

2

DESCRIÇÃO DO PADRÃO IEEE 802.16e-2005

2.1.

CARACTERÍSTICAS GERAIS

A tecnologia WiMAX, baseada no padrão de Interface Aérea IEEE 802.16-2004, está rapidamente se estabelecendo como uma tecnologia de grande potencial em redes metropolitanas (MANs) fixas de banda larga sem fio. Atualmente, existem quatro laboratórios de certificação [13], *AT4 Wireless* (anteriormente *Cetecom Labs*) na Espanha, *Telecommunications Technology Association*, Coréia do Sul, *China Academy of Telecommunication Research*, China e *Advance Data Technology Corporation*, Taiwan e mais de 150 testes de redes WiMAX estão em andamento na Europa, Ásia, África e Américas do Norte e Sul. Inquestionavelmente, o WiMAX fixo, baseado no padrão IEEE 802.16-2004, se provou uma alternativa sem fio fixa com bom custo-benefício, quando comparado com serviços de cabo e DSL. Em dezembro de 2005, o IEEE ratificou a emenda 802.16e ao padrão 802.16. Esta emenda adiciona ao padrão características e atributos necessários para suportar mobilidade. O WiMAX Móvel é uma solução de banda larga sem fio que permite a convergência de redes de banda larga fixas e móveis através de uma tecnologia de rádio acesso de banda larga e grande área e uma arquitetura de rede flexível.

A Interface Aérea do WiMAX Móvel adota como solução de múltiplo acesso o OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*) de modo a otimizar o desempenho de multipercurso em ambientes sem linha de visada (NLOS - *Non-Line-of-Sight*). A Emenda 802.16e introduz o OFDMA Escalável (*Scalable OFDMA* – SOFDMA) de modo a suportar larguras de banda de canal variáveis de 1,25 a 20 MHz. Os perfis de sistema do WiMAX móvel em sua versão 1 (*Release-1*) englobam canais com largura de banda de 3,5; 5; 7; 8,75 e 10 MHz em espectro licenciado nas faixas de 2,3; 2,4; 2,5; 3,3; 3,5 e 3,8 GHz.

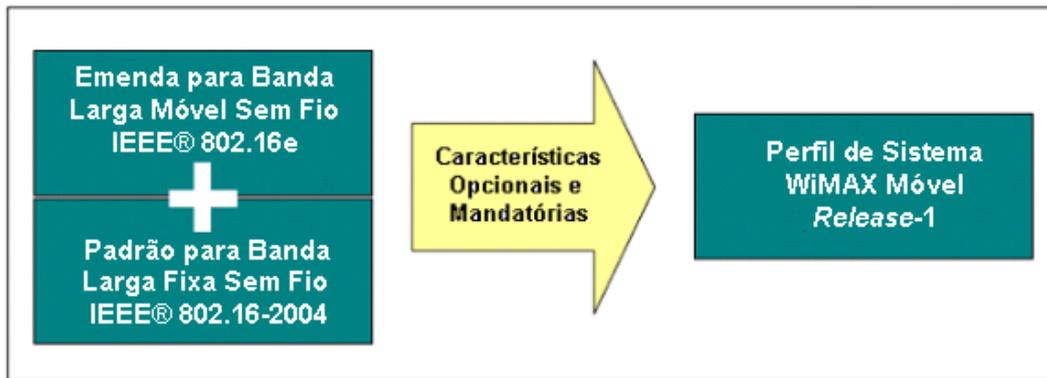


Figura 1 – Perfil de Sistema do WiMAX Móvel

Algumas das características mais importantes suportadas pelo WiMAX Móvel são:

- **Altas taxas de dados:** A inclusão de técnicas MIMO juntamente com esquemas de subcanalização flexível e Modulação e Codificação Adaptativas permitem que o WiMAX Móvel suporte taxas de descida (*downlink* – DL) com picos de 66 Mbps/setor e picos de até 28 Mbps/setor no canal de subida (*uplink* – UL) em um canal de 10 MHz.
- **Qualidade de Serviço (*Quality of Service* – QoS):** A premissa básica do projeto da camada MAC do IEEE 802.16 é a QoS. A camada define Fluxos de Serviço (*Service Flows*) que permitem QoS sobre IP fim-a-fim. Adicionalmente, a subcanalização provê um mecanismo flexível para o agendamento otimizado de recursos de espaço, frequência e tempo na interface aérea numa base de quadro a quadro.
- **Escalabilidade:** Apesar de uma economia crescentemente globalizada, a alocação de recursos de espectro para banda larga sem fio ainda é muito diferenciada de país para país. Desta forma, o WiMAX Móvel foi projetado de modo a funcionar em diferentes canalizações, de 1,25 a 20 MHz. Esta característica também permite a utilização do WiMAX Móvel em ambientes geograficamente díspares, de modo a atender diferentes necessidades econômicas, tais como prover acesso a Internet a baixo custo em ambientes rurais ou

melhorar a capacidade de acesso banda larga móvel em áreas urbanas e suburbanas.

- **Segurança:** O WiMAX Móvel possui as melhores soluções de segurança disponíveis atualmente, tais como autenticação EAP, criptografia AES e métodos de proteção de mensagens de controle. Existe ainda suporte para o emprego de diversos conjuntos de credenciais de usuários, tais como cartões SIM/USIM, *Smart Cards*, certificados digitais e esquemas de Nome de Usuário/Senha.
- **Mobilidade:** O WiMAX Móvel suporta *handover* otimizado com latência menor do que 50 milissegundos para garantir que aplicações em tempo real tais como VoIP não sofram degradação de serviço.

2.2. NOVAS TECNOLOGIAS UTILIZADAS

2.2.1. OFDM

A Multiplexação por Divisão de Frequência Ortogonal (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing* – OFDM) é uma técnica de comunicação que divide um canal em um número de bandas de frequência igualmente espaçadas. Uma subportadora carregando parte dos dados do usuário é transmitida em cada banda. Cada subportadora é ortogonal em relação às demais, o que diferencia a OFDM da Multiplexação por Divisão de Frequência (*Frequency Division Multiplexing* – FDM). A ortogonalidade é obtida fazendo-se a separação entre subportadoras igual ao inverso da duração de símbolo.

A OFDM, ou modulação multiton, como às vezes é chamada, é atualmente utilizada em um grande número de aplicações comerciais com ou sem fio. Nos sistemas com fio, é empregada em alguns tipos de DSL. Nos sistemas sem fio, é a base para vários padrões de difusão de rádio e TV, incluindo o padrão europeu DVB-T de TV digital e o rádio digital na América do Norte.

A OFDM também é empregada em vários sistemas fixos sem fio bem como em produtos de redes locais sem fio (WLANs) e pelo padrão IEEE 802.16 em redes móveis de banda larga, atingindo taxas de dados comparáveis ao de serviços fixos, tais como DSL e modems a cabo. Nestes sistemas, a OFDM permite a

criação de uma arquitetura de sistema flexível que pode ser usada eficientemente para uma grande variedade de serviços, incluindo voz e dados.

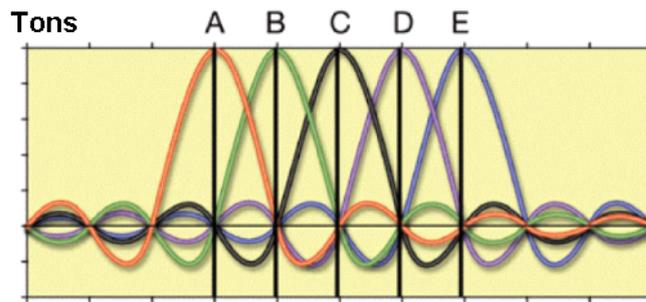


Figura 2 – Tons OFDM

Na FDM convencional, normalmente existem bandas de guarda entre as frequências de modo a reduzir a interferência entre elas. Já a OFDM permite que o espectro de cada tom se sobreponha ao de seus vizinhos, uma vez que eles são ortogonais e não interferem entre si, conforme visto na Figura 2. Ao permitir a sobreposição, reduz-se a necessidade de espectro para transmitir uma dada quantidade de informações.

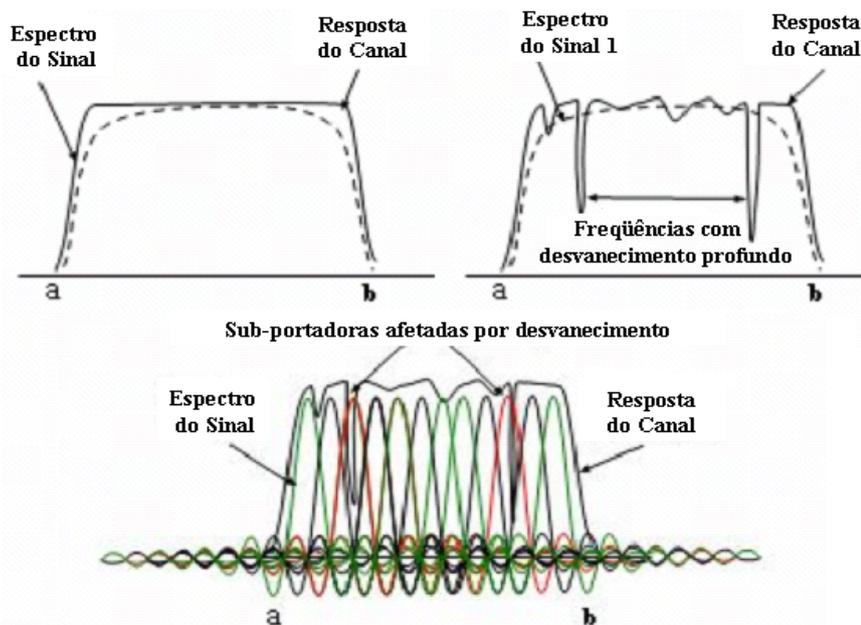


Figura 3 – (a) Resposta do canal e sinal a ser transmitido. (b) Desvanecimento seletivo em frequência. (c) Espectro OFDM é robusto contra desvanecimento seletivo

A informação é modulada em cada tom ajustando-se sua fase, amplitude ou ambos. Em sua forma mais primitiva, um tom pode estar presente ou ausente, indicando um bit um ou zero, correspondendo à modulação OOK. No entanto, normalmente, utiliza-se uma modulação PSK ou QAM.

Um sistema OFDM recebe um fluxo de bits e o divide em N fluxos paralelos, cada um a uma taxa correspondente a 1/N da taxa original. Cada fluxo é então mapeado em uma frequência única e todas as frequências são combinadas utilizando-se uma Transformada Rápida de Fourier Inversa (IFFT) para gerar a forma de onda que será transmitida no domínio do tempo.

Por exemplo, em um sistema com 100 tons, um fluxo de dados com uma taxa de 1 Mbps seria convertido em 100 fluxos de 10 kbps. Ao criar fluxos paralelos mais lentos, a largura de banda dos símbolos de modulação é efetivamente reduzida por um fator de 100, neste caso. A seleção adequada dos parâmetros do sistema tais como o número de tons e o espaçamento entre eles, pode reduzir enormemente, ou mesmo eliminar, a interferência intersimbólica, uma vez que o espalhamento dos atrasos devido ao multipercurso tipicamente representa uma proporção muito menor do alongamento do tempo dos símbolos. Visto de outra forma, a largura de banda de coerência do canal pode ser muito menor, pois a largura de banda dos símbolos foi reduzida. A necessidade de complexos equalizadores multibraços no domínio do tempo pode, assim, ser eliminada.



Figura 4 – Exemplo de transmissor OFDM

A Figura 4 ilustra um transmissor OFDM idealizado e a Figura 5 é a representação de todo o sistema OFDM, com transmissor, receptor e canal.

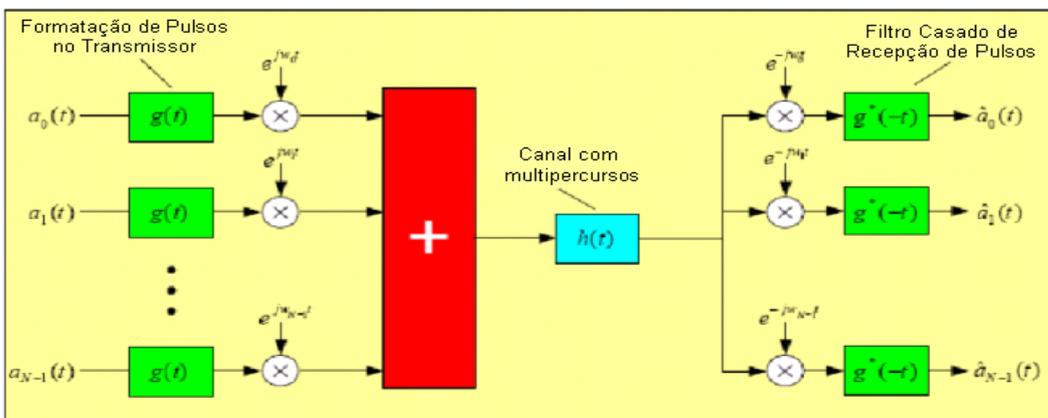


Figura 5 – Arquitetura básica de um sistema OFDM

Se grupos de tons forem alocados para diferentes usuários, teremos um sistema de múltiplo acesso ao meio conhecido como OFDMA, o qual será abordado a seguir. A alocação de portadoras para os usuários é feita pela camada de controle de acesso ao meio (MAC), que irá designar recursos para os usuários de acordo com sua demanda.

A OFDM pode ser combinada com salto em frequência para criar um sistema de espalhamento espectral, o qual se beneficia da diversidade em frequência e redução de interferência atualmente existentes nos sistemas CDMA. Num sistema com salto em frequência, o conjunto de portadoras de um usuário é alterado depois de um determinado período de tempo (usualmente, correspondente ao período de um símbolo de modulação), com o objetivo de reduzir as perdas devidas ao desvanecimento seletivo em frequência.

Embora salto em frequência e CDMA sejam diferentes formas de espalhamento espectral, elas atingem desempenho comparável em um ambiente sujeito a desvanecimento de multipercurso e ambos provêm resultados semelhantes em termos de redução de interferência. Já a OFDM junta o melhor do TDMA, a ortogonalidade entre os usuários, com o melhor do CDMA, como visto acima, simultaneamente eliminando as limitações de ambos, tais como a necessidade de planejamento de frequências do TDMA e a necessidade de equalização e interferência entre usuários (não-ortogonais) do CDMA.

2.2.2. OFDMA

O OFDMA utiliza um espaço de FFT com grande número de portadoras (128, 512, 1024 ou 2048) o qual é dividido em subcanais. Estes são usados no enlace de descida para separar os dados em fluxos lógicos. Estes fluxos empregam diferentes modulações, codificações e amplitudes para atender assinantes sob diferentes condições de canal. No canal de subida, os subcanais são usados para múltiplo acesso. O sistema atribui aos assinantes subcanais através de mensagens do Protocolo de Acesso ao Meio (*Media Access Protocol* – MAP) enviadas no enlace de descida.

Um subcanal é um subconjunto de portadoras do total disponível. De modo a mitigar o desvanecimento seletivo em frequência, as portadoras de um subcanal

são espalhadas ao longo do espectro do canal. A Figura 6a ilustra os princípios da divisão em subcanais. Nesse exemplo, o espaço das portadoras utilizáveis é dividido em N_G grupos sucessivos. Cada grupo contém N_E portadoras sucessivas, após a atribuição inicial das portadoras piloto. Um subcanal tem um elemento de cada grupo alocado através de um processo pseudo-aleatório baseado em permutações, de modo que N_G é o número de elementos dos subcanais. Por exemplo, para $N = 2048$, podemos ter $N_G = 48$ e $N_E = 32$, no canal de descida e $N_G = 53$ e $N_E = 32$ no canal de subida.

Em essência, o princípio do OFDMA consiste em diferentes usuários dividindo o espaço da FFT no canal de subida, enquanto cada um deles transmite um ou mais subcanais. A divisão em subcanais é uma forma de múltiplo acesso por divisão de frequência (FDMA) no qual o assinante transmite a uma taxa de $1/N_E = 1/32$ da largura de banda disponível para um OFDMA de 2048 portadoras. Uma taxa de subida baixa é consistente com a assimetria de tráfego na qual os fluxos de cada assinante se somam em um regime multiponto-ponto, enquanto que no canal de descida todos os subcanais são transmitidos juntos. Desta forma o OFDMA permite uma granularidade fina da alocação de largura de banda, consistente com as necessidades da maioria dos usuários, enquanto grandes consumidores de banda no canal de subida recebem mais de um subcanal. A Figura 6b mostra a estrutura dos subcanais no quadro de subida.

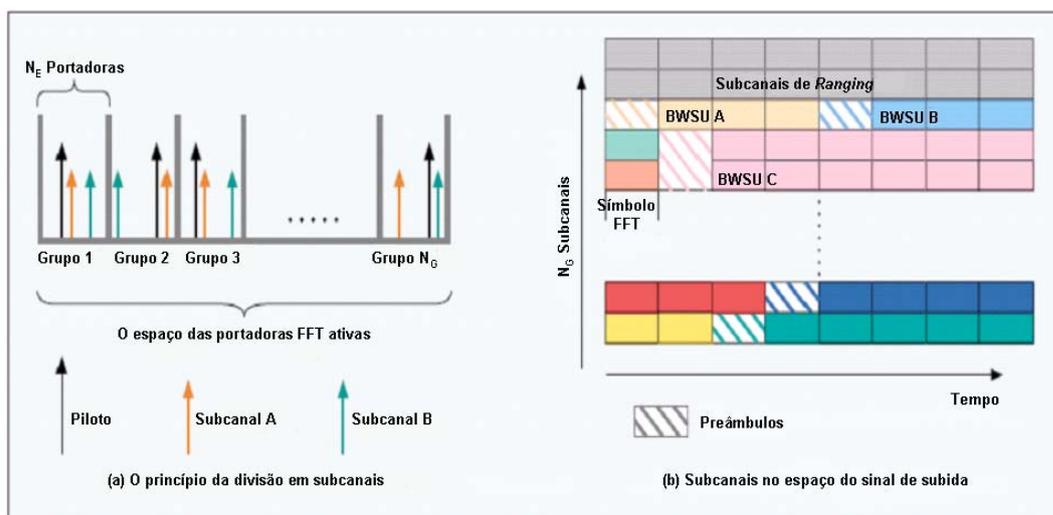


Figura 6 – Subcanais OFDMA

O aspecto mais importante dos canais de subida está relacionado com a cobertura. Um sistema de acesso banda larga sem fio (*Broadband Wireless Access*

– BWA) envolve um transmissor de alta potência no *head end* e uma grande quantidade de terminais de assinante (*Broadband Wireless Subscriber Unit – BWSU*) de baixo custo e baixa potência. Para uma opção OFDMA com $N = 2048$, o terminal do assinante concentra sua potência em um subcanal com $1/32$ da largura de banda do canal.

Em relação à interferência, os subcanais constituem uma forma de espalhamento espectral por salto em frequência (*Frequency Hopping Spread Spectrum – FHSS*). Em cada grupo, um terminal de assinante transmite uma portadora selecionada de forma pseudo-aleatória entre as N_E possíveis. Um terminal de assinante numa célula interferente efetua o mesmo tipo de seleção, mas estatisticamente independente, com probabilidade de colisão de $1/N_E$. Isso é um caso clássico de FHSS com interferência de banda parcial. O cenário de salto em frequência se repete para todos os grupos em um símbolo da FFT. Para $N = 2048$, existem $N_G = 53$ grupos. Os dados das portadoras com baixa taxa de sinal-ruído (SNR) são corrigidos por entrelaçamento (*interleaving*) e codificação. O parâmetro que caracteriza o grau de espalhamento em um sistema de espalhamento espectral é o ganho de processamento (G_P), o qual pode ser expresso como uma função da largura de banda do grupo, W , da taxa de bits de uma portadora, R e da taxa de símbolos, R_S , por:

$$G_P = \frac{W}{R} = \frac{N_E R_S}{m R_S} = \frac{N_E}{m} = \frac{32}{m} \quad (2.1)$$

Onde m é a densidade de modulação, isto é, 2 para QPSK, 4 para 16-QAM e 6 para 64-QAM. O ganho de processamento é importante em sistemas celulares por que ele se relaciona com a resistência a interferência do esquema de codificação e modulação em uso, ou a relação portadora-interferência (C/I) em operação quase sem erros, que é o maior fator limitante da capacidade:

$$\left(\frac{C}{I}\right)_{BER=10^{-6}} = \frac{R \cdot E_b}{W \cdot N_0} = \frac{1}{G_P} \left(\frac{E_b}{N_0}\right) \quad (2.2)$$

Não existe interferência no canal de subida dentro de uma célula, uma vez que os subcanais são ortogonais e cada elemento de um grupo é utilizado por apenas um subcanal. Tal comportamento é superior ao exibido por sistemas CDMA, os quais sofrem de interferência intra-usuários no canal de subida pois os

códigos usados neste canal não são ortogonais. A Figura 6b ilustra o espaço do sinal de subida OFDMA. Alguns subcanais são reservados para processos da camada física (PHY), tais como *ranging*, enquanto outros transportam dados dos assinantes de acordo com as alocações nas mensagens MAP. Cada transmissão se inicia com um preâmbulo.

A Figura 7 a seguir é uma outra ilustração de um sinal OFDMA, com suas dimensões de tempo e frequência. Notar que cada cor representa um usuário diferente.

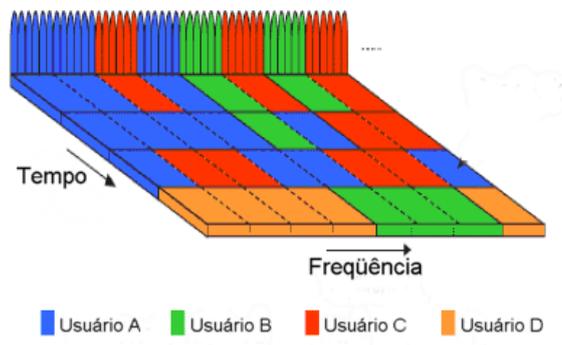


Figura 7 – Sinal OFDMA ao longo do tempo e das frequências

Como os pacotes OFDMA podem ser distribuídos ao longo das frequências (subcanais) e do tempo (símbolos), pode-se ter maior granularidade na alocação de recursos, como já mencionado anteriormente, mais graus de liberdade e mais justiça na alocação de recursos, o que facilita a garantia de qualidade de serviço (QoS). Em comparação, o TDMA e o CDMA só possuem uma dimensão (tempo).

A Figura 8 é uma ilustração do espectro OFDMA sendo utilizado por quatro usuários simultaneamente. Num sistema WiMAX real, o número de usuários é maior do que quatro, obviamente, esta ilustração é meramente informativa.

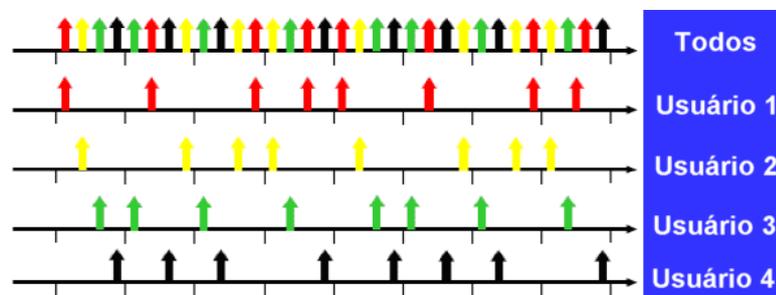


Figura 8 – Exemplo de espectro OFDMA

A Figura 9 mostra a alocação de portadoras para dados e para sinais piloto.

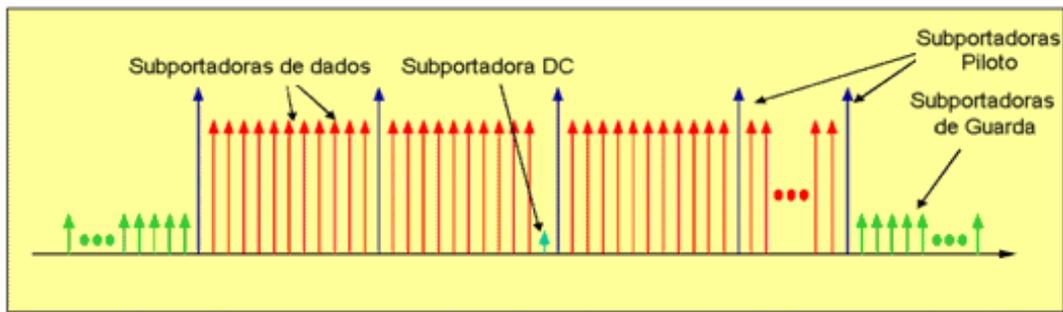


Figura 9 – Estrutura das subportadoras (subcanais) OFDMA

2.2.3. OFDMA escalável (S-OFDMA)

O modo OFDMA do padrão IEEE 802.16e-2005 se baseia no conceito de OFDMA Escalável (S-OFDMA), o qual suporta uma grande gama de larguras de banda de modo a atender flexivelmente às várias necessidades de alocação de espectro e requisitos de utilização.

A escalabilidade é atingida ajustando-se o tamanho da FFT enquanto se mantém o espaçamento entre as subportadoras fixo em 10,94 kHz. Uma vez que a unidade de largura de banda da subportadora e duração do símbolo são fixadas, o impacto nas camadas superiores é mínimo ao se variar a largura de banda do canal. Alguns parâmetros do S-OFDMA do WiMAX são listados na Tabela 1.

Parâmetros	Valor			
Largura de banda do canal (MHz)	1,25	5	10	20
Frequência de amostragem (F_p em MHz)	1,4	5,6	11,2	22,4
Tamanho da FFT (N_{FFT})	128	512	1024	2048
Número de subcanais	2	8	16	32
Número de subportadoras de dados usadas	72	360	720	1440
Número de subportadoras piloto	12	60	120	240
Número de subportadoras nulas/banda de guarda	44	92	184	368
Espaçamento de frequência das subportadoras	10,94 kHz			
Tempo útil do símbolo ($T_b = 1/f$)	91,4 μ s			
Tempo de guarda ($T_g = T_b/8$)	11,4 μ s			
Duração do símbolo OFDMA ($T_s = T_b + T_g$)	102,9 μ s			
Número de símbolos OFDMA (para quadro de 5 ms)	48			

Tabela 1 – Parâmetros de Escalabilidade do OFDMA

2.2.4. OFDMA TDD

A camada física do 802.16e suporta operação FDD *Full* e *Half Duplex* e TDD, entretanto a versão inicial dos perfis de certificação do WiMAX móvel só inclui a TDD. De modo a combater a interferência, a operação TDD requer que o sistema seja inteiramente sincronizado, ainda assim, a TDD é a solução preferida para o WiMAX devido aos seguintes fatores:

- A TDD permite um ajuste dinâmico das taxas dos enlaces de descida e subida de modo a suportar eficientemente a assimetria do tráfego DL/UL, ao passo que a FDD sempre tem taxas fixas e geralmente iguais para DL e UL.
- Com a TDD pode-se explorar a reciprocidade do canal de modo a permitir que tanto a ERB quanto o móvel empreguem modulação e codificação adaptativas, MIMO e outras tecnologias avançadas de antenas em malha fechada.
- Ao contrário da FDD que requer um par de frequências, a TDD necessita de uma única frequência para os enlaces de descida e subida, o que facilita a adaptação do WiMAX aos diferentes ambientes regulatórios de espectro ao redor do mundo.
- Projetos de transceptores TDD são menos complexos e portanto mais baratos.

2.2.5. Reuso de Frequência Fracionário

O WiMAX móvel suporta reuso de frequência unitário, isto é, todas(os) as(os) células/setores operam na mesma frequência para maximizar a eficiência espectral. Entretanto, devido à grande interferência co-canal que isso gera, usuários nas bordas das células podem sofrer degradação na qualidade da conexão. Com o WiMAX móvel, no qual os usuários operam em subcanais, o problema da interferência nas bordas pode ser solucionado pela configuração adequada da utilização dos subcanais sem precisar empregar um planejamento de frequências tradicional.

No WiMAX móvel, o reuso flexível de subcanais é facilitado pela segmentação e zona de permutação dos subcanais. Um segmento é uma subdivisão dos canais OFDMA disponíveis (um segmento pode incluir todos os subcanais). Já a zona de permutação é o número de símbolos OFDMA contíguos nos enlaces de descida e subida que utilizam a mesma permutação, conforme a Figura 10.

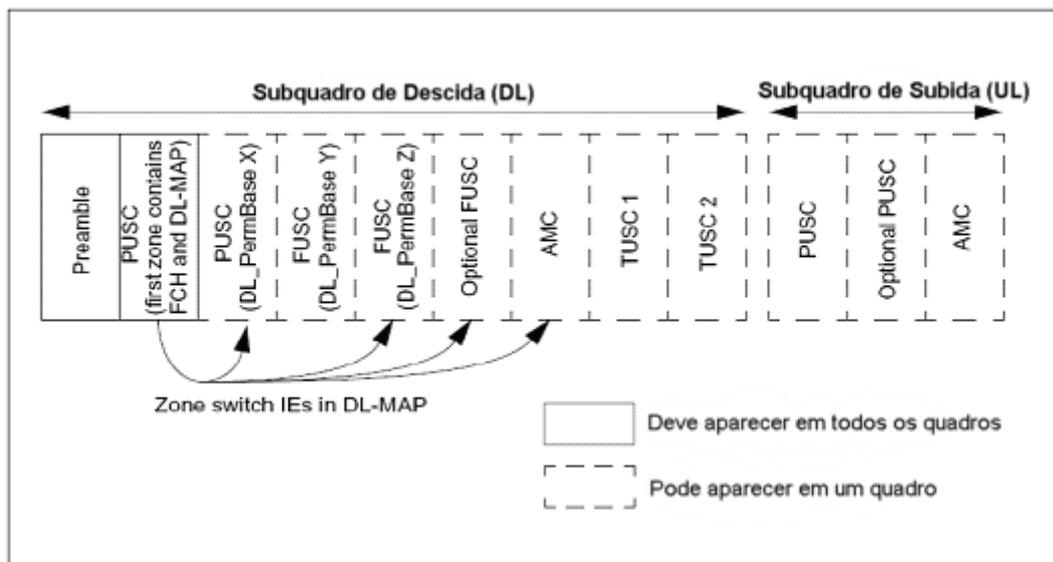


Figura 10 – Estrutura de um quadro multizona

O padrão de reuso dos subcanais pode ser configurado de modo que usuários próximos à ERB operem na zona com todos os subcanais disponíveis, ao passo em que usuários nas bordas de uma célula ou setor operam numa zona com apenas uma fração dos subcanais disponíveis. Na Figura 11, F1, F2 e F3 representam diferentes conjuntos de subcanais num mesmo canal. Com esta configuração, é possível utilizar reuso de frequência unitário com carga máxima próximo ao centro da célula para maximizar a eficiência espectral e simultaneamente utiliza-se reuso fracionário nas bordas para assegurar que os usuários nestes locais tenham a melhor qualidade de conexão possível e obtenham as maiores taxas possíveis. O planejamento de reuso de subcanais pode ser otimizado dinamicamente ao longo dos setores e células baseado na carga da rede e nas condições de interferência numa base de quadro a quadro. Desta forma, todas as células e setores podem operar na mesma frequência sem a necessidade de planejamento de frequência.

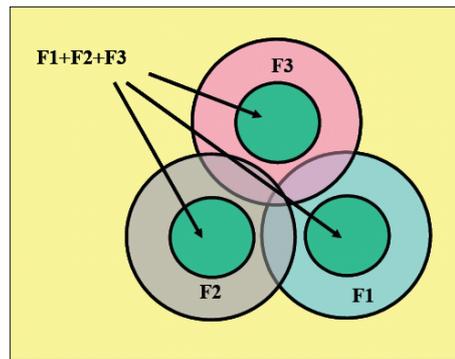


Figura 11 – Reuso de frequência fracionário

2.2.6. Antenas Inteligentes

O conceito de usar múltiplas antenas e processamento de sinal inovador para servir células de forma mais inteligente existe há vários anos. De fato, sistemas de antenas inteligentes relativamente caros já foram aplicados em sistemas militares, no entanto seu alto custo impediu sua disseminação em sistemas comerciais até recentemente. O advento de processadores digitais de sinais (DSPs) poderosos e de baixo custo, processadores de uso geral e circuitos de aplicação específica (ASICs), bem como inovadoras técnicas de processamento de sinais por *software* tornou os sistemas de antenas inteligentes práticos para uso em sistemas de comunicações celulares. Com essas soluções, é possível obter maior área de cobertura para cada célula, elevada rejeição de interferência e substanciais melhorias de capacidade.

Na realidade, obviamente, antenas não são inteligentes – os sistemas de antenas, sim. Geralmente instalados em uma ERB, os sistemas de antenas combinam um conjunto de antenas com um dispositivo de processamento digital para transmitir e receber de uma forma espacialmente adaptativa, isto é, tais sistemas podem automaticamente mudar a direção de seus padrões de irradiação em resposta ao ambiente de propagação. Isto pode aumentar o desempenho de um sistema sem fio dramaticamente.

Os sistemas de antenas inteligentes são normalmente categorizados como de feixe comutado ou conjuntos adaptativos.

- **Feixe Comutado:** emprega um número finito de padrões ou estratégias de combinação predeterminadas.

- **Conjunto Adaptativo:** emprega um número infinito de padrões que são ajustados em tempo real às condições do canal.

Em termos de padrões de irradiação, sistemas de feixe comutado são uma extensão do processo de setorização empregado nos sistemas de telefonia celular atuais. A comutação de feixe subdivide macro-setores em vários micro-setores como uma forma de aumentar o alcance e a capacidade. Cada micro-setor contém um número predeterminado de padrões de irradiação fixos com o máximo de sensibilidade localizado no centro do feixe. O projeto desses sistemas envolve antenas de largura de feixe azimutal estreita e alto ganho.

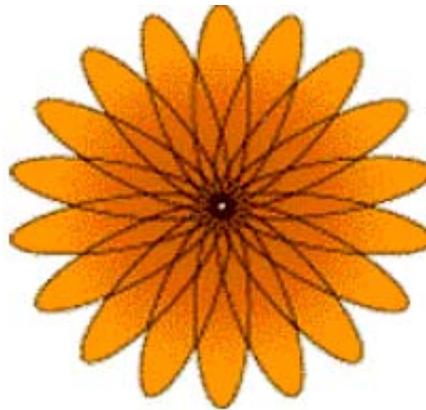


Figura 12 – Padrão de cobertura setorizada de sistema de feixe comutado

Esse tipo de sistema seleciona um dos padrões predeterminados, com base numa combinação ponderada das saídas das antenas, visando obter a maior saída de potência no canal do usuário remoto. Esta escolha é feita por um *hardware* de RF ou um DSP de banda base e por um *software* de controle associado. O sistema comuta seu feixe em diferentes direções através da variação das diferenças de fase dos sinais usados para alimentar os elementos de antena ou delas recebidos, ou seja, em lugar de formatar o padrão direcional da antena com as propriedades metálicas e o projeto físico de um único elemento (tal como uma antena setorizada), tais sistemas combinam a saída de múltiplas antenas de uma forma a gerar feixes finamente setorizados (altamente direcionais) com maior seletividade espacial do que pode ser conseguido com abordagens convencionais de elementos únicos.

Quando um usuário móvel entra em um macro-setor em particular, tal sistema seleciona o micro-setor que obtém o sinal mais intenso. Ao longo da chamada, o sistema monitora a intensidade do sinal recebido e comuta-o para outros micro-setores fixos conforme a necessidade.



Figura 13 – Diferença entre uma estratégia comutada e uma adaptativa

Os sistemas adaptativos representam a tecnologia mais avançada de antenas inteligentes até o momento, abordando a comunicação entre um usuário e a ERB de uma forma diferente, com efeito adicionando uma dimensão espacial. Ao se ajustar ao ambiente variável de RF à medida que este varia (ou varia a origem espacial dos sinais), o sistema adaptativo pode dinamicamente alterar o padrão de irradiação do conjunto de modo a otimizar o desempenho do sistema sem fio.

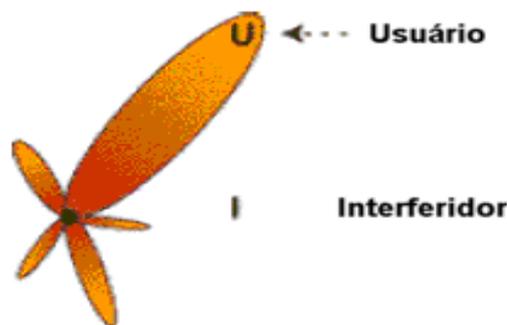


Figura 14 – Cobertura de um conjunto adaptativo: Lóbulo principal voltado para usuário e nulo voltado para interferência co-canal

Conjuntos adaptativos utilizam sofisticados algoritmos de processamento de sinais para distinguir continuamente entre os sinais desejados, multipercurso e sinais interferentes bem como calcular suas direções de chegada. Esta abordagem continuamente atualiza sua estratégia de transmissão baseado em mudanças nas localizações tanto dos sinais desejados quanto dos sinais interferentes. A

capacidade de acompanhar os usuários continuamente com os lóbulos principais e os sinais interferentes com os nulos do padrão de irradiação permite que o balanceamento do enlace seja constantemente maximizado pois não existem micro-setores ou padrões pré-definidos (isto é, minimiza a interferência e simultaneamente, maximiza a recepção do sinal desejado). A Figura 15 ilustra uma comparação entre as áreas de cobertura para uma setorização convencional, para um sistema de feixe comutado e um conjunto adaptativo. Ambos os sistemas de antenas inteligentes produzem significativos ganhos em relação à setorização tradicional. O lado esquerdo da figura representa um sistema sem fio novo com baixa penetração de mercado e portanto com baixa interferência. Já o lado direito representa tanto um sistema com alta penetração quanto um padrão de reuso de frequências agressivo, situações que levam a um alto nível de interferência. Neste cenário, a capacidade de rejeição de interferência do sistema adaptativo provê uma significativa vantagem de cobertura em relação aos sistemas.

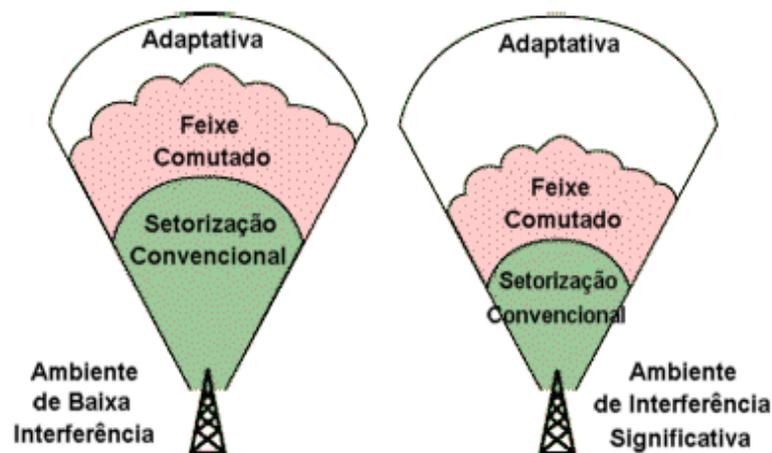


Figura 15 – Padrão de cobertura para feixe comutado e conjunto de antenas adaptativas

Ambas as abordagens tentam aumentar o ganho de acordo com a localização do usuário, entretanto, apenas os sistemas adaptativos fornecem ganho ótimo enquanto simultaneamente identificam, seguem e minimizam os sinais interferentes. Como vantagens e desvantagens dos dois tipos de sistemas de antenas inteligentes, pode-se listar:

- **Integração:** Sistemas de feixe comutado são tradicionalmente projetados para serem adaptados em sistemas celulares em operação. Têm sido comumente implementados como uma tecnologia

complementar que atendem inteligentemente as necessidades de redes maduras. Em comparação, conjuntos adaptativos têm sido instalados com uma abordagem mais integrada que exige menor redundância de *hardware* mas requer uma nova rede.

- **Alcance/Cobertura:** Sistemas de feixe comutado podem aumentar o alcance de uma ERB de 20 a 200 % em relação a células setorizadas tradicionais, dependendo das circunstâncias ambientais e da combinação de *hardware/software* utilizada. A cobertura adicional pode permitir ao operador uma economia substancial em gastos com infra-estrutura, o que se reflete como menores preços para o usuário final. Além disso, a comutação dinâmica de um feixe para outro conserva capacidade do sistema, pois não é necessário enviar todos os sinais em todas as direções. Em comparação, conjuntos adaptativos podem cobrir uma área ainda maior com os mesmos níveis de potência de um sistema de feixe comutado.
- **Supressão de interferência:** Os sistemas de feixe comutado suprimem interferência que chega em direções fora do centro ativo do feixe. Entretanto, como os padrões de irradiação são fixos, a real rejeição de interferência é normalmente o ganho do feixe selecionado na direção do interferidor. Além disso, tais sistemas são normalmente empregados apenas na recepção devido à percepção ambígua da localização do sinal recebido (são evidentes as conseqüências de se transmitir na direção errada). Outro problema é que a sensibilidade do sistema varia com a movimentação do usuário, pois os feixes são fixos. As soluções de comutação de feixe funcionam melhor em situações de interferência co-canal mínima a moderada e sofrem de dificuldade de distinguir entre um sinal legítimo e um sinal interferente. Se o sinal interferente estiver próximo do centro do feixe selecionado e o usuário estiver afastado deste centro, o sinal interferente será muito mais amplificado do que o sinal do usuário, degradando a qualidade do serviço para este usuário. Por sua vez, conjuntos adaptativos oferecem uma maior rejeição de interferência e também produzem menos interferência para usuários vizinhos ao usuário que está sendo atendido por um

dados devido às infinitas combinações que a estratégia adaptativa permite.

- **Múltiplo Acesso por Divisão Espacial (SDMA):** SDMA é uma das mais sofisticadas aplicações da tecnologia de antenas inteligentes, que emprega avançadas técnicas de processamento para localizar e seguir terminais móveis ou fixos, adaptativamente direcionando os sinais transmitidos para os usuários e para longe das interferências. Esta tecnologia de conjunto adaptativo alcança níveis superiores de supressão de interferência, permitindo um reuso de frequências mais eficiente do que os padrões de reuso hexagonais tradicionais. Em essência, o esquema pode adaptar as alocações de frequência para os locais onde se concentram os usuários.

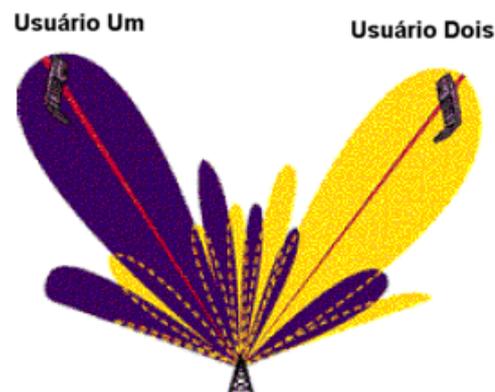


Figura 16 – Exemplo de sistema adaptativo atendendo a dois usuários simultaneamente no mesmo canal

Através do emprego de algoritmos sofisticados e *hardware* de alta velocidade, o processamento espacial leva a vantagem do reuso de frequência a um novo nível, graças a sua capacidade de supressão de interferência. Na prática, o processamento espacial dinamicamente cria um setor diferente para cada usuário e efetua uma alocação de frequências em tempo real.

Antenas omnidirecionais se distinguem de suas contrapartes inteligentes pelo número de antenas empregado. Sistemas de feixe comutado e conjuntos adaptativos, no entanto, dividem muitas características de *hardware* e se distinguem principalmente pela inteligência adaptativa deste último. O processamento de informações direcionalmente sensitivas requer um conjunto de elementos de antena (tipicamente, de 4 a 12), cujas entradas são combinadas para

controlar adaptativamente a transmissão do sinal. Os elementos de antena podem ser organizados em configurações lineares, circulares ou planares e são usualmente instalados nas ERBs, embora possam também ser empregados em telefones móveis ou computadores portáteis.

Soluções de antenas inteligentes se tornam necessárias à medida que cresce o número de usuários, a interferência e a complexidade da propagação. Sua inteligência encontra-se no processamento digital dos sinais a serem transmitidos ou recebidos, sendo que o formato digital oferece muitas vantagens à manipulação da RF em termos de precisão e flexibilidade de operação.

Um sistema de antenas inteligentes tem o propósito duplo de aumentar a qualidade do sinal rádio através de uma transmissão mais focada dos mesmos bem como aumentar a capacidade através de um reuso de frequência mais agressivo. A Tabela 2 lista as características de um sistema inteligente e os benefícios delas derivados.

Característica	Benefício
Ganho de Sinal – Entradas de múltiplas antenas são combinadas para otimizar a potência disponível necessária para o estabelecimento de um dado nível de cobertura.	Melhor alcance/cobertura – Ao se focar a energia transmitida para uma célula, aumenta-se o alcance e cobertura da ERB. Menor requisito de potência também permite uma maior vida útil da bateria e terminais móveis menores e mais leves.
Rejeição de Interferência – Padrão de antena pode ser gerado de modo a direcionar um nulo para uma interferência co-canal, aumentando a relação sinal-interferência dos sinais recebidos.	Aumento de capacidade – Controle preciso dos nulos do sinal e redução da interferência se combinam para reduzir a distância de reuso de frequência (ou reduzir o tamanho do cluster), aumentando a capacidade.
Diversidade Espacial – Informações compostas de um conjunto de antenas são usadas para minimizar o desvanecimento e outros efeitos indesejáveis da propagação com multipercurso.	Rejeição de multipercurso – Permite reduzir o espalhamento efetivo dos atrasos do canal, permitindo a utilização de taxas de bits mais elevadas sem o uso de equalizadores.
Eficiência de Potência – Combina as entradas em múltiplos elementos para otimizar o ganho de processamento no enlace de descida.	Redução de custos – Menores custos com amplificadores, consumo de energia e confiabilidade superior como resultado.

Tabela 2 – Características e benefícios de sistemas de antenas inteligentes

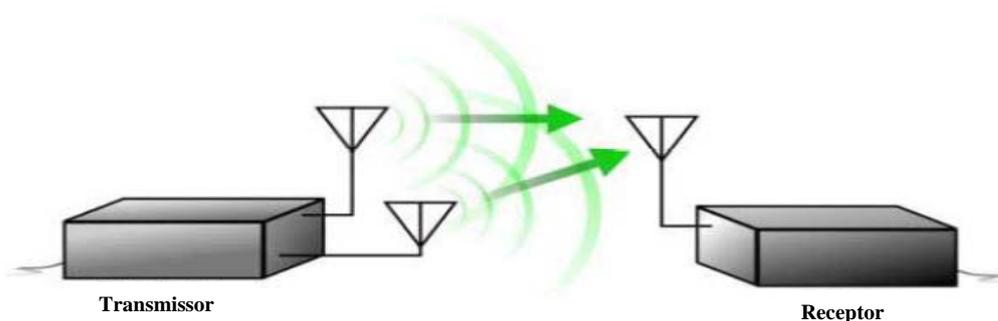
2.2.7. MIMO (MULTIPLE INPUT MULTIPLE OUTPUT)

A propagação por multipercurso é uma característica de todos os meios de comunicação sem fio. Normalmente, existe um percurso primário (o mais direto possível) a partir de um transmissor no ponto A para um receptor num ponto B. Inevitavelmente, alguns sinais transmitidos seguem outros caminhos para o receptor, se refletindo em objetos, no chão, ou nas camadas da atmosfera.

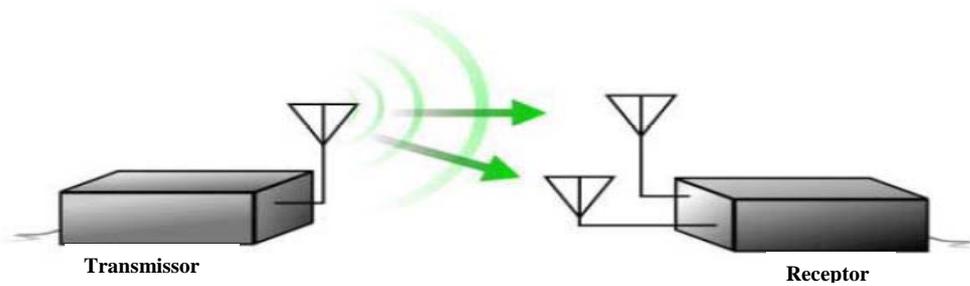
Os sistemas tradicionais de rádio que não possuem mecanismos para combater os sinais de multipercurso dependem de que o sinal primário seja intenso o suficiente para superar as interferências. Sistemas mais sofisticados utilizam técnicas de diversidade espacial com múltiplas antenas para captar o sinal mais forte a cada instante de tempo. Outra técnica muito utilizada é a de equalização temporal, que adiciona atrasos diferentes aos sinais recebidos para forçar o realinhamento dos picos e fundos dos diferentes sinais de multipercurso.

A tecnologia MIMO tira vantagem da propagação de multipercurso para aumentar a vazão, alcance/cobertura, e confiabilidade. Em lugar de combater os efeitos do multipercurso, a técnica MIMO utiliza os sinais de multipercurso para transportar mais informações. Isso é obtido enviando e recebendo mais de um sinal de dados no mesmo canal de rádio ao mesmo tempo.

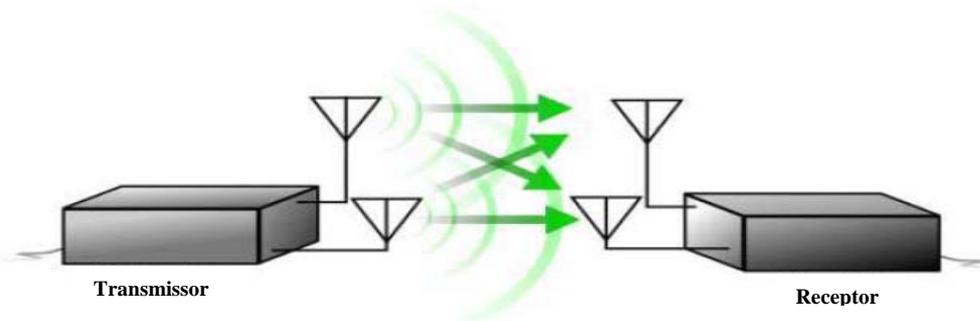
Numa primeira análise, sistemas de antenas inteligentes e sistemas MIMO podem parecer a mesma coisa: ambos utilizam múltiplas antenas espaçadas tão longe quanto possível. No entanto, trata-se de sistemas fundamentalmente diferentes, como ilustrado na Figura 17.



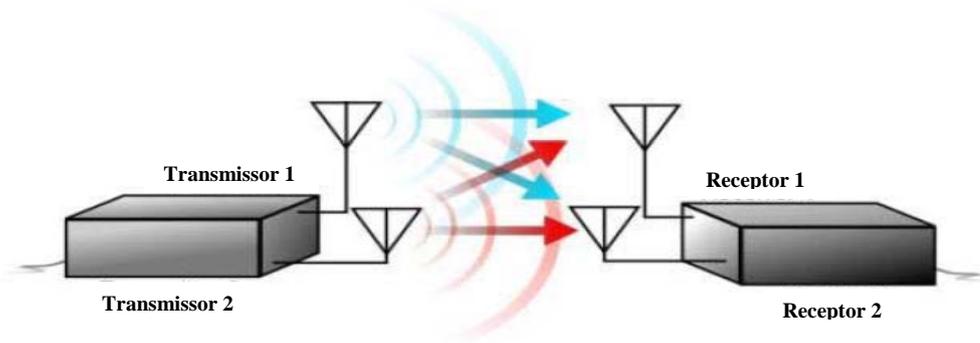
(a) Formatação (ou direcionamento) de feixe emprega duas antenas para minimizar o multipercurso.



(b) Diversidade de recepção emprega duas antenas de recepção para receber o melhor sinal de multipercurso.



(c) Na abordagem de formatação de feixe e diversidade somente um sinal é enviado pelo canal.



(d) A técnica MIMO emprega múltiplos transmissores, receptores e antenas, aumentando a eficiência espectral.

Figura 17 – Comparação entre esquemas de antenas inteligentes (a, b, c) e sistemas MIMO (d)

2.2.8. Códigos Espaço-Temporais

O diagrama de um sistema MIMO é mostrado na Figura 18. Uma fonte digital comprimida na forma de um fluxo binário de dados é alimentada por um bloco transmissor simplificado, englobando as funções de codificação para controle de erros e mapeamento de símbolos de modulação complexa (QPSK, M-QAM, etc.).

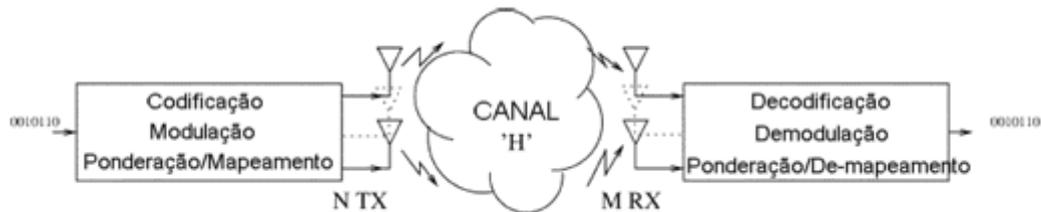


Figura 18 – Diagrama de um sistema MIMO de transmissão sem fio.

Este sistema produz vários fluxos de símbolos separados, que variam desde fluxos independentes a parcialmente redundantes, até totalmente redundantes. Cada fluxo é então mapeado em uma das diversas antenas de transmissão. O mapeamento pode incluir uma ponderação linear espacial dos elementos da antena ou uma pré-codificação linear espaço-temporal. No receptor, os sinais são capturados por possivelmente múltiplas antenas e as operações de demodulação e decodificação são executadas para recuperar a mensagem. O nível de inteligência, complexidade e, conhecimento *a priori* do canal usado para selecionar a codificação e os algoritmos de mapeamento da antena variam muito, dependendo da aplicação e determinam o desempenho do sistema.

Em sistemas de antenas inteligentes convencionais, somente o transmissor ou o receptor é equipado com mais de um elemento, sendo tipicamente a ERB, onde o custo extra e o gasto de espaço têm um menor impacto do que em um pequeno terminal de usuário. Na medida em que as unidades dos assinantes evoluem para se tornarem sofisticados dispositivos de acesso à Internet sem fio, em lugar de simples telefones de bolso, as rígidas limitações de complexidade e tamanho podem ser ligeiramente relaxadas. Isto torna possível a utilização de transceptores de múltiplas antenas uma possibilidade em ambos os lados do enlace, ainda que seja mais econômico colocar a parte mais pesada de processamento e custo do sistema no lado da rede da operadora e não nos terminais dos assinantes. Em um enlace MIMO, os benefícios das antenas inteligentes convencionais permanecem uma vez que a otimização dos sinais das múltiplas antenas é efetuada em um espaço maior, o que permite graus de liberdade adicionais.

A Figura 19 ilustra uma aplicação de sistema MIMO. Um fluxo de bits de alta taxa (esquerda) é decomposto em três seqüências de bits independentes que

são transmitidos simultaneamente usando múltiplas antenas, que ocupam um terço do espectro total.

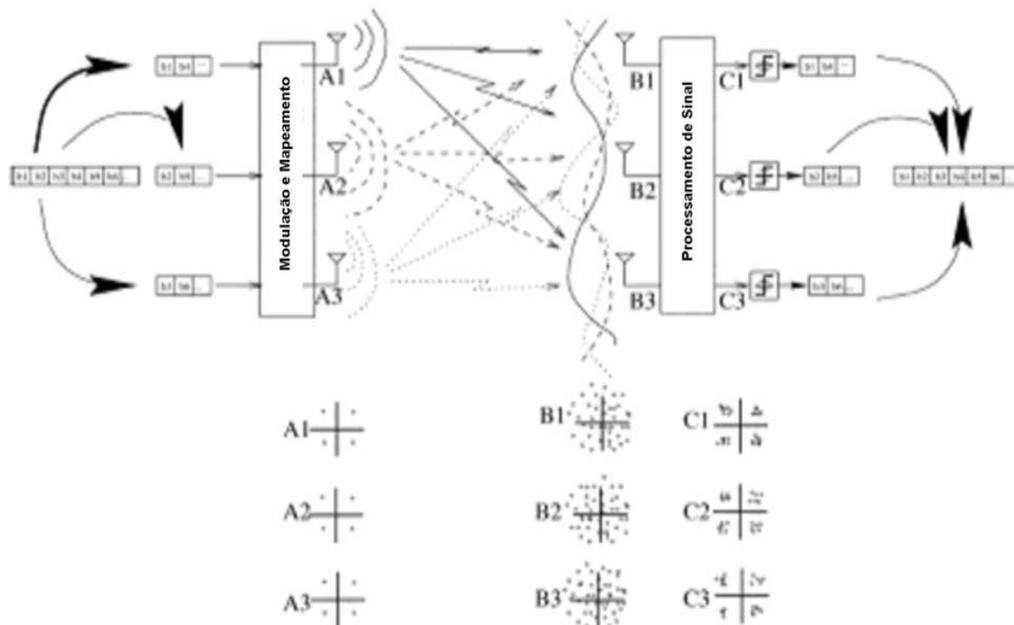


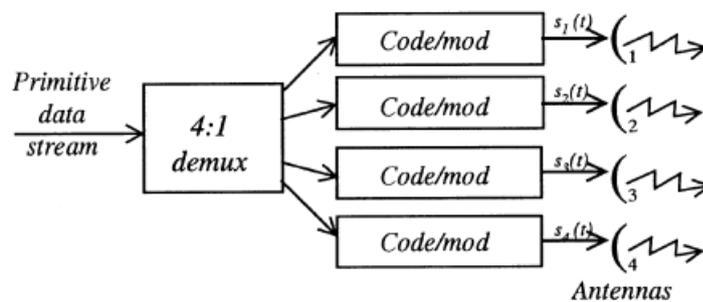
Figura 19 – Multiplexação espacial básica com 3 antenas de TX e RX.

No receptor, após a identificação da matriz do canal através de símbolos de treinamento, os fluxos de bits individuais são separados e decodificados. Isto ocorre da mesma forma que se resolve um sistema linear de três equações e três incógnitas. Aqui, supõe-se que cada par de antenas TX-RX forma um único canal escalar, o que leva a condições de desvanecimento plano. No entanto, é possível estender essa tecnologia para casos de desvanecimento seletivo em frequência seja usando uma abordagem de múltiplas portadoras (OFDM), na qual a detecção é efetuada em cada subportadora sujeita a desvanecimento plano, ou então no domínio do tempo pela combinação de um detector MIMO espaço-temporal com um equalizador.

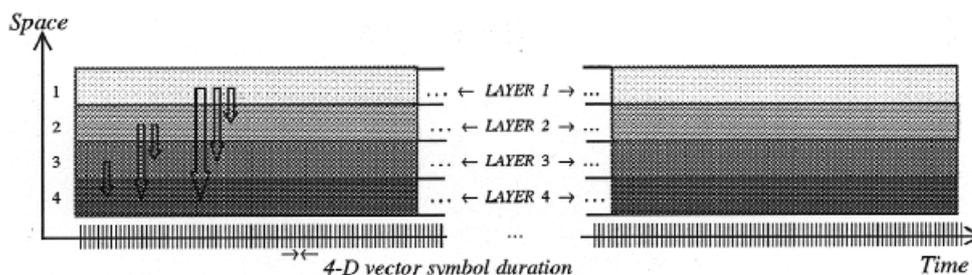
Uma forte analogia pode ser feita com a transmissão CDMA, em que múltiplos usuários compartilham o mesmo canal de frequência ao longo do tempo, e a separação é feita através de seus códigos únicos. A diferença é que no caso de sistemas MIMO, a separação entre os usuários é dada pela própria natureza do desvanecimento de uma forma quasi-ortogonal sem a necessidade de espalhamento em frequência e, portanto sem redução da eficiência espectral. Vale notar que, ao contrário do CDMA, no qual as assinaturas dos usuários são quase-

ortogonais por projeto, a separabilidade do canal MIMO depende da presença de sinais em multipercurso para tornar o canal espacialmente seletivo.

As figuras a seguir ilustram outros exemplos de códigos espaço-temporais. A Figura 20 é um exemplo de sistema de transmissão “horizontal” com quatro fluxos de dados. Em 20a, um fluxo primário de dados é demultiplexado e processado para ser transmitido como quatro fluxos independentes de dados. Tais fluxos podem ou não ter taxas iguais. Em 20b, temos uma ilustração do espaço-tempo ocupado pela mensagem transmitida. Um retângulo de espaço-tempo é composto por quatro camadas horizontais, uma para cada transmissor. As setas indicam que cada camada sofre interferência das camadas acima.



(a)



(b)

Figura 20 – Sistema de transmissão com 4 camadas horizontais.

A Figura 21 ilustra um sistema com quatro camadas “diagonais”. Em 21a, dados de um fluxo primário são demultiplexados e processados para transmissão em quatro fluxos independentes. Tipicamente, os fluxos possuem a mesma taxa de bits. Em 21b, tem-se uma ilustração do retângulo de espaço-tempo ocupado pela mensagem. Ao compararmos 21b com 20b, vemos que sobre os retângulos tem-se um padrão diagonal de camadas formado pela circulação de cada símbolo codificado antes da transmissão.

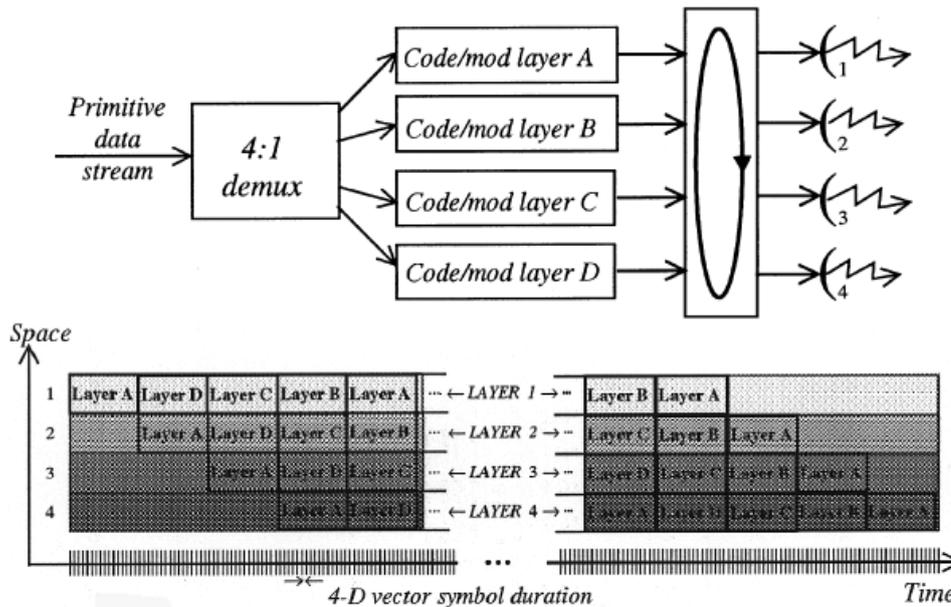


Figura 21 – Sistema de transmissão com 4 camadas diagonais.

2.3. PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DO PADRÃO IEEE 802.16e-2005

O objetivo desta seção é discutir de forma resumida algumas características importantes do padrão 802.16e-2005 relevantes para o planejamento de redes WiMAX móveis.

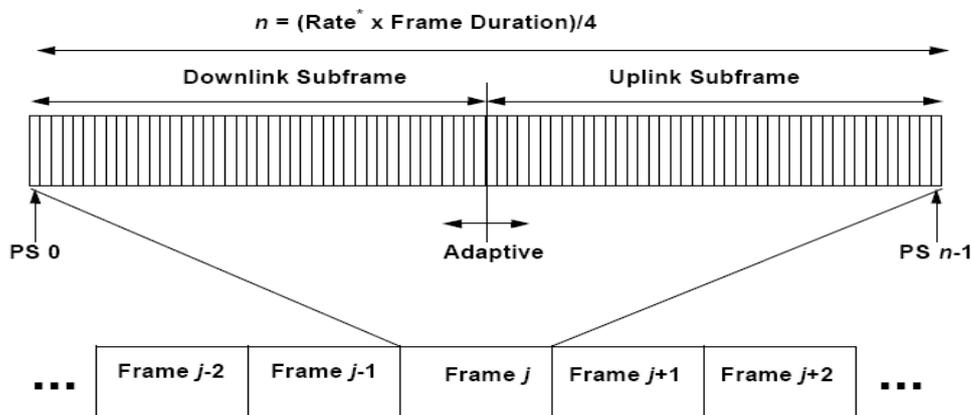
2.3.1. Suporte MAC à camada física (PHY)

O protocolo da camada MAC suporta duplexação FDD e TDD, de acordo com o especificado no padrão [1] e [2], porém o Perfil de Sistema do WiMAX móvel definido pelo WiMAX Fórum [3] limita a implementação do sistema móvel à duplexação TDD, de modo que só esta opção será aqui examinada.

2.3.1.1. Duplexação por Divisão do Tempo (TDD)

No caso TDD, as transmissões de subida e descida ocorrem em tempos diferentes e normalmente compartilham a mesma frequência. Um quadro TDD (Figura 22) possui uma duração fixa e contém um subquadro de subida e outro de descida. O quadro é dividido em um número inteiro de *slots* físicos, o que facilita o particionamento de largura de banda. O enquadramento TDD é adaptativo, de

modo que as bandas alocadas para os enlaces de subida e descida podem variar. A razão entre taxa de subida e descida é um parâmetro do sistema e é controlado em camadas superiores do mesmo.



[*] for SC, SCa, the Rate is the Symbol Rate; for OFDM, OFDMA, the Rate is the nominal sampling frequency (Fs).

Figura 22 – Estrutura do quadro TDD

A temporização do enlace de subida é referenciada a partir do início do subquadro de descida. O Tempo Inicial de Alocação na UL-MAP é referenciado em relação ao início do subquadro de descida e pode ser tal que a UL-MAP referencie algum ponto no quadro atual ou em um quadro futuro. A estação de usuário deve sempre ajustar sua temporização de subida baseado nos Ajustes Temporais enviados nas mensagens RNG-RSP.

2.3.1.2.

Procedimentos para compartilhamento de bandas de frequência

O padrão prevê procedimentos que podem ser empregados quando um sistema 802.16e compartilhar uma banda de frequência com outro sistema ou serviço, tanto para reduzir a interferência de ou em outros sistemas, quanto para facilitar a coexistência de sistemas ou por outras razões. Estes procedimentos geralmente envolvem mecanismos para facilitar a detecção de outros usuários, e para evitar e prevenir interferência nociva a outros usuários. Incluído nesses procedimentos para certos cenários de compartilhamento, requisitos regulatórios especificam que Seleção Dinâmica de Frequência (conforme definido pela ITU-R em M.1652) deve ser usada para facilitar o compartilhamento com certos usuários específicos do espectro que devem ser protegidos de interferência nociva,

identificados pelas normas regulatórias de cada país. Nos casos em que a Seleção Dinâmica de Frequência for necessária por requisitos regulatórios, deverá ser implementada de acordo com o especificado no padrão [1] e [2].

Além disso, o uso de algoritmos de seleção de canais pode ser também necessário, o que resulta em um espalhamento uniforme dos canais ao longo de um número mínimo de canais.

Os procedimentos especificados no padrão prevêm:

- Teste de canais para detecção de outros usuários, inclusive usuários específicos de espectro;
- Encerramento de operação após detecção da existência de outros usuários;
- Agendamento para testes de canais;
- Requisição e informes de medições;
- Seleção e anúncio de um novo canal.

2.3.1.3.

Serviço de entrega de dados para rede móvel

O serviço de entrega de dados é associado com certos conjuntos pré-definidos de parâmetros de fluxo de serviço relacionados à QoS. Observe que a definição de Serviço de Entrega de Dados não inclui a atribuição de valores específicos aos parâmetros.

O tipo de Serviço de Entrega de Dados identifica o grupo específico de parâmetros QoS – vide Tabela 3.

Tipo	Nome simbólico do tipo de serviço	Significado
0	UGS	<i>Unsolicited Grant Service</i> Para conexões UL suportadas pelo Serviço de Agendamento UGS
1	RT-VR	<i>Real-Time Variable Rate Service</i> Para conexões UL suportadas pelo Serviço de Agendamento rtPS
2	NRT-VR	<i>Non-Real-Time Variable Rate Service</i> Para conexões UL suportadas pelo Serviço de Agendamento nrtPS
3	BE	<i>Best Effort Service</i> Para conexões UL suportadas pelo Serviço de Agendamento BE
4	ERT-VR	<i>Extended Real-Time Variable Rate Service</i> Para conexões UL suportadas pelo Serviço de Agendamento ertPS

Tabela 3 – Tipos de serviços de entrega de dados

- **Serviço de Concessão Não-Solicitada (*Unsolicited Grant Service* – UGS):** Este tipo de serviço atende aplicações em tempo real que

geram dados com taxa fixa. Esses dados podem ser fornecidos tanto como PDUs de comprimento variável ou fixo.

- **Serviço de Taxa Variável em Tempo Real (*Real-Time Variable Rate* – RT-VT):** Este serviço atende aplicações de dados em tempo real com taxas de bit variáveis que exigem garantias de taxa de dados e de atrasos.
- **Serviço de Taxa Variável em tempo não real (*Non-Real-Time Variable Rate* – NRT-VR):** Este perfil QoS deverá atender as aplicações que exigem uma taxa de dados garantida mas que são insensíveis aos atrasos. É desejável em certos casos limitar a taxa de dados destes serviços a uma determinada taxa máxima.
- **Serviço de Melhor Esforço (*Best Effort* – BE):** Este serviço serve para aplicações sem requisitos de taxa ou atraso.
- **Serviço de Taxa Variável em Tempo Real Estendido (*Extended Real-Time Variable Rate* – ERT-VR):** Este serviço serve para dar suporte a aplicações em tempo real com taxas de dados variáveis, que exigem dados garantidos e atraso, por exemplo, VoIP com supressão de silêncio.

2.3.2.

A Camada Física (PHY)

DESIGNAÇÃO	APLICAÇÃO	OPÇÕES	DUPLEXAÇÃO
WirelessMAN-SC	10-66 GHz	–	TDD FDD
WirelessMAN-SCa	Bandas Licenciadas abaixo de 11 GHz	AAS / ARQ / STC	TDD FDD
WirelessMAN- OFDM	Bandas Licenciadas abaixo de 11 GHz	AAS / ARQ / Mesh /STC	TDD FDD
WirelessMAN- OFDMA	Bandas Licenciadas abaixo de 11 GHz	AAS / ARQ / STC	TDD FDD
WirelessHUMAN	Bandas Não-Licenciadas abaixo de 11 GHz	AAS / ARQ Mesh / STC	TDD

Tabela 4 – Nomenclatura das interfaces aéreas [Tabela 1 do IEEE Std 802.16-2004]

A WirelessMAN-OFDMA PHY (Sari e Karam [12]), baseada na modulação OFDM, é projetada para operação NLOS nas faixas de frequência abaixo de 11 GHz como visto na Tabela 4. Para faixas licenciadas, as larguras de banda permitidas deverão ser limitadas ao que é alocado pela entidade reguladora dividida por qualquer potência de dois e não menos que 1,0 MHz.

O modo PHY OFDMA é baseado em pelo menos um dos tamanhos de FFT 2048 (compatível com a versão anterior, IEEE Std 802.16-2004), 1024, 512 e 128 deverão ser suportados, o que facilita o suporte de várias larguras de banda dos canais.

A estação de usuário pode implementar um mecanismo de busca e de escaneamento para detectar o sinal do enlace de descida ao executar a entrada inicial na rede e isso pode incluir uma detecção dinâmica do tamanho da FFT e a largura de banda do canal empregada pelo ERB.

A Transformada de Fourier-Inversa cria uma forma de onda OFDMA, cuja duração de tempo refere-se ao tempo útil do símbolo T_b . Uma cópia do último T_g do período útil do símbolo, denominada CP, é utilizada para combater multipercursos, enquanto mantém-se a ortogonalidade dos tons. A Figura 23 ilustra essa estrutura.

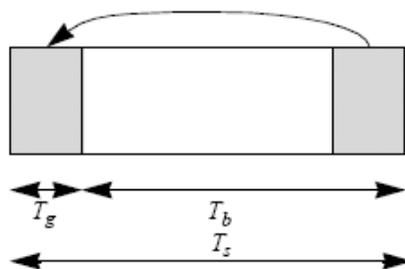


Figura 23 – Estrutura temporal do símbolo OFDMA

A energia do transmissor aumenta com o comprimento do tempo de guarda enquanto que a energia do receptor permanece a mesma (a extensão cíclica é descartada), dessa forma há uma perda em dB em E_b/N_0 . Utilizando uma extensão cíclica, as amostras requeridas para o cálculo da FFT no receptor podem ser tomadas em qualquer lugar ao longo do comprimento do símbolo estendido. Isso fornece imunidade a multipercursos assim como uma tolerância para erros de sincronização de tempo de símbolo.

Na inicialização, uma estação de usuário deve buscar todos os valores possíveis da CP até que encontre a CP sendo utilizada pela ERB. A estação de usuário deverá utilizar a mesma CP no enlace de subida. Uma vez que uma duração CP específica tenha sido selecionada pela ERB para operação no enlace de descida, ela não deve ser trocada. Mudando-se a CP forçaria todas as extensões a re-sincronizarem com a ERB.

A descrição do domínio de frequência inclui a estrutura básica do um símbolo OFDMA. Um símbolo OFDMA é constituído de subportadoras, cujo número determina o tamanho da FFT utilizado. Existem vários tipos de subportadoras:

- Subportadoras de dados: para transmissão de dados;
- Subportadoras piloto: para vários propósitos de estimativas;
- Subportadoras nulas: nenhum tipo de transmissão, para bandas de guarda e portadora DC.

O propósito das bandas de guarda é possibilitar que o sinal caia naturalmente e crie um formato *brick wall* para a FFT. No modo OFDMA, as subportadoras ativas são divididas em subgrupos de subportadoras, cada subgrupo é denominado um subcanal. No enlace de descida, um subcanal pode ser designado para diferentes (grupos de) receptores; no enlace de subida, um transmissor pode ser indicado para um ou mais subcanais, vários transmissores podem vir a transmitir simultaneamente. As subportadoras que formam um subcanal podem, mas não precisam ser adjacentes. O conceito é demonstrado na Figura 24. O símbolo é dividido em subcanais lógicos para suportar o escalabilidade, acesso múltiplo, e capacidades avançadas de processamento de conjuntos antenas.

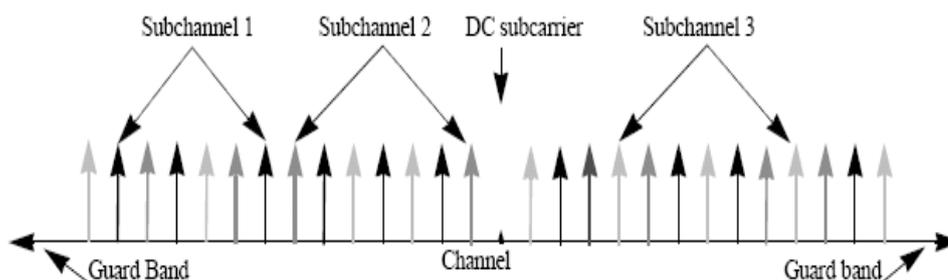


Figura 24 – Descrição de frequências OFDMA (exemplo com 3 canais)