:

Prof. Mario de Noronha Neto

Co-orientador:

Prof. Rubem Toledo Bérghamo

CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM SISTEMAS DE TELECOMUNICAÇÕES  
CENTRO FEDERAL DE EDUCACAO TECNOLOGICA DE SANTA CATARINA

São José – SC  
setembro / 2008

Monografia sob o título “Utilização de Técnicas de Múltiplas Antenas no Padrão IEEE 802.16”, defendida por Charlene Souza Chiella e aprovada em 11 de setembro de 2008, em São José, Santa Catarina, pela banca examinadora assim constituída:

---

Prof. M. Rubem Toledo Bérghamo  
Co-orientador

---

Prof. André Luiz Alves  
CEFET / SC

---

Prof. Dr. Golberi Salvador Ferreira  
CEFET / SC

*Creio que o principal objetivo da educação deve ser encorajar os jovens a duvidarem de tudo aquilo que se considera estabelecido. O importante é a independência do espírito.*

*Bertrand Russel*

# *Agradecimentos*

Agradeço antes de tudo a Deus por me permitir estar aqui e concluir mais uma das etapas da minha vida das muitas que sei que virão.

Em especial aqueles que muito me deram, além da vida, meus pais, e que aqui jamais conseguirei dizer o quão grata eu sou a esses seres tão especiais e que amo acima de tudo e de todos!

A minha família que mesmo distante e mesmo não tendo diretamente participado deste processo, com certeza os agradeço por serem meu alicerce emocional e em saber que tenho tantos que olham e torcem por mim. Ao meu avô materno, que não está mais entre nós, agradeço pelo ensinamento deixado aos seus filhos e netos principalmente por mostrar que a maior herança que alguém pode deixar ao seu descendente é a educação. Aqueles que também não estão mais presentes, mas que muito amei e sinto saudades, meus avôs paternos.

Ao meu namorado, Ramon, que sempre esteve do meu lado compreendendo que em alguns momentos não pude acompanhá-lo em suas vontades por estar concentrada em um objetivo específico que é este TCC. Agradeço também por muitas vezes deixar seus afazeres em segundo plano para me ajudar.

Aos meus tão estimados amigos gostaria além de agradecer, dizer que vocês são raros e por isso eu os guardo como se fossem diamantes e deixo claro minha disposição em ajudá-los sempre que precisarem. Agradeço a vocês pelas festas, as horas que dedicamos juntos aos trabalhos, inclusive aquelas que ficamos até quase meia-noite no CEFET, ou aquelas em que nos reuníamos nos finais de semanas, e para quem estiver lendo, acredite: nos reunimos para estudar! Afinal tivemos professores, bons professores por assim dizer, que nos deram cansaço.

Falando em professores, agradeço-os não só pelos ensinamentos lógicos ou racionais, mas também sei que muito da minha educação foi construída através deles e não falo só dos professores do Tecnólogo, mas também do Técnico e do Ensino Médio. Entre estes dedico especial atenção a Professora Mara, acho que ela nem deve mais se lembrar de mim, mas eu me lembro dela que me ensinou antes de tudo, ser humana. Ao Vidomar que além de ter sido um excelente Professor de Língua Portuguesa, sempre ensinou a mim e aos meus colegas, a sermos muito críticos. Ao professor Volnei V. Rodrigues que admiro muito e que por sua perfeição e planejamento em cada aula dada me inspirou em como eu deveria me organizar e

acreditar que com organização os problemas se tornam mais fáceis de serem resolvidos. Aos professores que duvidaram de quanto eu podia eu lhes digo que cheguei ao final e lhes digo, ainda, OBRIGADA por terem duvidado, pois só assim pude tomar como desafio tarefas que jamais sonhei realizar e, no entanto realizei. Não poderia deixar de agradecer ao Professor e amigo Evandro Cantú que em toda minha trajetória no curso sempre me auxiliou.

Por fim agradeço aos meus orientadores por fazerem exatamente isto, me orientarem, cada um com sua contribuição. Tenho certeza que fiz uma boa escolha e as escolhas nos fazem criar rumos e é por acreditar no potencial deles que creio que o rumo que escolhi é o certo.

# *Resumo*

Este trabalho tem por objetivo estudar uma técnica muito conhecida e eficiente em sistemas de comunicações sem fio, a técnica Alamouti. A fim de poder observar de uma maneira mais minuciosa esta técnica, foi optado por além de estudá-la, também aplicá-la a um padrão específico que no caso o escolhido foi o padrão IEEE 802.16. O motivo desta escolha está no fato desta tecnologia estar no mesmo nível dos padrões de terceira geração de comunicações móveis celulares.

O estudo realizado será na camada de enlace e física da tecnologia vigente sendo a camada física o enfoque do trabalho, visto que é nessa camada que ocorre a utilização da técnica de múltiplas antenas, Alamouti. Junto a esse estudo serão exploradas também outras técnicas de múltiplas antenas, tais como, Antenas Inteligentes, Combinação de Máxima Razão na Recepção e Sistemas de Seleção de Antenas.

Para obter um maior embasamento neste projeto, serão realizadas simulações variando o número de antenas tanto na transmissão como na recepção. Seguindo a mesma vontade de aprofundar mais essa técnica de Codificação Espaço-Temporal, ela será descrita matematicamente e por fim, graficamente, onde será possível observar o ganho do sinal de cada uma das simulações e inclusive o resultado comparativo entre elas.

Palavras-chave: Comunicações sem fio, WiMAX, MIMO, OFDM.

# *Abstract*

This work aims to explore a very known technique and highly efficient in systems for wireless communications, the Alamouti technical. In order to observe of more detailed way this technique, was chosen in addition to studying it, also apply it in a specific standard, in the case the chosen went the standard IEEE 802.16. The reason this choice is in the fact this technology be of the same level of standards of third generation of celular.

The study made will be in physical and data link layer of the current technology, where the physical layer is the focus this work, since it is this layer that occur the use of the multiple antennas technical, Alamouti. At the same time will be explored also others techniques of multiple antennas, such as, Smart Antennas, Combination of Ratio Maximum at the Reception and Selection of Antennas.

For a more deepen in this work, will be carried simulations varying the number of antennas both in transmission and the receiving end. Following the same desire of more deepen this technique of Space Time Codes, it will be describe mathematically and by end, graphically, where will can observe the gain of signal from each of the simulations and even the result comparison between them.

Words-key: Wireless Communication, WiMAX, MIMO, OFDM.



# *Sumário*

<b>Sumário .....</b>	<b>9</b>
<b>Lista de Figuras .....</b>	<b>10</b>
<b>Lista de Tabelas.....</b>	<b>11</b>
<b>Lista de Acrônimos .....</b>	<b>12</b>
<b>1 Introdução .....</b>	<b>16</b>
1.1 Motivação.....	16
1.2 Organização do texto.....	17
1.3 Objetivos .....	17
<b>2 O Sistema WiMAX .....</b>	<b>18</b>
2.1 Introdução.....	18
2.2 Funcionamento do WiMAX.....	20
2.3 Especificações Técnicas do WiMAX.....	21
<b>3 Algumas considerações sobre o WiMAX.....</b>	<b>34</b>
3.1 Aplicações .....	34
3.2 Regulamentação do WiMAX no Brasil e no mundo.....	34
<b>4 Utilização da Técnica de Múltiplas Antenas no Sistema WiMAX .....</b>	<b>36</b>
4.1 Técnicas de Múltiplas Antenas.....	36
4.2 Técnicas de Múltiplas Antenas utilizadas no sistema WiMAX.....	40
<b>5 Conclusões .....</b>	<b>47</b>
<b>Referências Bibliográficas .....</b>	<b>48</b>

## *Lista de Figuras*

Figura 2.1:	Funcionamento do WiMAX.....	20
Figura 2.2:	Protocolo da camada MAC e física.....	21
Figura 2.3:	Modulador e Demodulador OFDM.....	28
Figura 3.1:	Classificação do sistema de acordo com o número de antenas .....	37
Figura 3.2:	Distribuição de usuários em uma transmissão com feixes formatados.....	39
Figura 3.3:	Técnicas de antenas adaptativas.....	40
Figura 3.4:	Esquema de transmissão Alamouti .....	42
Figura 3.5:	Simulador MISO .....	44
Figura 3.6:	Decodificador Alamouti MISO.....	44
Figura 3.7:	Simulador SISO .....	44
Figura 3.8:	Simulador MIMO.....	45
Figura 3.9:	Decodificador de Alamouti MIMO.....	45
Figura 3.10:	Gráfico comparativo entre SISO, MISO e MIMO.....	46

## *Lista de Tabelas*

Tabela 2.1:	Componentes dos padrões IEEE 802.16d e IEEE 802.16e.....	27
Tabela 3.1:	Tabela exemplificando a matriz de transmissão Alamouti 2x1 .....	41
Tabela 4.1:	Regulamentação WiMAX.....	35

## *Lista de Acrônimos*

### **A**

AAS (*Adaptative Antennas System* – Sistema de Antenas Adaptativas)  
ADSL (*Asymmetric Digital Subscriber Line* – Linha Assimétrica Digital de Assinante)  
AES (*Advanced Encryption Standard* – Padrão de Criptografia Avançado)  
AMC (*Adaptative Modulation and Coding* – Codificação e Modulação Adaptativa)  
ANATEL (Agência Nacional de Telecomunicações)  
ARQ (*Automatic Repeat Request* – Retransmissão Automática)  
AT&T (*American Telephone and Telegraph* – Companhia Americana de Telecomunicações)  
ATM (*Asynchronous Transfer Mode* – Modo de Transferência Assíncrono)  
AWGN (*Additive White Gaussian Noise* – Ruído Gaussiano Branco Aditivo)

### **B**

BE (*Best Effort* – Melhor Esforço)  
BER (*Bit Error Ratio* – Taxa de Erro de Bit)  
BS (*Base Station* – Estação Base)

### **C**

CID (*Connection ID* – Identificador de Conexão)  
CPS (*Common Part Sublayer* – Subcamada de Serviço Comum)

### **D**

DCD (*Downlink Channel Descriptor* – Canal Descritor do *Downlink*)  
DFS (*Dynamic Frequency Selection* – Seleção de Frequência Dinâmica)  
DHCP (*Dynamic Host Configuration Protocol* – Protocolo de Configuração Dinâmica de Endereço de Rede)  
DL (*Downlink* – Enlace direto)  
DL FUSC (*Downlink Full Usage of Subcarriers* – Uso Completo de Subportadoras no *Downlink*)  
DLMAP (Mapa de Alocações no sentido *Downlink*)  
DMI (*Direct Matrix Investment* – Inversão de Matriz Direta)

### **E**

E1 (Padrão de Linha Telefônica Digital Europeu)  
ERB (Estação Rádio Base)  
ErtPS (*Extended real-time Polling Service* – Serviço Extendido de taxa variável em tempo real)

**F**

FBSS (*Fast Base Station Switching* – Troca Rápida de Estação Base)  
 FFT (*Fast Fourier Transformed* – Transformada Rápida de Fourier)  
 FIR (*Finite Impulse Response* – Resposta ao Impulso Infinito)  
 FDD (*Frequency Division Duplex* – Duplexação por Divisão da Frequência)  
 FDMA (*Frequency Division Multiple Access* – Acesso Múltiplo por Divisão na Frequência)  
 FFT (*Fast Fourier Transformed* – Transformada Rápida de Fourier)

**H**

H-ARQ (*Hybrid ARQ* – ARQ Híbrido)  
 H-FDD (*FDD Half-duplex* – FDD semi-duplex)  
 HDTV (*High-definition Television* – Televisão de Alta Definição)  
 HHO (*Hard Handoff* – Handoff perceptível)

**I**

IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers* – Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos)  
 IFFT (*Inverse Fast Fourier Transformed* – Transformada Inversa Rápida de Fourier)  
 ICI (*Inter-carrier Interference* – Interferência entre Portadoras)  
 IP (*Internet Protocol* – Protocolo de Internet)  
 IPv4 (*Internet Protocol version 4* – Protocolo de Internet versão 4)  
 IPv6 (*Internet Protocol version 6* – Protocolo de Internet versão 6)  
 ITU (*International Telecommunications Union* – União Internacional das Telecomunicações)

**L**

LMDS (*Local Multipoint Distribution System* – Sistema de Distribuição de Multiponto Local)  
 LMS (*Least Mean Square* – Algoritmo de Média Quadrática Mínima)

**M**

MAC (*Medium Access Control* – Camada de Controle de Acesso ao Meio)  
 MAN (*Metropolitan Access Network* – Rede de Acesso Metropolitano)  
 MDHO (*Macro Diversity Handover* – Macro Diversidade no Handover)  
 MIMO (*Multiply Input Multiply Output* – Múltiplas Entradas Múltiplas Saídas)  
 MISO (*Multiply Input Single Output* – Múltiplas Entradas Única Saída)  
 MRRC (*Maximum Ratio of Reception Combining* – Combinação de Máxima Razão na Recepção)  
 MS (*Mobile Station* – Estação Móvel)

**N**

nrtPS (*non-real-time Polling Service* – Serviço de taxa variável em tempo não real)

**O**

OFDM (*Orthogonal Frequency-Division Multiplex* – Multiplexação por Divisão na Frequência Ortogonal)

OFDMA (*Orthogonal Frequency-Division Multiple Access* – Acesso Múltiplo por Divisão na Frequência Ortogonal)

**P**

PUSC (*Partial Usage of Subcarriers* – Uso Parcial de Subportadoras)

**Q**

QAM (*Quadrature Amplitude Modulation* – Modulação em Amplitude e Quadratura)

QoS (*Quality of Service* – Qualidade de Serviço)

QPSK (*Quadrature Phase Shift Keying* – Chaveamento de Fase em Quadratura)

**R**

RSR (Relação Sinal Ruído)

rtPS (*real-time Polling Service* – Serviço de taxa variável em tempo real)

**S**

SAP (*Point of Access for Service* – Ponto de Acesso de Serviço)

SDU (*Service Data Unit* – Unidade de Dados de Serviço)

SC (*Single Carrier* – Portadora Única)

SCa (*Single Carrier advanced* – Portadora Única avançada)

SHO (*Soft Handoff* – Handoff Imperceptível)

SIM (*Subscriber Identify Module* – Módulo de Identificação do Assinante)

SIMO (*Single Input Multiply Output* – Única Entradas Múltiplas Saídas)

SNMP (*Simple Network Management Protocol* – Protocolo Simples de Gerência de Redes)

SNR (*Signal-Noise Ratio* – Relação Sinal Ruído)

SISO (*Single Input Single Output* – Única Entrada Única Saída)

SOFDMA (*Scalable OFDMA* – OFDMA Escalável)

SS (*Subscriber Station* – Estação Cliente)

SSCS (*Service Specific Convergence Sublayer* – Subcamada de Convergência de Serviços Específicos)

STC (*Space-Time Coding* – codificação Espaço-Tempo)

**T**

T1 (Padrão de Linha Telefônica Digital dos Estados Unidos e Japão)

TDD (*Time Division Duplex* – Duplexação por Divisão do Tempo)

TDMA (*Time Division Multiple Access* – Acesso Múltiplo por Divisão no Tempo)

**U**

UCD (*UL Channel Descriptor* – Canal Descritor de *Uplink*)

UL (*Uplink* – Enlace reverso)

UGS (*Unsolicited Grant Service* – Concessão de Serviços não-Solicitados)

## V

V-BLAST (*Vertical-Bell Laboratories Layered Space-Time*)

VLAN (*Virtual Local Area Network* – Área de Acesso Local Virtual)

VOIP (*Voice over IP* – Voz Sobre IP)

## W

Wi-Fi (*Wireless Fidelity* – Interconexão de Dispositivos sem Fio)

Wi-MAX (*Worldwide Interoperability for Microwave Access* – Interoperabilidade Mundial para Acesso de Microondas)

WMAN ou Wireless MAN (*Wireless Metropolitan Area Network* – Rede sem Fio de Acesso Metropolitano)

WWAN (*Wireless World Area Network* – Rede sem Fio de Acesso Mundial)

3G (Terceira Geração)

3GPP (*Third Generation Partnership Project* – Projetos Parceiros de Terceira Geração)

# ***1 Introdução***

## **1.1 Motivação**

Há tempos vem se tentando uma conciliação entre a comodidade que traz a comunicação sem fio e as elevadas taxas de transmissão. Com o avanço tecnológico, tanto de software quanto de hardware, esta conciliação vem se tornando realidade. Uma das técnicas que está contribuindo de maneira significativa para esta realidade é a técnica de múltiplas antenas. Diversos sistemas já estão utilizando esta técnica, entre eles estão a maioria dos sistemas 3G (terceira geração) de comunicações celulares e o sistema WiMAX (*Worldwide Interoperability for Microwave Access* – Interoperabilidade Mundial para Acesso de Microondas).

Neste trabalho optou-se por estudar a utilização de técnicas de múltiplas antenas no sistema WiMAX. O motivo desta escolha está nos ganhos que um sistema de comunicação sem fio pode obter utilizando múltiplas antenas para transmitir e receber sinais e também pela oportunidade de estudar um padrão de transmissão sem fio que está surgindo como uma das opções para acesso a Internet banda larga sem fio fixa e móvel. Com o estudo do padrão citado, pretende-se adquirir conhecimento sobre diversas técnicas utilizadas para a transmissão de sinais, tais como codificação de canal, OFDM (*Orthogonal Frequency-Division Multiplexing* – Multiplexação por Divisão na Frequência Ortogonal) e OFDMA (*Orthogonal Frequency-Division Multiple Access* – Acesso Múltiplo por Divisão na Frequência Ortogonal).



## 1.2 Organização do texto

O texto será organizado da seguinte forma: no Capítulo II será feito todo um estudo sobre o WiMAX, contendo sua evolução com enfoque nos padrões IEEE 802.16d (*Institute of Electrical and Electronics Engineers* – Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos) e IEEE 802.16e, bem como suas camadas MAC (*Medium Access Control* – Camada de Controle de Acesso ao Meio) e física. Esta última camada também com maior enfoque. Posteriormente será feita uma abordagem sobre as técnicas conhecidas de múltiplas antenas com uma maior atenção as antenas adaptativas. Dando continuidade, no Capítulo III, o estudo ficará restrito a técnica de Alamouti (PROJETO MI-SBTVD: STC-OFDM E ESTIMAÇÃO DE CANAL, 2006) e em como ela se comporta dentro da tecnologia aqui verificada. Por último, no Capítulo IV, a abordagem ficará por parte das aplicações do WiMAX e a regulamentação do mesmo.

## 1.3 Objetivos

- Estudar o padrão IEEE 802.16;
- Estudar a técnica de Múltiplas Antenas;
- Simular a transmissão 1TX-1RX;
- Simular a técnica de Alamouti 2TX-1RX;
- Simular a técnica de Alamouti 2TX-2RX;
- Simular as três transmissões acima com entrelaçamento e codificação.
- Simular a técnica de Antenas Adaptativas.

## 2 *O Sistema WiMAX*

### 2.1 Introdução

O WiMAX é uma tecnologia emergente de interface sem fio para redes WMAN (*Wireless Metropolitan Area Network* – Rede sem fio de Acesso Metropolitano) e WWAN (*Wireless World Area Network* – Rede sem fio de Acesso Mundial) especificada pela família de padrão IEEE 802.16.

O padrão tem por objetivo fornecer a parte final da infra-estrutura de conexão de banda larga *last mile*<sup>1</sup>. Oferece conectividade para uso doméstico, empresarial e *hotspots*<sup>2</sup>, com longo alcance, altas taxas de transmissão, sem necessidade de investimentos de alto custo em infra-estrutura e implementação, com seu desempenho equivalente ao ADSL (*Asymmetric Digital Subscriber Line* – Linha Assimétrica Digital de Assinante) e ao *cable modem*<sup>3</sup>. Por esse motivo os maiores beneficiários, mas não os únicos, deste padrão serão as áreas rurais e de difícil acesso que não possuem uma infra-estrutura de cabeamento telefônico ou TV a cabo, já que são tecnologias que necessitam de alto custo na implementação e que, portanto não compensaria devido à baixa demanda comercial.

Por outro lado, as áreas rurais não são os únicos a se beneficiarem com o padrão, pois como possui características de padrões de terceira geração, poderá provê mobilidade e algumas vantagens a mais do que foi esperado inicialmente. Um exemplo do que IEEE 802.16e é capaz de oferecer, está descrito em (IV FORUM ABEE-EEEC/UFG, 2008), onde esta revisão possui um sistema de segurança melhor com protocolo de autenticação extensível e uso de cartões SIM (*Subscriber Identity Module* – Módulo de Identificação do Assinante) e também suporta VoIP (*Voice over Internet Protocol* – Voz sobre Protocolo de Internet) sem a

---

<sup>1</sup> Última milha - Ponto de acesso central até o usuário final.

<sup>2</sup> Local que tenha ponto de acesso WiFi para uso público.

<sup>3</sup> Modem a cabo.

degradação do serviço. Sua cobertura está na ordem de quilômetros, provê baixa latência<sup>4</sup>, segurança avançada, capacidade de *roaming*<sup>5</sup> mundial e interfaces para redes IP (*Internet Protocol* – Protocolo de Internet), ATM (*Asynchronous Transfer Mode* – Modo de Transferência Assíncrono), E1/T1<sup>6</sup>, e ethernet.

O termo WiMAX surgiu de um fórum conhecido como WiMAX Fórum, organização sem fins lucrativos fundada em abril de 2001, que tem como missão principal certificar os produtos WiMAX garantindo a interoperabilidade entre os equipamentos baseados no padrão IEEE 802.16, além de propor serviços de acesso, permitir economia de escala que reduzam o custo dos equipamentos e promover a tecnologia. A organização é composta predominantemente por fabricantes de equipamentos e *chipsets*<sup>7</sup>, possui cerca de 400 membros como Siemens, AT&T (*American Telephone and Telegraph* – Companhia Americana de Telecomunicações), British Telecommunications, France Telecom, Qwest e é liderado pela Intel e Nokia. Apenas produtos que passem por testes padronizados pelo WiMAX Fórum podem receber o nome WiMAX.

Com o passar do tempo o WiMAX vem suprindo as deficiências encontradas através de versões do padrão original que foi concluído em 2001 e publicado em Abril de 2002. Após essa tentativa inicial, foram criados padrões denominados IEEE 802.16a, IEEE 802.16b, IEEE 802.16c, IEEE 802.16d (ou IEEE 802.16 – 2004), e IEEE 802.16e (ou IEEE 802.16 – 2005). Sendo o IEEE 802.16-2004 a otimização e junção de todos os anteriores a ele e o IEEE 802.16-2005 aquele que prove mobilidade (suporte a *handoff*<sup>8</sup> e *roaming*) e outras melhorias em relação ao IEEE 802.16-2004, tais como, o uso da técnica de Alamouti nos dois enlaces, direto e reverso, já que no padrão IEEE 802.16d é possível utilizar apenas no *downlink*<sup>9</sup>, controle de potência, modulação adaptativa, OFDMA, esquemas de subcanalização e H-ARQ (*Hybrid Automatic Repeat Request*- Retransmissão Automática Híbrida).

A seguir, será explicado o funcionamento de um sistema de transmissão que se utiliza desta tecnologia.

---

<sup>4</sup> Atraso.

<sup>5</sup> Garante a conectividade do usuário de uma rede sem fio ao se deslocar para uma área fora daquela em que ele esteja registrado.

<sup>6</sup> Respectivamente, Padrão de Linha Telefônica Digital Europeu e Japonês, este último também usado pelos Estados Unidos da América.

<sup>7</sup> Grupo de circuitos integrados que são projetados para trabalhar em conjunto e que são geralmente comercializados como um produto único.

<sup>8</sup> Transição da unidade móvel de uma célula para outra de forma transparente ao usuário.

<sup>9</sup> Enlace de comunicação no sentido direto, ou seja, da Estação Base à Estação Móvel.

## 2.2 Funcionamento do WiMAX

Segundo (WORKSHOP DE INFORMÁTICA PoP-PI/RNP) há dois tipos de topologias de acesso que permitem o funcionamento do sistema WiMAX, como mostra a Figura 2.1, são elas: topologia ponto-a-ponto e ponto-multiponto. Nesta Figura as BSs (*Base Station* – Estação Base) se conectam ao usuário final através da distribuição do sinal entre as SSs (*Subscriber Station* – Estação Cliente) espalhadas pela cidade estabelecendo, assim, uma comunicação ponto-multiponto. Esse sinal pode utilizar a estrutura já existente da rede WiFi e atendendo tanto a clientes com redes locais como, também, residenciais.

Opcionalmente uma SS pode receber o sinal de outra SS constituindo uma terceira topologia comumente chamada de redes *mesh*<sup>10</sup>. Essa forma de comunicação é bastante útil quando há a necessidade de aumentar o número de usuários sem que se faça necessário a instalação de novas BSs. (PROJETO MI-SBTVD: STC-OFDM E ESTIMAÇÃO DE CANAL, 2006) Especificamente para o padrão IEEE 802.16e esta tecnologia não poderá ser utilizada, pois as SSs funcionam apenas como repetidoras, sendo, portanto incapazes de realizar, por exemplo, um *handoff* que é muito utilizado quando se trata de mobilidade.

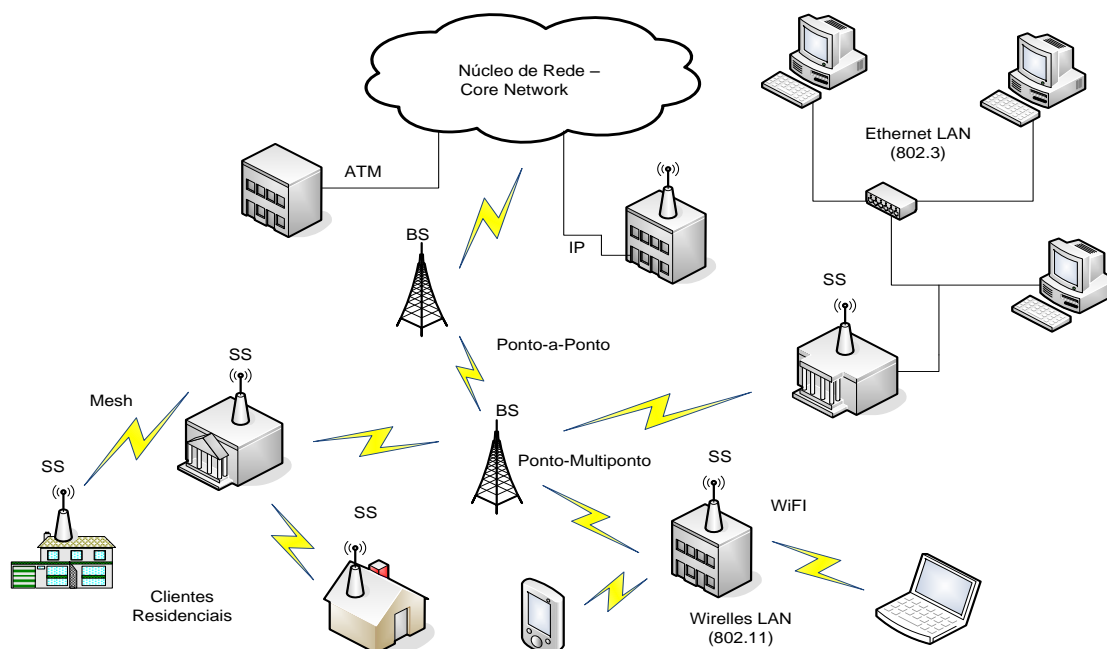


Figura 2.1: Funcionamento do WiMAX

<sup>10</sup>

Permite a uma SS repetir o sinal da BS à outra(s) SS(s), é também conhecida como rede em malha.

## 2.3 Especificações Técnicas do WiMAX

Para (FIGUEIREDO, Fabrício Lira, 2004) a norma especifica uma camada de enlace e cinco tecnologias de acesso na camada física.

Em (VIII JORNADA DE ATUALIZAÇÃO TECNOLÓGICA, 2006) a camada de enlace é dividida em três subcamadas representadas aqui pela Figura 2.2: a SSCS SAP (*Service Specific Convergence Sublayer Service Access Point* – Ponto de Acesso de Serviço a Subcamada de Convergência de Serviços Específicos), MAC SAP (*Medium Access Control Service Access Point* – Ponto de Serviço de Acesso a Subcamada Comum de Acesso ao Meio) e Subcamada de Segurança. Há uma quarta subcamada, pertencente à camada física que tem a função de isolar a transmissão física das diferentes tecnologias da camada de enlace.

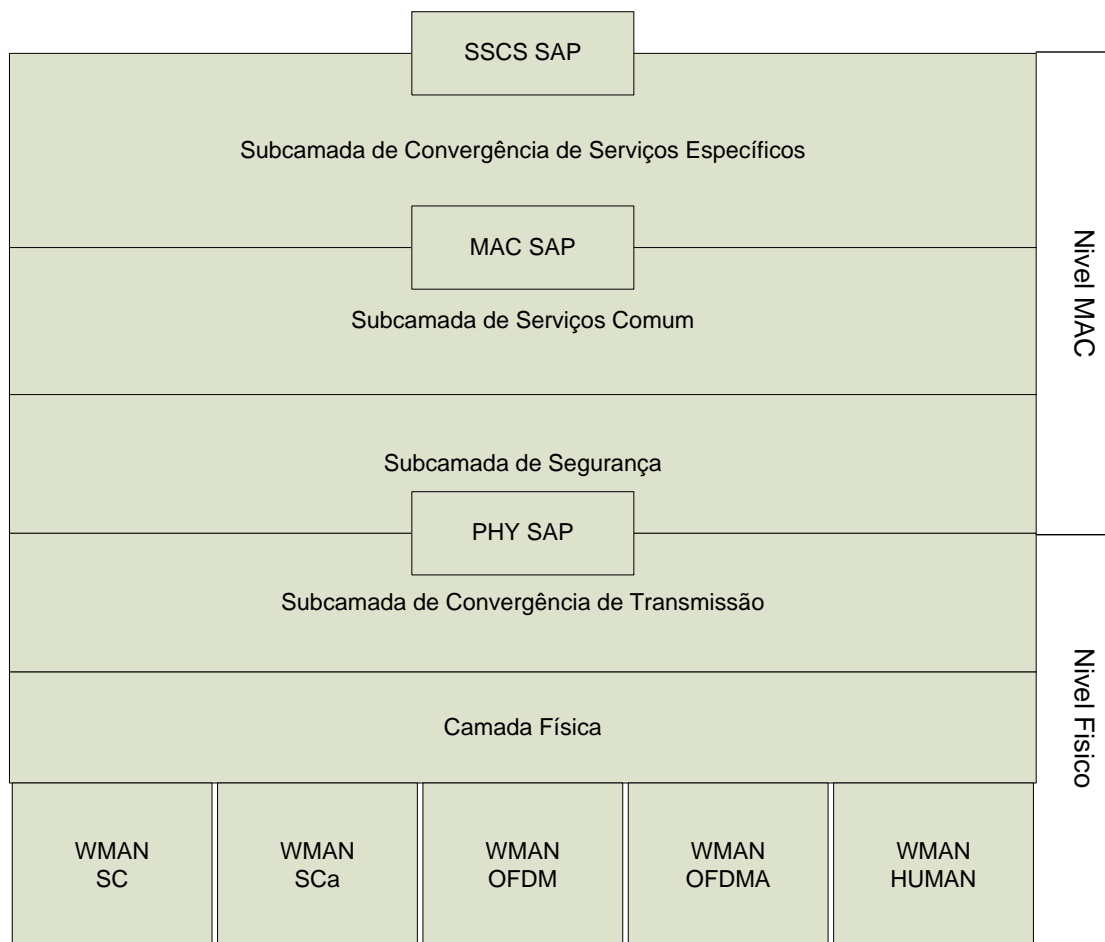


Figura 2.2: Protocolo da camada MAC e física

## Camada MAC

A camada MAC é responsável pelo controle de acesso ao meio e gerenciamento de QoS (*Quality of Service* – Qualidade de Serviço). Possui suporte para:

- Camada física;
- Segurança;
- Sincronismo;
- Sistemas com Antenas Adaptativas e
- Topologia *mesh*.
- DFS (*Dynamic Frequency Selection* – Seleção de Frequência Dinâmica).

O DFS é utilizado para troca de canal caso haja interferência, além de possibilitar aplicações de tempo real ao introduzir maior latência no sistema para detectar e evitar interferências em bandas não licenciadas (THELANDER, Michael W., 2005). A seguir serão apresentadas as três camadas MAC já conhecidas:

- **Subcamada de Convergência de Serviços Específicos** – funciona como uma camada de adaptação, já que realiza funções que dependem de camadas superiores. Elas são específicas porque diferem de acordo com a tecnologia do cliente que pode ser ATM ou por pacotes (IP, PPP<sup>11</sup> e Ethernet), sendo que comporta as duas versões de IP: IPv4 (*Internet Protocol version 4* – Protocolo de Internet versão 4), IPv6 (*Internet Protocol version 6* – Protocolo de Internet versão 6), Ethernet e VLAN (*Virtual Local Access Network* – Rede de Acesso Local Virtual). Sua tarefa principal é de classificar SDUs (Service Data Unit – Unidade de Dados de Serviço) de uma conexão MAC, permitir QoS e alocar largura de banda. Esses SDUs funcionam como sub-cabeçalhos dos quadros transmitidos. Existem seis tipos de SDUs, importando neste momento apenas dois que são a fragmentação e o empacotamento. O primeiro é utilizado quando a tecnologia do cliente é ATM onde há a necessidade de fragmentação da informação em células de tamanho fixo igual a 53 bytes como é mostrado em (UNICAMP, 2006). Já o segundo é usado em transmissão por pacotes.
- **Subcamada de Serviço Comum** – possui mecanismo para requisição de largura de banda, associação de parâmetros de QoS e tráfego, transporte e roteamento de dados. Independentemente do tipo de informação a ser transmitida é necessário o estabelecimento de conexão. Estas conexões podem ser divididas em três:
  - Conexão básica: usada para enviar mensagens urgentes entre SS e BS;

---

<sup>11</sup> Protocol Point-to-Point é um protocolo de transmissão de pacotes através de linha seriais.

- Conexão primária: por permitir atrasos maiores não são tão urgentes;
- Conexão secundária: é opcional e permite envio de mensagens tais como DHCP (*Dynamic Host Configuration Protocol* – Protocolo de Configuração Dinâmica de Endereço de Rede), e SNMP (*Simple Network Management Protocol* – Protocolo Simples de Gerência de Rede) (NAVES, Sanzio Guilherme; CHAN, Rodrigo Adolfo; ALBERTI, Antônio Marcos, 2005).

Para cada assinante é alocado um quadro de 48 bits que representa um *slot*<sup>12</sup> de tempo na camada física, sendo que 16 desses 48 são utilizados para identificar o tipo de conexão que faz referência ao campo CID (*Connection ID* – Identificador de Conexão) resultando em um total de 64.000 conexões por canal (RIBEIRO, Vitor Ferreira, 2007).

De acordo com (SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TELECOMUNICAÇÕES, 2007) o controle de acesso ao meio garante QoS através de mecanismos dinâmicos de reserva de banda e priorização de tráfego. Para tal é definido um conjunto de mensagens no estabelecimento de conexão, alocação de banda e configuração, sendo as mais importantes:

- DL-MAP (*Downlink MAP* - Mapa de Alocações *downlink*) e UL-MAP (*Uplink MAP* - Mapa de Alocações *uplink*): mensagens que carregam informações sobre a alocação de banda para todos os MSs (*Mobile Station* – Estação Móvel), inclusive para funções especiais como canais de retorno para H-ARQ e MIMO (*Multiple Input Multiple Output* – Múltiplas Entradas Múltiplas Saídas), definem bandas em termos de números de sub-canais (forma como são classificados os enlaces direto e reverso) e números de símbolos OFDMA;
- DCD (*Downlink Channel Descriptor* – Canal Descritor *Downlink*) e UCD (*Uplink Channel Descriptor* – Canal Descritor *Uplink*): mensagens periódicas de *broadcast*<sup>13</sup> que carregam informações de configurações as MSs, tais como, *burst profile*<sup>14</sup> que define a combinação da codificação com a modulação que será utilizada. O fato de ser orientada a conexão, e sendo todos os dados

---

<sup>12</sup> Garante a conectividade do usuário de uma rede sem fio ao se deslocar para uma área fora daquela em que ele esteja registrado.

<sup>13</sup> Envio da mesma informação para receptores ao mesmo tempo.

<sup>14</sup> Perfil de rajada.

mapeados, possui grande vantagem em relação a outras tecnologias, como por exemplo, o Wi-Fi (*Wireless Fidelity* – Interconexão de Dispositivos sem Fio). A prioridade na transmissão também é um mecanismo suportado pela Subcamada de Serviço Comum do padrão. É feita uma forma de escalonamento adequando a prioridade de acordo com a classe de serviço à qual o cliente se adéqua. Para (SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TELECOMUNICAÇÕES, 2007) são definidas cinco classes de serviços:

- UGS (*Unsolicited Grant Service* – Concessão de Serviços não-Solicitados): projetado para serviço de voz sobre IP;
  - rtPS (*real-time Polling Service* – Serviço de taxa variável em tempo real): para serviços audiovisuais;
  - ErtPS (*Extended real-time Polling Service* – Serviço Extendido de taxa variável em tempo real): para serviços de voz com detecção de silêncio;
  - nrtPS (*non-real-time Polling Service* – Serviço de taxa variável em tempo não real): para serviços de FTP (*File Transfer Protocol* – Protocolo de Transferência de Arquivo);
  - BE (*Best Effort* – Melhor Esforço): projetado para atender serviços de navegação na internet.
- **Subcamada de Segurança** – tentando ofertar melhorias que faltaram em outros padrões, o IEEE definiu uma série de requisitos de segurança. Para isso há um processador na BS específico para essa função. Todos os dados durante a conexão são criptografados pelo algoritmo AES (*Advanced Encryption Standard* – Padrão de Criptografia Avançado) para assegurar a privacidade dos mesmos, além disso, é feita uma troca de chave de segurança. Nesta camada também são definidos os tipos de serviços e mecanismos para requisição de largura de banda.

### **Camada Física**

Inicialmente, o padrão foi projetado para padronizar implementações LMDS (*Local Multipoint Distribution System* – Sistema de Distribuição Multiponto Local), cobrindo uma faixa de frequência de 10 a 66 GHz. O sistema de modulação utiliza as constelações QPSK (*Quadrature Phase Shift Keying* – Chaveamento de Fase em Quadratura), 16-QAM (*Quadrature Amplitude Modulation* – Modulação em Amplitude e Quadratura) e 64-QAM e considera aplicações com linha de visada. Outras especificações são a largura de banda de 20,



25 e 28MHz, taxa de transmissão entre 32 e 134Mbps, raio para as BS's de 2 a 5Km e arquitetura ponto-multiponto.

A primeira extensão da norma foi concluída em Janeiro de 2003 e foi chamada de IEEE 802.16a. Esta norma usa uma faixa de frequência de 2-11GHz licenciadas e não licenciadas, suporta redes mistas e passou a focar as aplicações sem linha de visada. Provê taxa de transmissão de até 75Mbps e canalização de 20MHz, usa modulação OFDM com 256 subportadoras mapeadas nas constelações QPSK, 16-QAM e 64-QAM. Não possui mobilidade e tem largura de banda entre 1.5 e 20MHz. Com essa extensão já pretendia-se competir com tecnologias existentes de acesso a última milha.

Por conseguinte, a norma IEEE 802.16b prevê operar na faixa do espectro entre 5 a 6GHz, tratando de aspectos relativos à QoS para voz e vídeo em tempo real.

A norma posterior a essa é chamada de IEEE 802.16c, aprovada em Dezembro de 2002 e operando na faixa de 10 a 66GHz. Esta versão destina-se a interoperabilidade, protocolos e especificações de testes de conformação.

A partir da norma 802.16d, ou 802.16-2004, ou, simplesmente WiMAX nomádico (ou portátil), houve uma revisão de todas as outras normas atualizando o padrão que além de outras melhorias permite um menor consumo de energia e menores terminais. Uma das principais alterações foi o suporte a múltiplas antenas. Esta versão opera em modo TDD (*Time Division Duplex* – Duplexação por Divisão do Tempo) e FDD (*Frequency Division Duplex* – Duplexação por Divisão do Frequência) e utiliza OFDM com 256 subportadoras, OFDMA, 64-QAM, 16-QAM, QPSK e BPSK (*Binary Phase Shift Keying* – Chaveamento de fase em Binário), podendo ser fixa ou portátil. A faixa de frequências do espectro não licenciado em que o sistema opera é de 5.8GHz e nas frequências licenciadas é de 2.5GHz e 3.5GHz. Possui um alcance de 8 a 12 km sem linha de visada e 30 a 50 km em linha de visada e sua taxa de transmissão pode chegar até 70-75Mbps. Suporta topologias ponto-multiponto e *mesh*, destina-se a dois tipos de aplicações: utilizador final e rede de transporte.

Por último, a norma 802.16e ou 802.16-2005 opera na faixa de frequências de 2 a 6GHz, sem linha de visada, com velocidade de até 15Mbps, mantendo as mesmas modulações do padrão anterior e incluindo SOFDMA (*Scalable OFDMA* – OFDMA escalável), tornando-o incompatível com as versões anteriores. A largura de banda pode variar entre 1,25; 5; 10 e 20 MHz, porém só foram definidos pelo WiMAX Fórum larguras de banda de 5 ou 10Mhz, alcançadas por meio da modulação SOFDMA. Esta norma possui *roaming* regional e usa apenas multiplexação TDD. O padrão IEEE 802.16e assegura conectividade quando o móvel se desloca a velocidades de até 100Km/h.

Os padrões anteriores ao IEEE 802.16d tornaram-se obsoletos. Mais informações sobre a evolução da família IEEE 802.16 podem ser encontradas no site oficial do padrão (IEEE: Institute of Electrical and Electronics Engineers) inclusive as novas versões que estão sendo estudadas, como por exemplo, a 802.16m que prevê taxas da ordem de 1 Gbps.

### Interfaces Aéreas

A camada física do padrão IEEE 802.16 tem algumas opções de interfaces aéreas. Na norma 802.16d, são previstos cinco possibilidades enquanto que no IEEE 802.16e são previstos quatro interfaces. A seguir serão apresentadas essas interfaces:

- **WirelessMan-SC** (*WirelessMan-Single Carrier* – WirelessMan Portadora Única): É uma interface aérea de portadora única com operação na faixa de frequências de 10-66GHz com linha de visada que objetiva a flexibilidade no planejamento, no custo e nas funcionalidades;
- **WirelessMan-SCa** (*WirelessMan-Single Carrier advanced* – WirelessMan Portadora Única avançado): Possui quase as mesmas características da WirelessMan-SC, porém operando na faixa de 2-11GHz e podendo suportar uma transmissão sem linha de visada. Por esse motivo ela tem uma estrutura de quadros robusta a multipercursos, estimação e equalização de canal, diversidade de transmissão, controle de potência, esquemas adaptativos de antenas, entre outros;
- **WirelessMan-OFDM**: É baseada na modulação OFDM com 256 subportadoras, e opera sem linha de visada e na faixa de frequências de 2-11GHz. Entre outras melhorias, possui topologia *mesh* e sub-canalização no enlace reverso;
- **WirelessMan-OFDMA**: É baseada na modulação OFDM escalável, opera sem linha de visada na banda de frequência de 2-6GHz. Esta interface permite acessos múltiplos, mobilidade e compartilhamento do canal por vários usuários, além de suportar sub-canalização no enlaces direto e reverso;
- **Wireless-HUMAN**: É uma interface utilizada em faixa de frequências não licenciadas (5-6GHz),. Usa esquema flexível de canalização, utiliza DFS e faz uso das outras interfaces aéreas, com exceção da interface WirelessMan-SC.

### Codificação de Canal

Os blocos que compõe o WiMAX na transmissão são em geral constituídos por:

- **Randomizador**: servem para prevenir longas seqüências de bits;

- **Codificador:** insere códigos de redundância que permitem ao decodificador corrigir eventuais erros introduzidos pelo canal de transmissão;
- **Entrelaçador:** primeiramente garante que bits codificados adjacentes são mapeados em subportadoras não adjacentes e em uma segunda permutação, bits codificados adjacentes são mapeados alternadamente nos bits menos ou mais significativos da constelação;
- **Mapeador:** insere a informação em um sinal através da seqüência de bits escolhida, sendo ela QPSK, BPSK ou outro que melhor se adéqua ao perfil de transmissão. Abaixo segue a Tabela 2.1 referenciando quais são os componentes existentes no padrão IEEE 802.16d e IEEE 802.16e:

Tabela 2.1: Componentes dos padrões IEEE 802.16d e IEEE 802.16e

IEEE 802.16d	IEEE 802.16e
Randomizador	Randomizador
Codificador Convolutacional <i>Reed-Solomon</i>	Codificador Convolutacional, opcionalmente adicionados a códigos turbo.
	Entrelaçador
Mapeador 64QAM	Mapeador QPSK, 16-QAM e opcionalmente 64-QAM

### OFDM, OFDMA, SOFDMA

O sistema WiMAX em geral transmite dados a taxas elevadas e longas distâncias. Transmitir em altas taxas significa dizer que haverá símbolos com pequena duração, já que a duração do símbolo é inversamente proporcional a taxa. Em um ambiente onde há desvanecimento por multipercurso, a curta duração do símbolo acarretará em maior interferência intersimbólica, tornando o canal de comunicação seletivo em frequência, ou seja, a banda do sinal transmitido é maior que a banda de coerência do canal (RAPPAPORT, 2002). Apesar do canal seletivo em frequência apresentar algumas vantagens em termos de desempenho, do ponto de vista do receptor as operações necessárias para equalizar o sinal recebido tornam os algoritmos computacionalmente complexos, uma vez que um canal seletivo pode ser modelado como um filtro FIR (*Finite Impulse Response* – Resposta ao Impulso Infinito) com vários coeficientes. Para tornar o processo de equalização menos

complexo, a modulação OFDM é aplicada no transmissor e com isso a duração do símbolo transmitido aumenta, pois ao invés de se transmitir um único sinal com taxa  $X$  bps, transmite-se  $N$  sinais com taxa  $X/N$  bps de forma paralela através de varias sub-portadoras. O número de sub-portadoras é escolhido de tal forma que cada sub-canal se torne plano na frequência, condição que simplifica de forma significativa o processo de equalização (GOLDSMITH, 2005).

Um par modulador/demodulador OFDM pode ser visto na Figura 2.3. Nesta figura pode-se observar que o processo de modulação e demodulação OFDM podem ser realizados através dos algoritmos IFFT (*Inverse Fast Fourier Transformed* – Transformada Inversa Rápida de Fourier) (modulação) e FFT (*Fast Fourier Transformed* – Transformada Rápida de Fourier) (demodulação). De forma simplificada, os sinais são mapeados em constelações padrões (QAM, PSK), convertidos em paralelo para a entrada da IFFT, que faz a modulação e garante que as sub-portadoras serão ortogonais umas as outras. Após o processo da IFFT é adicionado um intervalo de guarda (prefixo cíclico) que tem a função de garantir que não haverá interferência inter-simbólica. No processo de recepção, é retirado o prefixo cíclico e os sinais passam pela FFT, que fará o processo de demodulação do sinal, antes dos símbolos passarem pelos demapeadores das constelações QAM ou PSK.

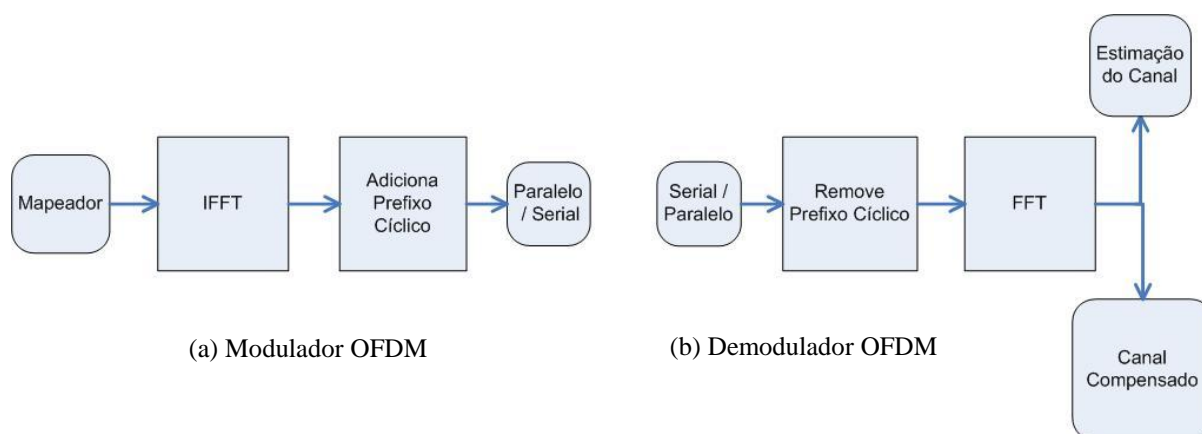


Figura 2.3: Modulador e Demodulador OFDM

No padrão 802.16 – 2004, os bits são agrupados em símbolos e é adicionada uma banda de guarda que cria um formato de pulso FFT mais abrupto, evitando assim, a interferência entre canais adjacentes. A mesma interferência pode ocorrer dentro de cada símbolo, contudo ela pode ser eliminada com a adição de um prefixo cíclico a cada símbolo OFDMA igual aos últimos bits de dados. A norma IEEE 802.16 prevê diferentes tamanhos de prefixo cíclico.

Com OFDMA há a possibilidade de utilizar a técnica OFDM como tecnologia de múltiplo acesso, onde as sub-portadoras são divididas em grupos, criando sub-canais e facilitando acesso de múltiplos usuários, uma vez que estes transmitem apenas nos sub-canais alocados para eles. Este tipo de modulação aumenta a capacidade de transmissão devido à independência dos sub-canais das sub-portadora e devido ao fenômeno conhecido como diversidade multiusuário. No SOFDMA é possível variar o número de sub-portadoras, 128; 512; 1024 e 2048, que serão utilizadas no sistema sem alterar o espaçamento entre as mesmas. Através dessa variação no número de sub-portadoras, diferentes larguras de bandas podem ser alcançadas. Para a norma 802.16 – 2005 o espaçamento entre as sub-portadoras é  $\Delta f = 10,937$  kHz, e a duração do símbolo útil é  $T_s = 91,43\mu s$ .

Dois tipos de acesso podem ser utilizados, TDD e FDD nas diferentes padronizações do WiMAX. Em bandas não licenciadas deve ser utilizado apenas o primeiro tipo, já na banda licenciada, ambos podem ser utilizados. Por outro lado estações clientes podem também utilizar H-FDD (FDD *half-duplex*<sup>15</sup>) que tenta fazer uma combinação dos dois tipos citados acima. O TDMA (*Time Division Multiple Access* – Acesso Múltiplo por Divisão no Tempo) que é o acesso do assinante a estação base, utiliza apenas um canal tanto para *downlink* como para *uplink*<sup>16</sup>, não podendo, portanto enviar e receber informações de forma simultânea. Os primeiros *slots* de tempo que formam um quadro TDD são destinados ao tráfego direto e reverso. O número de *slots* destinados aos dois tráfegos pode variar de acordo com a aplicação usada pelo cliente, isto é, se em determinado momento estiver em uso uma simples navegação pela internet o tráfego para *download* possivelmente precisará ser maior do que o *upload*<sup>17</sup>. Já em casos de aplicações de VOIP, por exemplo, o tráfego precisará ser simétrico, permitindo que diferentes tempos sejam alocados a diferentes grupos de usuários (AVALIAÇÃO da Universidade Federal do Rio Grande do Norte). Devido a não regulamentação do padrão IEEE 802.16e, o foco será dado a estrutura do quadro TDD. Ressalta-se também em (RODRIGUES, Marcio Eduardo da Costa) que a preferência a esse tipo de duplexação são pelos seguintes motivos:

- Possui suporte a tráfegos assimétricos;
- Há reciprocidade nas características dos canais, muito importante para aplicações MIMO e de antenas adaptativas;

---

<sup>15</sup> É uma transmissão onde há um transmissor e um receptor, sendo que ambos podem transmitir e receber dados, porém não ao mesmo tempo.

<sup>16</sup> Sentido de transmissão reverso, ou seja, da SS à BS.

<sup>17</sup> Carregar a informação no sentido da SS à BS.

- Transceptores TDD possuem menor custo.

### Estrutura do quadro TDD

Para falar da estrutura do quadro TDD é necessário primeiro definir os tipos de sub-portadoras:

- Sub-portadoras de dados – para a transmissão de dados, tanto informações de usuários como sinalização;
- Sub-portadoras pilotos – para a estimação de canal e sincronização;
- Sub-portadoras nulas – não há transmissão, são utilizadas apenas para banda de guarda e para a portadora DC (sub-portadoras com radiofrequência central da estação).

O mapeamento dos símbolos ocorre dentro dos sub-canais que são definidos pelo esquema de permutação (sub-canalização) de sub-portadoras. Elas podem ser adjacentes, o que raramente acontece, permitindo o uso da técnica de *beamforming*<sup>18</sup> e aumentando a potência do sinal como também diminuindo a sensibilidade a erros e a ruídos, ou ainda, podem ficar espalhadas pelo espectro de modo pseudo-aleatório, diminuindo a ICI (*Intercarrier Interference* – Interferência Entre Portadoras) e garantindo uma maior diversidade em frequência.

Para as sub-portadoras não perderem sua ortogonalidade é necessário que o transmissor e o receptor estejam bem sincronizados, tanto na frequência quanto no tempo. Isso ajuda e muito para que não haja ICI.

Seguindo a linha de estudos de (SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TELECOMUNICAÇÕES, 2007) os esquemas de subcanalização podem ser divididos em:

- **PUSC (*Partial Usage of Sub-carriers* – Uso Parcial de Sub-portadoras):** são usados tanto no enlace direto como reverso (DL ou UL). As sub-portadoras são divididas em *clusters*<sup>19</sup> (no UL) ou *tiles*<sup>20</sup> (no DL) de sub-portadoras adjacentes, 24 sub-portadoras de dados (no modo DL), oito (no modo UL) e quatro sub-portadoras piloto. No enlace direto é feita uma redistribuição lógica nos *clusters* e posteriormente são divididos em seis grupos não adjacentes. Cada dois *clusters* de mesmo grupo formam um sub-canal. Como estes sub-canais são segmentados, o transmissor pode

<sup>18</sup> Formatação de feixe.

<sup>19</sup> Sistema inteligente de alocação e reuso de canais através da área de cobertura.

<sup>20</sup> Possui a mesma funcionalidade de um cluster porém é realizado no sentido direto de transmissão.

optar por usar apenas parte destes grupos o que inclusive facilita o reuso de frequência. No sentido reverso há ainda um modo alternativo de divisão de sub-portadoras no PUSC, oito sub-portadoras de dados e uma sub-portadora piloto. Perde na estimação de canal mais ganha em uma maior taxa de transmissão de dados. Tanto no canal direto como no canal reverso as sub-portadoras são consideradas não nulas;

- **DL FUSC (*Downlink Full Usage of Subcarriers – Uso Completo de Subportadoras no Downlink*):** as sub-portadoras não estão divididas em *clusters*, isto é, todas as sub-portadoras de dados são utilizadas para compor os sub-canais e as sub-portadoras piloto são selecionadas no início do processo de permutação. Cada sub-canal é composto por 48 sub-portadoras distribuídas pela banda de frequência;
- **AMC (*Adaptive Modulation and Coding – Codificação e Modulação Adaptativa*):** os sub-canais são formados por sub-portadoras adjacentes no espectro tornando fácil o acesso multiusuário. O esquema AMC permite a modulação e codificação adaptativa em cada sub-canal, também permite a implementação de *beamforming*. Esse tipo de permutação deixa o sistema mais robusto, mas possui desvantagens na estimação de canal e na alocação ótima do canal.

A alocação destes recursos pela MAC é feita em *slots*. Estes são blocos retangulares de N sub-canais por M símbolos OFDMA adjacentes sendo eles a menor unidade de recursos nos domínios do tempo e da frequência que a camada física pode alocar a um único usuário. O tamanho do *slot* varia com o esquema de permutação e com a direção do enlace.

Conhecido todos os símbolos é necessário então aplicar, em blocos, a IFFT. Para compor o sinal digital que será transmitido em uma única frequência de rádio, esses blocos precisam ter como tamanho a mesma quantidade relativa às subportadoras acarretando em um vetor de símbolos no domínio do tempo e seu prefixo cíclico anexado.

O primeiro símbolo OFDM é sempre um preâmbulo, utilizado para sincronização do terminal móvel com a Estação Base e também para a estimativa de interferência. Esse sincronismo é realizado devido ao uso da duplexação por divisão no tempo, que permite a banda dos dois enlaces sem separação, necessitando assim, para evitar a interferência entre os dois enlaces, de sincronismo.

No segundo símbolo é enviado nos primeiros sub-canais o cabeçalho de correção de *frame*<sup>21</sup>, que carrega informações de controle do sistema do DL-MAP e UL-MAP (enviado posteriormente).

---

<sup>21</sup> Conjunto de quadros.

Nos demais símbolos, apenas periodicamente, também é enviado os UCDs e DCDs, que contém informações adicionais como estruturas de canais, constelações, taxa de código, entre outros definidos pela estação base. Por fim, temos as rajadas de *downlink* e as rajadas de *uplink*.

## Mobilidade

Dentro do UL algumas subportadoras simplesmente não são alocadas, pois possuem a função de sinalizar quando há *handover*<sup>22</sup> ou quando algum usuário deseja solicitar banda, como visto em (SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TELECOMUNICAÇÕES, 2007).

O WiMAX possui três modos de *handover* ou *handoff*:

- **HHO (*Hard Handoff – Handoff Perceptível*):** o único obrigatório definido pelo padrão, a estação móvel interrompe seu link com a estação base que está sendo utilizada antes de migrar para outra estação base;
- **FBSS (*Fast Base Station Switching – Troca Rápida de Estação Base*):** faz parte do SHO (*Soft Handoff – Handoff Imperceptível*), onde não há a necessidade de interromper o link para o móvel migrar de uma estação a outra. No FBSS a comutação é mais rápida por não precisar da realização completa da autenticação da nova BS.
- **MDHO (*Macro Diversity Handover – Diversidade Macro de Handover*):** também faz parte do SHO, aqui o móvel comunica-se com todas as BSs, ao contrário da FBSS que possui uma lista de BSs que estão envolvidas com a estação móvel do cliente.

## Controle de Energia

Objetivando uma melhor performance do sistema, algoritmos de controle regularizam o nível de transmissão de energia recebido na estação baseado em um nível pré-determinado. Esse nível é baseado na pior condição de transmissão. São definidos pelo IEEE 802.16e de acordo com (SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TELECOMUNICAÇÕES, 2007) dois modos de controle de energia:

- ***Sleep Mode (Modo Descanso)*:** a estação móvel do cliente negocia com sua estação base os recursos de rádio. Essa negociação do controle de potência é feita nos períodos de ausência de comunicação com a BS;

---

<sup>22</sup> Comutação de usuário de uma BS a outra BS sem precisar cessar a seção de comunicação, conhecido também como handoff.



- **Idle Mode (Modo Ocupado):** há uma periodização oferecida à estação do cliente para carregar tráfego de *broadcast*.

## **3 Algumas considerações sobre o WiMAX**

### **3.1 Aplicações**

Devido a rapidez e simplicidade na instalação agregada a segurança e desempenho que possui tal padrão, o mesmo tem fortes tendências a substituição nos serviços de ADSL, mesmo porque esta atingindo sua capacidade máxima de fornecimento.

As técnicas utilizadas no padrão estão sendo planejadas para serem utilizadas em padrões de telefonia móvel, tais como 3GPP (*Third Generation Partnership Project* – Projetos Parceiros de Terceira Geração) e 3GPP2. Inclusive as antenas adaptativas podem ser aplicadas no padrão HDTV (*High-definition Television* – Televisão de Alta Definição), inclusive as TVs por assinatura já viabilizam o uso do padrão como forma de expandir seus serviços (UEMURA, Eduardo K., 2007).

### **3.2 Regulamentação do WiMAX no Brasil e no mundo**

O maior desafio atualmente na implementação do WiMAX é na decisão de qual faixa operar e ter licença. O espectro de frequência é um Bem Público e oneroso, portanto deve ser regulamentado por um órgão público, no caso, a ANATEL (Agência Nacional de Telecomunicações).

De acordo com a Lei Geral de Telecomunicações o Artigo 163 diz respeito ao uso licenciado do espectro e o parágrafo segundo ao não licenciado:

“Art. 163. O uso de radiofrequência, tendo ou não caráter de exclusividade, dependerá de prévia outorga da Agência, mediante autorização, nos termos da regulamentação.

§ 1º Autorização de uso de radiofrequência é o ato administrativo vinculado, associado à concessão, permissão ou autorização para prestação de serviço de telecomunicações, que atribui a interessado, por prazo determinado, o direito de uso de radiofrequência, nas condições legais e regulamentares.

§ 2º Independência de outorga:

I - o uso de radiofrequência por meio de equipamentos de radiação restrita definidos pela Agência;”

De acordo com a resolução nº 429, de 13/02/2006 o espectro de 2.6GHz atenderá a vertente do padrão nomádico e móvel. Há também a Resolução Nº 416, de 14/10/2005 na faixa de 3.5GHz que também poderá ser aplicada ao WiMAX, como mostra a Tabela 4.1 a seguir (ANATEL: AGÊNCIA NACIONAL DE TELECOMUNICAÇÕES, 2008):

Tabela 3.1: Regulamentação WiMAX

<b>Faixa</b>	<b>Regulamentação</b>	<b>Frequências (MHz)</b>	<b>Situação</b>
2,6 GHz	Res. 429	25000-2530 (FDD) 2570-2620 (TDD) 2620-2650 (FDD)	Compartilhada com o MMDS <sup>23</sup>
3,5 GHz	Res. 416	3400 a 3600	Em licitação
5 GHz	Res. 365	5150-5350 5470-5725	Não precisa de licença

As sobras das frequências de 3,5 GHz que tentou ir a leilão público em fevereiro de 2005 e que foi postergado para Janeiro de 2006, a ANATEL publicou em 17 de Junho de 2006 (Licitação nº 002/2006/SPV Radiofrequências nas faixas de 3,5 e 10,5 GHz) com uma serie de restrições devido a pressões de algumas associações de provedores de serviços. Atualmente apenas as concessionárias Embratel, Brasil Telecom, a operadora de telecom para o mercado corporativo Neovia/DirectNet, os provedores de Internet Grupo Editorial Sinos e WKVE possuem licenças de 3,5 GHz para WiMAX.

<sup>23</sup> (Multipoint Multichannel Distribution System - Serviço de Distribuição Multiponto Multicanal) é tecnologia de telecomunicações sem fio para banda larga de uso geral.

## ***4 Utilização da Técnica de Múltiplas Antenas no Sistema WiMAX***

### **4.1 Técnicas de Múltiplas Antenas**

Como o próprio nome já diz a tecnologia utiliza múltiplas antenas para transmitir e/ou receber os sinais de rádio, possui como objetivo aumentar a taxa de transmissão de informação e melhorar o desempenho da taxa de erro de bits do sistema. Estes ganhos podem ser obtidos através da multiplexação espacial, diversidade e antenas adaptativas, também referenciada como formação de feixe ou antenas inteligentes (HAYKIN, Simon; MOHER, Michael, 2008).

A multiplexação espacial transmite símbolos de informação diferentes em cada antena enquanto a diversidade espacial toma proveito dos múltiplos enlaces independentes transmitindo redundância de forma controlada. Para obter um bom desempenho das técnicas, é necessário um espaçamento mínimo (em torno de poucos comprimentos de onda) de forma a garantir uma descorrelação entre as condições do canal formado por um par de antenas transmissora e receptora. A formação de feixe utiliza um arranjo de antenas para direcionar o sinal a ser transmitido ou criar nulos nas direções de sinais indesejáveis. Neste caso, a separação entre as antenas é de aproximadamente meio comprimento de onda. A Figura 3.1 classifica os sistemas de acordo com o número de antenas como SISO (*Single Input Single Output* – Única Entrada e Única Saída), MISO (*Multiply Input Single Output* – Múltiplas Entradas Única Saída), SIMO (*Single Input Multiply Output* – Única Entrada Múltiplas Saídas) e MIMO.

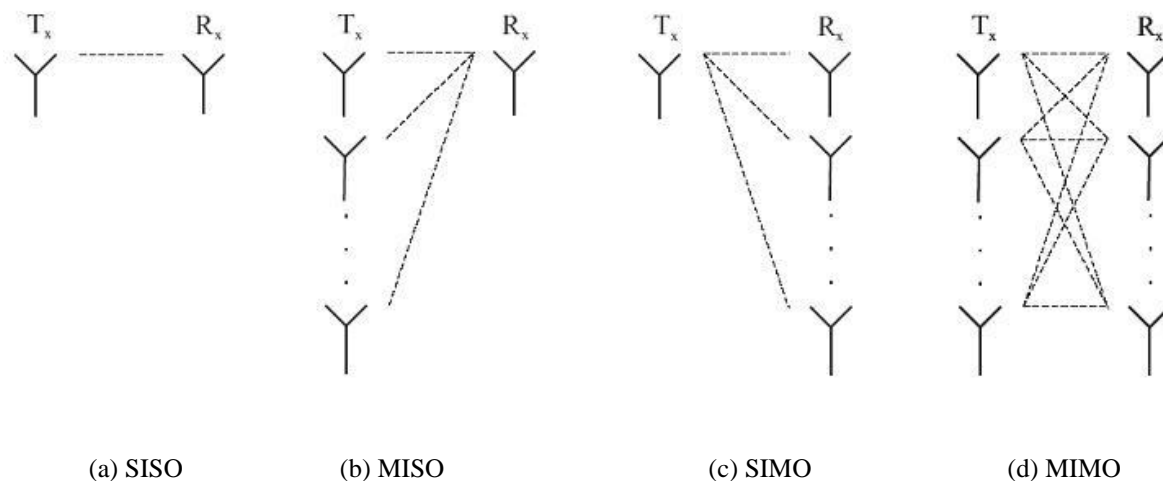


Figura 3.1: Classificação do sistema de acordo com o número de antenas

As técnicas de múltiplas antenas podem ser divididas em três grupos:

I – Sistemas de Diversidade: Neste grupo, o objetivo é combinar os sinais afetados de maneira decorrelacionada pelo canal para obter o máximo grau de diversidade fornecido pelo sistema, por exemplo, em um sistema com duas antenas transmissoras e duas receptoras, é possível, desde que as antenas estejam separadas corretamente, obter um grau de diversidade de  $2 \times 2 = 4$ . As técnicas mais conhecidas que proporcionam diversidade espacial são detalhadas a seguir (SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TELECOMUNICAÇÕES, 2007):

- **STC (*Space-Time Coding* – Codificação Espaço-Tempo):** Neste esquema o sistema oferece ganho de diversidade espacial através da combinação de  $M$  antenas transmissora com  $N$  antenas receptoras acarretando em  $MN$  enlaces independentes no qual a informação poderá trafegar. Combinados a esse uso de múltiplas antenas uma técnica de codificação de canal também é utilizada. Entre os STCs o código de Alamouti (PROJETO MI-SBTVD: STC-OFDM E ESTIMAÇÃO DE CANAL, 2006) é, sem dúvida, um dos mais utilizados. Esse esquema, inicialmente, utilizava duas antenas transmissoras e  $M$  receptoras para transmitir dois símbolos de informação em dois intervalos de tempo. Esta técnica será detalhada no texto mais adiante.
- **MRRC (*Maximum Ratio of Reception Combinig* – Combinação de Máxima Razão na Recepção):** Esta técnica utiliza apenas uma antena transmissora e  $M$  receptoras, obtendo um grau de diversidade de

1xM. No receptor é necessário uma estimativa do canal para que os sinais sejam combinados de forma correta do processo de detecção. Desta forma, os efeitos de rotação de fase introduzidos pelo canal são desfeitos e o receptor consegue obter os benefícios da diversidade. Essas estimativas do canal podem ser obtidas utilizando-se uma seqüência de treinamento e algoritmos específicos.

- Seleção de Antena – Esse tipo de tecnologia simplesmente monitora a qualidade dos sinais que chegam na recepção e escolhem o que possui o melhor ganho de canal. Pode ser aplicado em ambos os sentidos (*downlink* e *uplink*).

II – Multiplexação Espacial: Esta técnica permite aos usuários e as estações base o uso de dois transceptores por canal, no caso do UL as múltiplas entradas podem ser representadas por diferentes usuários. A capacidade de canal (taxa máxima que um canal suporta livre de erro) aumenta linearmente com o número mínimo entre N (número de antenas transmissoras) e M (número de antenas receptoras). Para que o receptor consiga detectar os sinais corretamente, a condição de  $N \leq M$  tem que ser respeitada (HAYKIN, Simon; MOHER, Michael, 2008). Neste esquema uma seqüência de informação é distribuída e transmitida simultaneamente pelas N antenas transmissoras aumentando de forma significativa a eficiência espectral do sistema. Por exemplo, um sistema MIMO com 4 antenas transmissoras e 4 receptoras, utilizando modulações 64-QAM, podem chegar a uma eficiência espectral de 6 (bit/símbolo) x 4 (antenas transmissoras) 24 b/s/Hz. É bom ressaltar que existe um compromisso entre diversidade e multiplexação espacial, ou seja, no sistema citado anteriormente o grau de diversidade não seria  $4 \times 4 = 16$ . Na literatura existem diversos tipos de técnicas de multiplexação espacial, sendo a V-BLAST (*Vertical-Bell Laboratories Layered Space-Time*) (HAYKIN, Simon; MOHER, Michael, 2008) muito utilizada.

III – Sistemas de Antenas Adaptativas: Esta técnica utiliza algoritmos mais avançados de processamento de sinais capazes de fazer a formatação de feixe no sentido do usuário desejado e anular os que provavelmente acarretariam em interferência ao sistema. Através da formatação do feixe, esta técnica permite trabalhar com modulações de ordem mais elevadas e códigos corretores de erros menos robustos, aumentando a taxa de dados do sistema. Aumentando a SNR (Signal Noise Ratio – Relação Sinal Ruído) no receptor, o sistema pode melhorar a área de cobertura e a capacidade de tráfego (HAYKIN, Simon; MOHER, Michael, 2008).

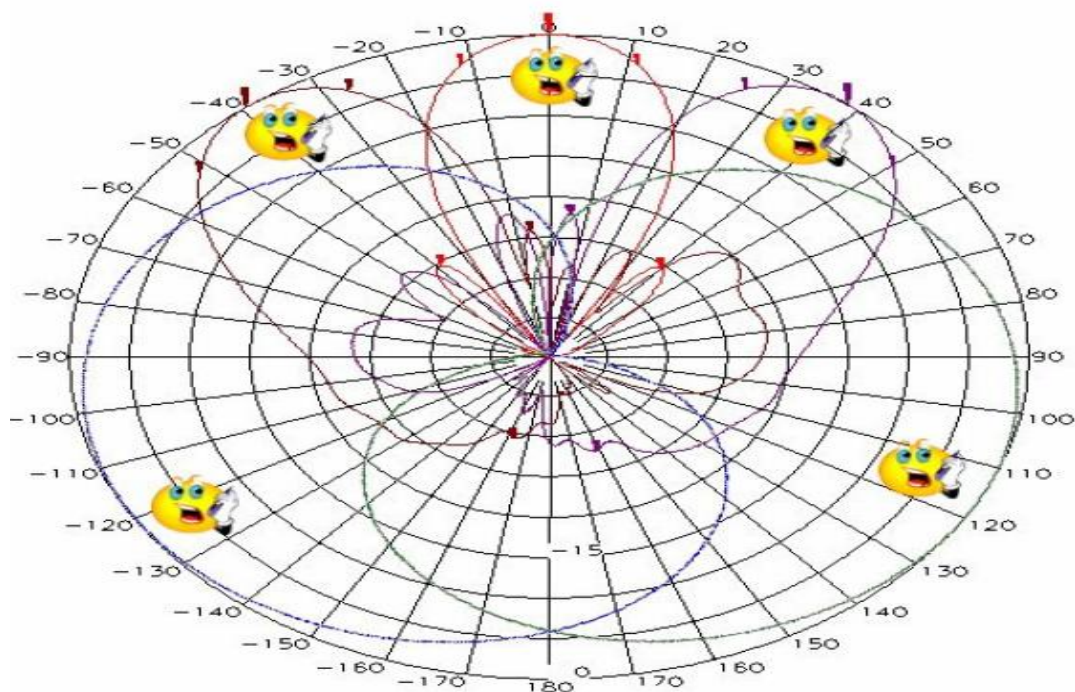


Figura 3.2: Distribuição de usuários em uma transmissão com feixes formatados

Na Figura 3.2 é possível acompanhar como funciona o método *beamforming* de antenas adaptativas. Ao acompanhar a comunicação do usuário representado pelos lóbulos de cor vermelha, podemos observar o feixe sendo formatado na direção do usuário, enquanto que nulos em outras direções são criados a fim de poder eliminá-los nesta comunicação.

O método para a geração de lóbulos é chamado de *beamforming*. No lóbulo principal é realizado um ajuste nas fases da corrente de cada elemento (pesos) do conjunto, mantendo-se a amplitude constante e permitindo que os campos irradiados por cada elemento se somem na direção desejada.

Para gerar os nulos no diagrama de radiação é utilizado o método de cancelamento de sinais. É necessário criar nulos em todas as direções para que se consiga o resultado almejado. O diagrama será multiplicado por um fator que irá proporcionar um valor unitário a determinada direção.

A técnica de antenas adaptativas vai muito além de uma simples setorização que pode, também, ser considerada um tipo de antenas inteligentes. A Figura 3.3 mostra a diferença entre setorização de antenas (à esquerda) e *beamforming* (à direita):

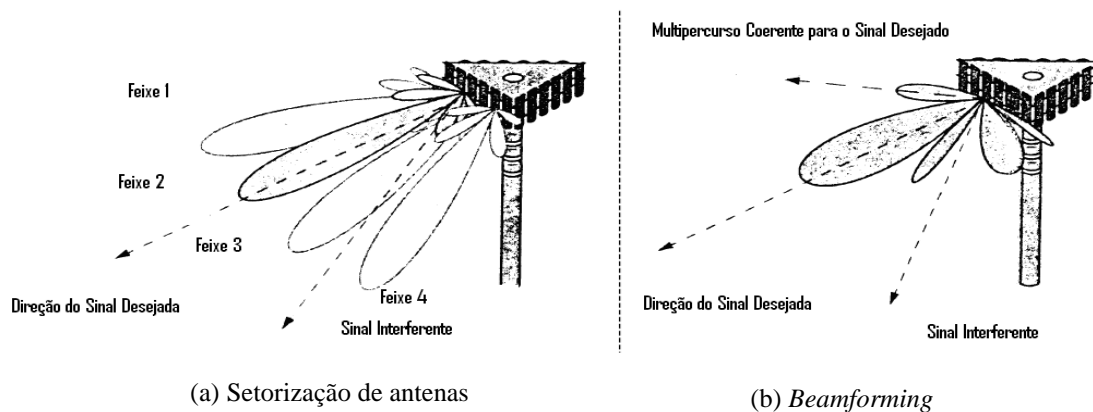


Figura 3.3: Técnicas de antenas adaptativas

Para o devido funcionamento da técnica de antenas adaptativas é necessário um processamento muito maior que habitualmente é utilizado. Neste processamento o sinal recebido da antena do usuário é multiplicado por um peso, controlado por algoritmos adaptáveis, e então um ajuste de fase e amplitude é realizado. Diversos algoritmos podem ser utilizados, entre eles pode-se citar os algoritmos DMI (*Direct Matrix Inversion* – Inversão de Matriz Direta) e LMS (*Least Mean Square* – Algoritmo de Média Quadrática Mínima).

## 4.2 Técnicas de Múltiplas Antenas utilizadas no sistema WiMAX

Todas as técnicas mencionadas anteriormente são de alguma forma, previstas no padrão IEEE 802.16d e/ou 802.16e. Como o assunto é extenso e muito variado, daqui em diante este trabalho detalhará apenas as técnicas de Alamouti (PROJETO MI-SBTVD: STC-OFDM E ESTIMAÇÃO DE CANAL, 2006).

### Esquema de diversidade STC – O Código de Alamouti

O código de Alamouti (PROJETO MI-SBTVD: STC-OFDM E ESTIMAÇÃO DE CANAL, 2006) é um código de bloco espaço-temporal ortogonal (STBC – *Space-Time Block Codes* – Codificação Espaço-Temporal em Bloco) descrita e generalizada para mais de duas antenas transmissoras no artigo (*Space-Time Block Codes from Orthogonal Design* - V. Tarokh). Esta técnica envia a mensagem codificada no espaço e no tempo, porém é necessário que os receptores conheçam as informações do canal para recuperar os sinais



enviados. A técnica de Alamouti se tornou bastante popular pelo bom desempenho, simplicidade e baixa complexidade computacional.

Para explicar esta técnica, será utilizada a Tabela 3.1, que mostra como o sinal é codificado no transmissor antes de ser enviado ao canal. De acordo com a tabela no instante de tempo  $t$  a antena 0 transmite o sinal  $s_0$  e ao mesmo tempo a antena 1 transmite o sinal  $s_1$ . No instante seguinte ( $t + T$ ) onde  $T$  é a duração do símbolo, a antena 0 transmite  $-s_1^*$  e antena 2 transmite  $s_0^*$ , também simultaneamente.

Tabela 4.1: Tabela exemplificando a matriz de transmissão Alamouti 2x1

<b>Antena 0</b>	$s_0$	$-s_1^*$
<b>Antena 1</b>	$s_1$	$s_0^*$
<b>Tempo</b>	$T$	$t+T$

No receptor, os sinais recebidos ( $r_0$  e  $r_1$ ) são expressos pelas Equações 3.1 e 3.2:

$$r_0 = r(t) = h_0 s_0 + h_1 s_1 + n_0 \quad (3.1)$$

$$r_1 = r(t+T) = -h_0 s_1^* + h_1 s_0^* + n_1 \quad (3.2)$$

Onde  $h_0$  e  $h_1$  são os ganhos complexos dos canais nos caminhos entre as duas antenas transmissoras e a antena receptora. Estes ganhos modelam um canal com desvanecimento do tipo Rice ou Rayleigh, dependendo se há ou não linha de visada entre o par transmissor/receptor, respectivamente. As distribuições de Rice ou Rayleigh são utilizadas para descrever a variação da amplitude do sinal no receptor. As variáveis  $n_0$  e  $n_1$  são variáveis aleatórias Gaussianas complexas e representam o ruído AWGN (*Additive White Gaussian Noise* – Ruído Gaussiano Branco Aditivo) do receptor. Uma vez armazenado, os sinais  $r_0$  e  $r_1$  e considerando que o receptor estimou com precisão os ganhos do canal, a seguinte regra de combinação deverá ser implementada para estimar os sinais transmitidos ( $\tilde{s}_0$  e  $\tilde{s}_1$ ) como mostra as Equações 3.3 e 3.4:

$$\tilde{s}_0 = h_0^* r_0 + h_1 r_1^* \quad (3.3)$$

$$\tilde{s}_1 = h_1^* r_0 - h_0 r_1^* \quad (3.4)$$

Se substituirmos as Equações 3.1 e 3.2 nas Equações 3.3 e 3.4 teremos as Equações 3.5 e 3.6:

$$\begin{aligned}
s_{\sim 0} &= h_0^* (h_0 s_0 + h_1 s_1 + n_0) + h_1 (-h_0^* s_1 + h_1^* s_0 + n_1) = \\
&h_0^* h_0 s_0 + h_0^* h_1 s_1 + h_0^* n_0 - h_0^* h_1 s_1 + h_1 h_1^* s_0 + h_1 n_1^* = \\
&\alpha_0^2 s_0 + h_0^* n_0 + \alpha_1^2 s_0 + h_1 n_1^* = s_{\sim 0} = (\alpha_0^2 + \alpha_1^2) s_0 + h_0^* n_0 + h_1 n_1^*
\end{aligned} \tag{3.5}$$

$$\begin{aligned}
s_{\sim 1} &= h_1^* (h_0 s_0 + h_1 s_1 + n_0) - h_0 (-h_0^* s_1 + h_1^* s_0 + n_1) = \\
&h_1^* h_0 s_0 + h_1^* h_1 s_1 + h_1^* n_0 + h_0^* h_0 s_1 - h_0 h_1^* s_0 - h_0 n_1^* = \\
&\alpha_0^2 s_1 - h_0 n_1^* + \alpha_1^2 s_1 + h_1^* n_0 = s_{\sim 1} = (\alpha_1^2 + \alpha_0^2) s_1 + h_1^* n_0 - h_0 n_1^*
\end{aligned} \tag{3.6}$$

Essa substituição é feita levando-se em conta que o canal multiplicado por seu conjugado é igual ao módulo do mesmo canal ao quadrado, representado aqui por  $\alpha^2$ . Como pode-se observar, os sinais  $s_0$  e  $s_1$  estão sendo multiplicados pela soma dos módulos ao quadrado dos ganhos dos canais. Como  $\alpha_0$  e  $\alpha_1$  são números reais e positivos, os sinais transmitidos conseguem extrair um ganho de cada canal e com isso pode-se dizer que esta técnica conseguiu extrair a diversidade do sistema com múltiplas antenas transmissoras. O caso com mais de uma antena receptora segue o mesmo raciocínio e pode ser encontrado em (PROJETO MI-SBTVD: STC-OFDM E ESTIMAÇÃO DE CANAL, 2006). O processo descrito matematicamente pode ser visualizado pela Figura 3.4.

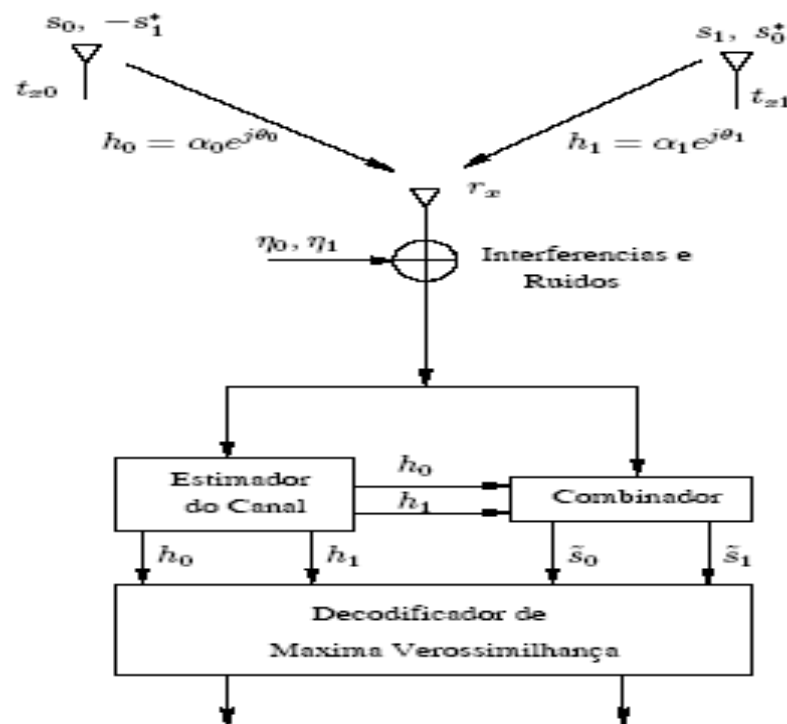


Figura 3.4: Esquema de transmissão Alamouti

A utilização desta técnica no sistema WiMAX requer uma combinação com a modulação OFDM, uma vez que a norma prevê a utilização das duas técnicas em conjunto. Esta combinação é feita considerando que os símbolos apresentados na Tabela 3.1 são símbolos OFDM.

Para mostrar o ganho que a técnica de Alamouti pode proporcionar ao sistema WiMAX foi realizado uma simulação utilizando o software Matlab. O ganho que mostraremos aqui não é o ganho real que a técnica de Alamouti proporciona ao sistema WiMAX, uma vez que muitos componentes teriam que ser considerados na simulação para se estimar este ganho, inclusive a modulação OFDM, que também não foi considerada na simulação.

Abaixo serão apresentados os diagramas de bloco, das simulações realizadas bem como o resultado do desempenho desta técnica. Nas Figuras 3.5 e 3.6 são mostrados o diagrama geral do simulador MISO (2Tx, 1Rx) e a estrutura da decodificação, seguindo as Equações 3.1 e 3.2, respectivamente. Na Figura 3.7 o diagrama de bloco, do simulador SISO é apresentado. Neste simulador, a recepção do sinal foi feita simplesmente compensando o sinal recebido através de uma divisão pelo ganho do canal. Já nas Figuras 3.8 e 3.9, são apresentados os diagramas do simulador MIMO (2Tx, 2Rx) e a estrutura de decodificação utilizada, respectivamente como extensão do método de Alamouti para duas antenas receptoras.

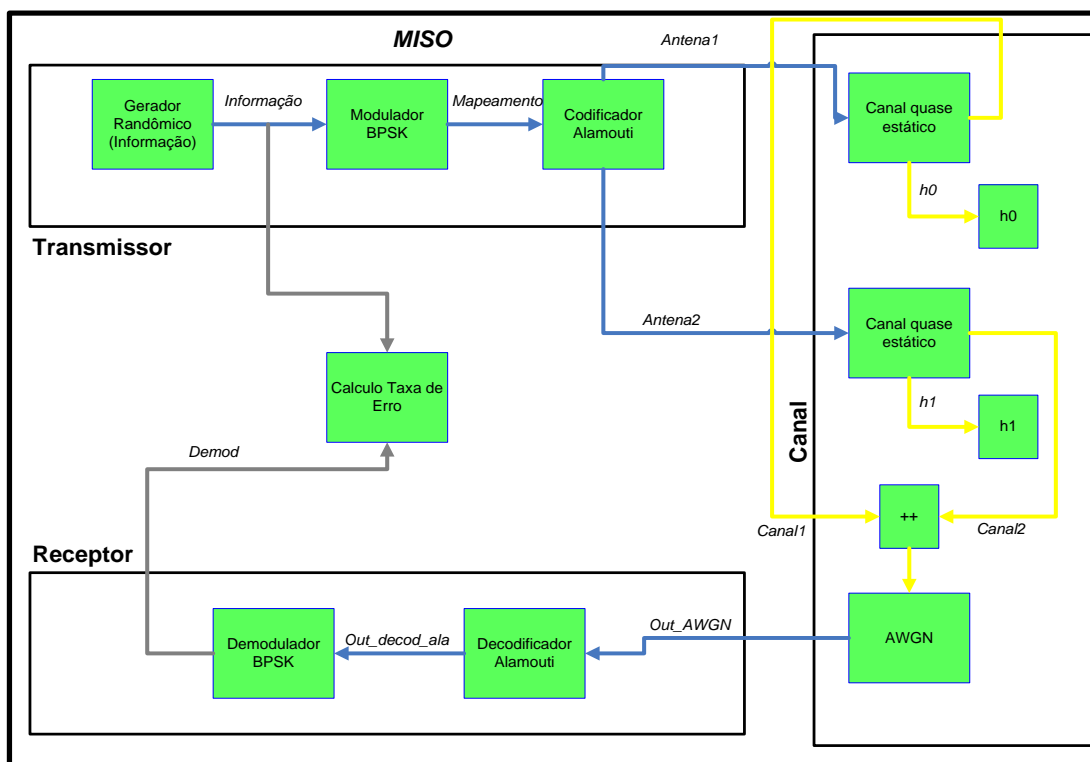


Figura 3.5: Simulador MISO

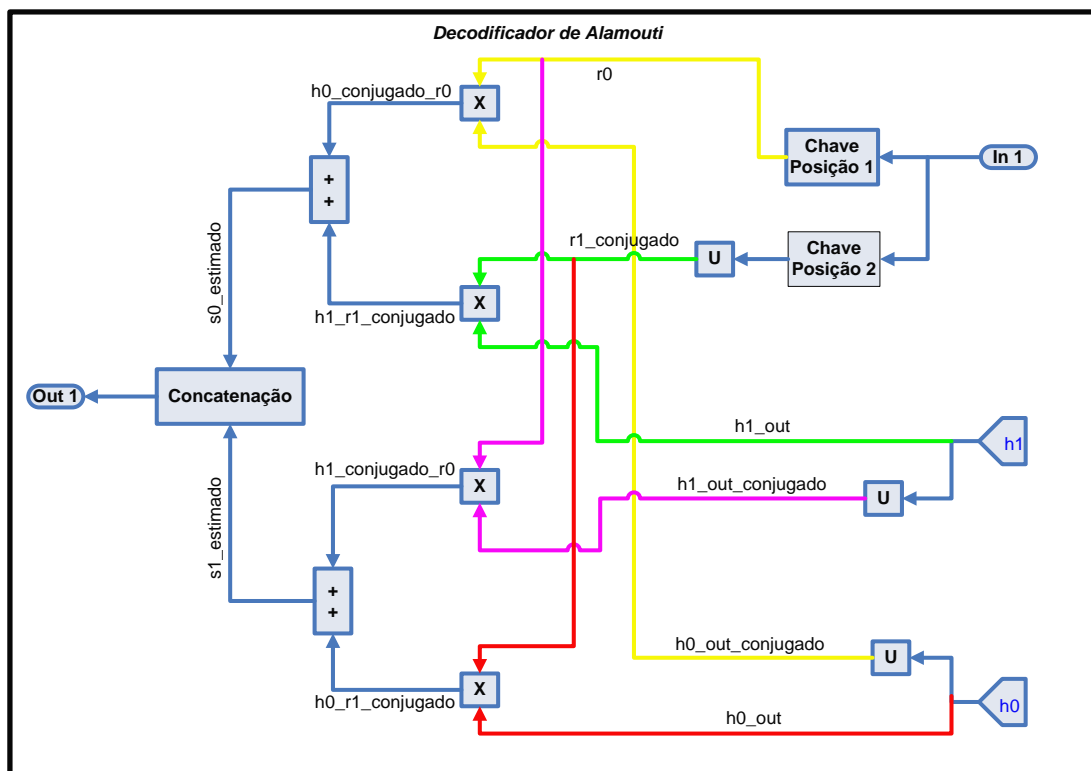


Figura 3.6: Decodificador Alamouti MISO

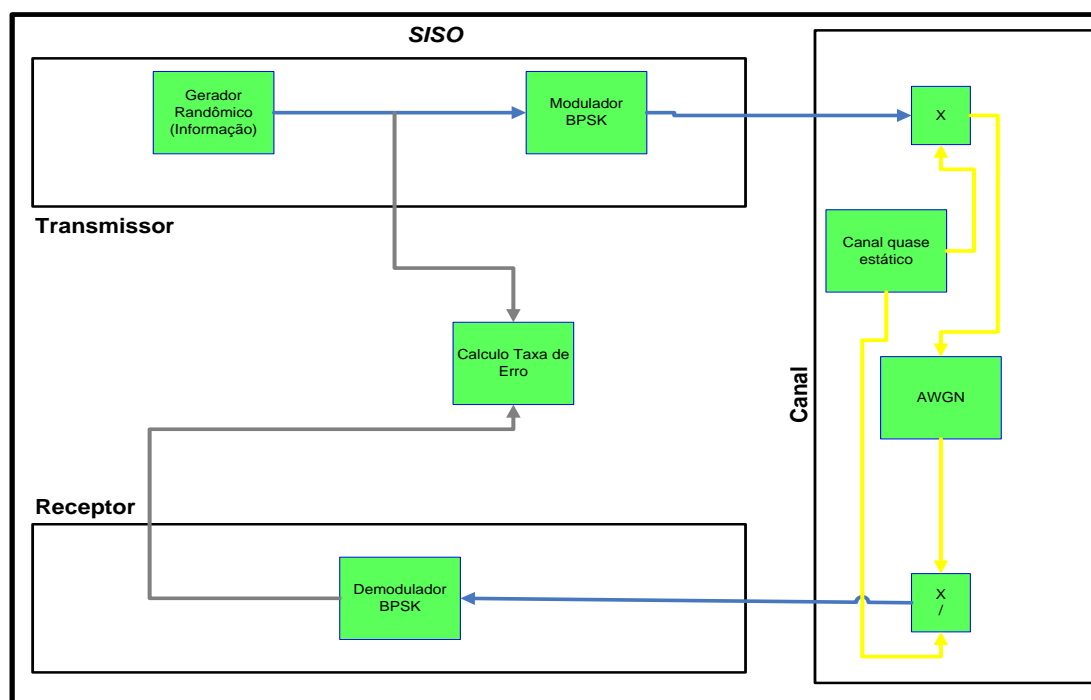


Figura 3.7: Simulador SISO

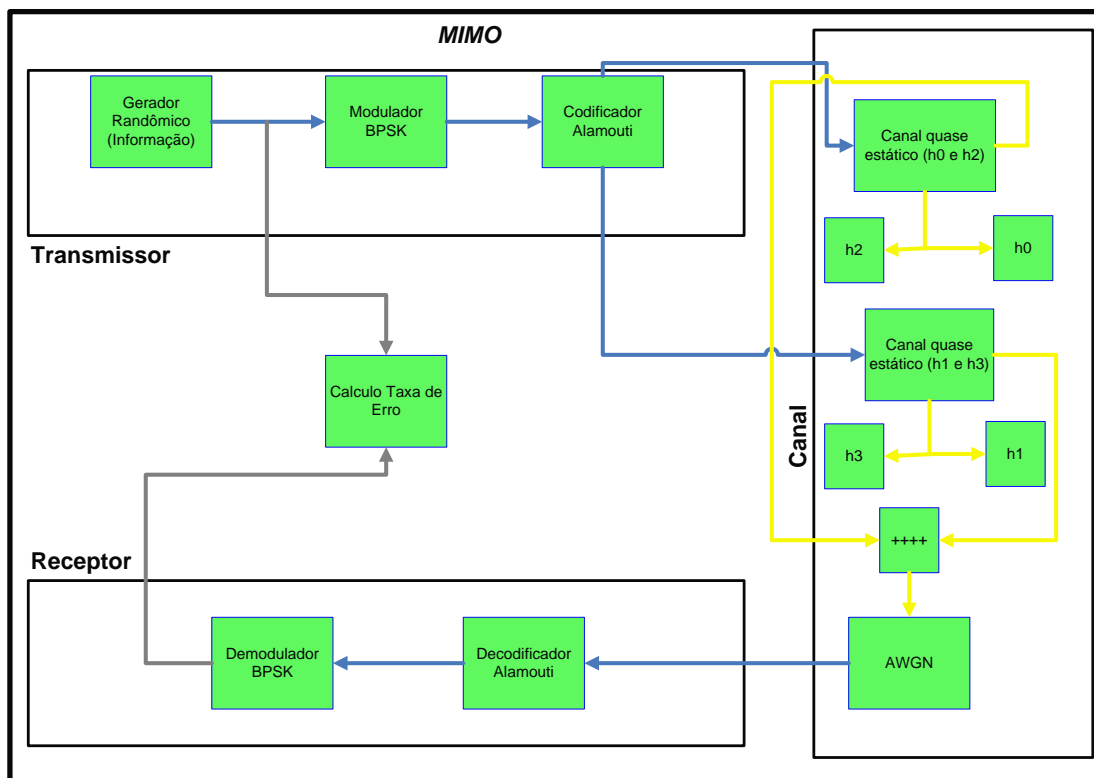


Figura 3.8: Simulador MIMO

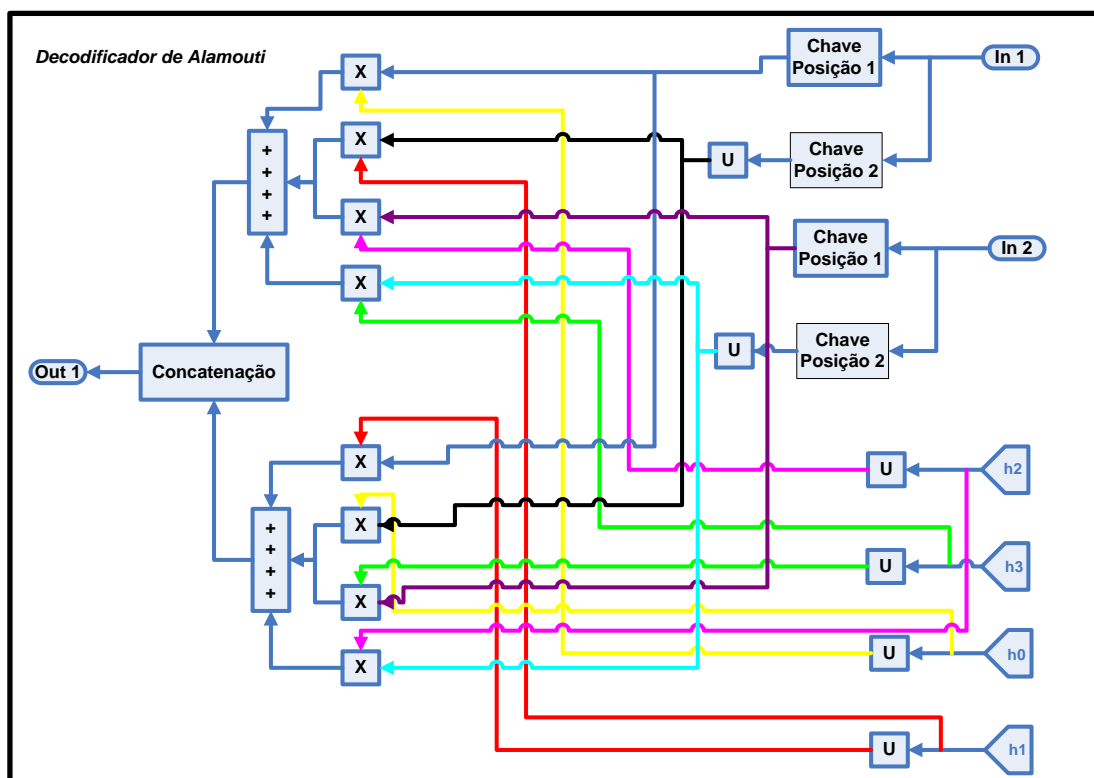


Figura 3.9: Decodificador de Alamouti MIMO

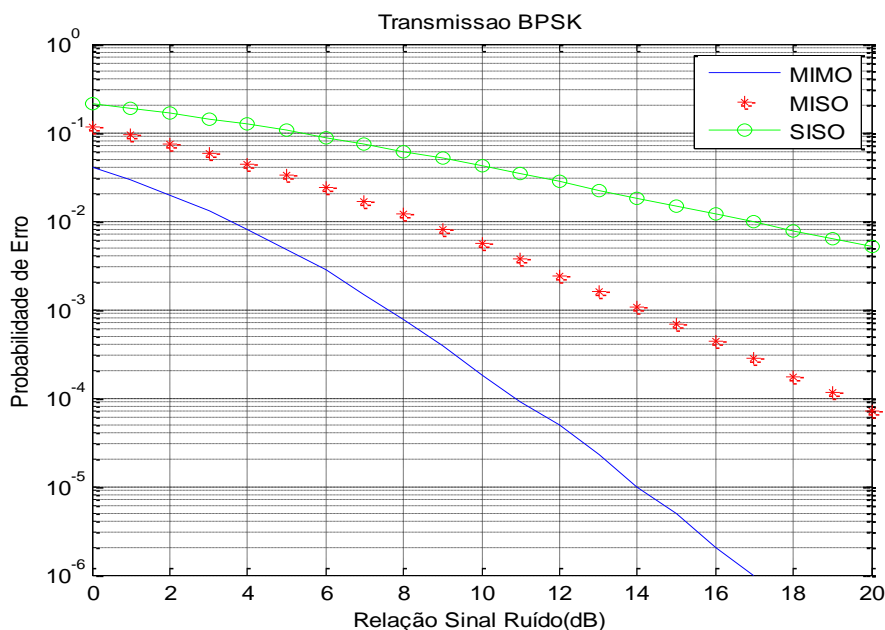


Figura 3.10: Gráfico comparativo entre SISO, MISO e MIMO

A Figura 3.10 mostra uma comparação de desempenho entre os sistemas com três configurações diferentes em termos de número de antenas. Pode-se observar que a utilização de múltiplas antenas na transmissão e/ou recepção proporciona um aumento significativo no desempenho. Nesta mesma Figura, as ordens de diversidade são de 1, 2 e 4 para os sistemas com 1Tx-1Rx, 2Tx-1Rx e 2Tx-2Rx, respectivamente. Para realizar essa simulação, foi variado a Relação Sinal Ruído (Eixo x) de 0dB até 20dB. A redução no BER (*Bit Error Ratio* – Taxa de Erro de Bits), representado pelo Eixo y, pode ser facilmente observada se tomarmos como base a Relação Sinal Ruído de 8dB, onde temos um BER de  $10^{-3}$  para a transmissão MIMO, BER de  $10^{-2}$  para MISO e BER de  $10^{-1}$  para SISO, concluindo então que a transmissão MIMO possui um BER cem vezes menor que em transmissão SISO.

Para realizar esta simulação foi considerado um canal de comunicação com desvanecimento Rayleigh e quase-estático, ou seja, o módulo dos ganhos do canal seguem uma distribuição de Rayleigh e não variam durante a transmissão de um bloco de símbolos (em torno de 100 símbolos), mas mudam entre um bloco e outro. Este tipo de canal pode modelar bem um ambiente onde não há muita mobilidade. Para representar ambientes com mobilidade maior, é necessário fazer o canal variar forma mais abrupta. Quanto a potência utilizada, foi de 2dB, diferente do que diz na teoria, onde deveria ser dividida igualmente pelo números de antenas transmissoras, isto é,  $\frac{1}{2}$ dB para cada, porém o próprio software reduz a potência em um fator igual a 4, sendo necessário então os 2dB.

## 5 *Conclusões*

Este trabalho procurou abordar a questão de qual a forma de melhorar as propriedades do enlace de comunicação sem fio que utilizam tecnologia MIMO para aperfeiçoar a eficiência espectral, a capacidade em termos de número de usuários e uma menor taxa de erro desses sistemas, estabelecendo o compromisso do ganho de diversidade e ganho do sinal com o uso de antenas adaptativas.

Houve grande aprendizado teórico e prático (através das simulações) e como previsto os resultados com as simulações das técnicas de Múltiplas Antenas SISO, MISO e MIMO, foram constatados tanto por simulação como pelo desenvolvimento matemático. Por simulação constatamos a melhoria no BER entre uma técnica e outra pegando como referência um mesmo valor para a Relação Sinal Ruído. E matematicamente observamos este ganho quando multiplicamos o canal pelo seu conjugado, como diz a matriz de Alamouti, tendo como resultado dessa multiplicação um  $\alpha^2$ , sendo ele um número real e positivo, o quadrado expressa o ganho máximo do sinal que uma transmissão 2x1 pode proporcionar.

Não houve resultados satisfatórios com a inserção dos blocos de entrelaçamento e codificação, necessários para o WiMAX segundo a própria norma, por isso foi optado por excluí-lo do trabalho. Um dos motivos reside na complexidade em implementar tal simulação. E por esta mesma razão também não foi inserido nas simulações SISO, MISO e MIMO a técnica OFDM, da mesma forma, a simulação de técnicas de Antenas Adaptativas não foi realizada.

Como trabalho futuro, fica então a sugestão de simular o sistema WiMAX de forma completa, incluindo a utilização da modulação OFDM, bloco entrelaçado e codificador, seguindo rigorosamente o que foi especificado pela norma do IEEE 802.16e. Outra sugestão, talvez até mais interessante, seria aplicar a técnica de Múltiplas Antenas em algum padrão de terceira geração de celular concorrente do WiMAX.

## ***Referências Bibliográficas***

IV FORUM ABEE-EEEC/UFG, 4., 2006, Goiás. **Inovação Tecnológica: Missão do Engenheiro.** Goiás: Universidade Católica de Goiás, 2006. Disponível em: <<http://www.abee-go.com.br/artigos/wimax.pdf>>. Acesso em: 9 mar. 2008.

VIII JORNADA DE ATUALIZAÇÃO TECNOLÓGICA, 8., 2006. Porto Alegre. **Rede Metropolitana IEEE 802.16 (WiMAX) – Aspectos Técnicos: Nível de Enlace.** Porto Alegre: BOTH, Cristiano Bonato; ROCHOL Juergen, 2006. Disponível em: <<http://www.inf.ufrgs.br/cei/index.php?language=1&content=downloads&id=127>>. Acesso em: 9 mar. 2008.

ANATEL: AGÊNCIA NACIONAL DE TELECOMUNICAÇÕES. Lei Geral das Telecomunicações. Resolução n° 429, 13 de Fevereiro de 2006 e Resolução n° 416, 14 de Outubro de 2005. Disponível em: <<http://www.anatel.gov.br>> Acesso: 21 fev. 2008.

AVALIAÇÃO da Universidade Federal do Rio Grande do Norte: 8 p. Disponível em <[www.dimap.ufrn.br/~glauucia/RAV/wi-max.doc](http://www.dimap.ufrn.br/~glauucia/RAV/wi-max.doc)>. Acesso em: 15 abr. 2008.

FIGUEIREDO, Fabrício Lira. **Fundamentos da Tecnologia WiMAX.** Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Telecomunicações, 2004. 11 p. Disponível em: <[http://www.cpqd.com.br/file.upload/sas1437\\_tecnologia\\_wimax\\_port\\_v02.pdf](http://www.cpqd.com.br/file.upload/sas1437_tecnologia_wimax_port_v02.pdf)>. Acesso em: 14 jun. 2008.

HAYKIN, Simon; MOHER, Michael. **Sistemas Modernos de Comunicações Wireless.** 1° ed. Bookman, 2008.

IEEE: Institute of Electrical and Electronics Engineers. **The IEEE 802.16 Working Group on Broadband Wireless Access Standards: Developing the IEEE 802.16 WirelessMAN® Standard for Wireless Metropolitan Area Networks,** 2000. Disponível em: <<http://ieee802.org/16/>>. Acesso em: 22 ago. 2008.



NAVES, Sanzio Guilherme; CHAN, Rodrigo Adolfo; ALBERTI, Antônio Marcos. **WiMAX - IEEE 802.16: Estudo da Tecnologia e Requisitos para Modelamento e Simulação**. Inatel: ENCONTRO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA (INCITEL), 2005, Santa Rita do Sapucaí. 2005. Disponível em: <<http://www.inatel.br/docentes/alberti/download/Artigo%20WiMAX-IEEE%20802.16%20v1.0.pdf>>. Acesso em: 12 mar. 2008.

PROJETO MI-SBTVD: STC-OFDM E ESTIMAÇÃO DE CANAL. **Revista do Instituto Nacional de Telecomunicações - INATEL**, Novembro, 2006. Disponível em: <[http://www.sj.cefetsc.edu.br/wiki/images/c/c1/MRC\\_Alamouti.pdf](http://www.sj.cefetsc.edu.br/wiki/images/c/c1/MRC_Alamouti.pdf)>. Acesso em: 23 fev. 2008.

RAPPAPORT, Theodore S. **Wireless Communicatios**. 2º ed. Pearson, 2002.

RIBEIRO, Vitor Ferreira. **Planejamento de um Projeto para Redes WiMAX**. Uberlândia: UNIMINAS, 2007. 57 p. Tese (Bacharelado) - Faculdade de Ciências Aplicadas de Minas. União Educacional Minas Gerais S/C LTDA, Uberlândia, 2007. Disponível em <<http://si.uniminas.br/TFC/monografias/Vitor%20Monografia.pdf>>. Acesso em: 10 jun. 2008.

RODRIGUES, Marcio Eduardo da Costa. **Redes WiMAX**. WirelessBR. Disponível em: <[http://www.wirelessbrasil.org/wirelessbr/colaboradores/marcio\\_rodrigues/wimax/wimax\\_07.html](http://www.wirelessbrasil.org/wirelessbr/colaboradores/marcio_rodrigues/wimax/wimax_07.html)>. Acesso em: 21 fev. 2008.

SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TELECOMUNICAÇÕES, 25., 2007, Recife. **WiMAX Móvel, a tecnologia e suas aplicações**. Recife: BARRETO, André N.; Jr, Vicente A. de S.; CAVALCANTE, André M. Disponível em: <<http://www.sbrt.org.br>>. Acesso em: 21 fev. 2008.

THELANDER, Michael W. **WiMAX Oportunidades e Desafios em um mundo Wirelles**. Grupo de Desenvolvimento de CDMA, 2005. Disponível em: <[http://www.cdg.org/resources/white\\_papers/files/WiMAX%20FINAL%20Port.pdf](http://www.cdg.org/resources/white_papers/files/WiMAX%20FINAL%20Port.pdf)>. Acesso em: 15 abr. 2008.

UEMURA, Eduardo K. **MIMO**. Curitiba: PUC-PR, 2007. 6 p. Dissertação (Graduação) – Programa de Pós Graduação em Informática Aplicada, Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba, 2007. Disponível em:

<<http://www.ppgia.pucpr.br/~jamhour/Download/pub/Mestrado%202007/MIMO.pdf>>

Acesso: 21 fev. 2008.

WORKSHOP DE INFORMÁTICA PoP-PI/RNP, 1., Piauí. **Características e Simulações de uma Rede sem Fio WiMAX.** Piauí: NETO, José Athayde Torres Costa Neto. Disponível em:

<<http://www.pop-pi.rnp.br/workshop/documentos/Wimax%20-%20Jose%20Athayde.pdf>>.

Acesso em: 15 abr. 2008.