

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM TELEINFORMÁTICA E REDES DE
COMPUTADORES**

EMMANUEL GONÇALVES CHAPAVAL DOS SANTOS

COMPARAÇÃO ENTRE WIMAX E LTE

MONOGRAFIA

CURITIBA

2011

EMMANUEL GONÇALVES CHAPAVAL DOS SANTOS

COMPARAÇÃO ENTRE WIMAX E LTE

Monografia apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Especialista em Teleinformática e Redes de Computadores, do (nome do departamento), da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Pereira

CURITIBA

2011

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos os que me ajudaram na elaboração deste trabalho: Especialmente a minha família pelo apoio, e por me fazer entender que o futuro é feito a partir da constante dedicação no presente. Aos mestres da UTFPR pelos ensinamentos que possibilitaram a realização deste. Aos amigos e amigas, nossa segunda família, por entender a ausência em momentos dedicados ao estudo.

RESUMO

Santos, Emmanuel Gonçalves Chapaval. **Comparação entre WiMAX e LTE**. 2011. 41 p. Programa de Pós-Graduação em Teleinformática e Redes de Computadores, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2011.

O objetivo deste trabalho consiste em explicar os conceitos básicos dos sistemas de comunicação móvel WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) e LTE (Long Term Evolution) e ao mesmo tempo fazer uma comparação entre as tecnologias.

São descritas algumas técnicas que possibilitam a existência destas tecnologias como MIMO (Multiple Inputs Multiple Outputs) e OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplex). Outras características como a arquitetura de rede e aspectos da interface de rádio também são descritas.

Palavras-chave: WiMAX. LTE. MIMO. OFDM.

ABSTRACT

Santos, Emmanuel Gonçalves Chapaval. **WiMAX and LTE Comparison**. 2011. 151 f. Post Graduate Program in Teleinformatics and Computer Networks, Federal Technology University - Paraná. Curitiba, 2011.

The objective of this work is to explain the basic concepts behind the mobile communication systems WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) and LTE (Long Term Evolution) and at the same time make a comparison between these technologies.

Some techniques like MIMO (Multiple Inputs Multiple Outputs) and OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplex) that enable the existence of these technologies will be described. Other characteristics like network architecture and aspects of the radio interface will also be described.

Keywords: WiMAX. LTE. MIMO. OFDM.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Banda de Guarda.....	16
Figura 2 – Transmissor FDM.....	17
Figura 3 – Subportadoras de um sinal OFDM.....	18
Figura 4 - Economia de banda de um sistema OFDM para um sistema FDM	18
Figura 5 – Recepção de um sinal OFDM	19
Figura 6 – Geração de um sinal digital OFDM	20
Figura 7 - Recepção de um sinal digital OFDM.....	21
Figura 8 - Intervalo de guarda sem extensão cíclica	22
Figura 9 - Erro devido a um deslocamento em frequência	24
Figura 10 - Estrutura MIMO.....	25
Figura 11 - Arquitetura do LTE-SAE [8].....	28
Figura 12 - Estrutura WiMAX.....	30
Figura 13 - Representação do Sinal OFDM na frequência de no tempo [6].....	33
Figura 14 - Alocação de subportadoras para OFDM e OFDMA [6]	33
Figura 15 - Comparação entre OFDMA e SC-FDMA transmitindo uma série de símbolos QPSK	34
Figura 16 - Técnicas de antena [6].....	35
Figura 17 - SU-MIMO LTE [6].....	36
Figura 18 - MU-MIMO LTE	37
Figura 19 - Sistemas multi-antenas WiMAX [7]	37
Figura 20 - Multiplexação Espacial Colaborativa.....	39
Figura 21 - Beamforming Espacial no WiMAX [7]	39

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS

Elemento opcional que consiste na relação, em ordem alfabética, das abreviaturas (parte da palavra representando o todo), siglas (forma de abreviatura formada pelas letras iniciais de palavras de expressões) e acrônimos (palavras formadas por letras ou sílabas iniciais de outras expressões, formando uma palavra pronunciável). Siglas e acrônimos são utilizados no texto, seguidos das palavras ou expressões correspondentes por extenso. Quando ocorrem acima de cinco abreviaturas, siglas ou acrônimos, as mesmas devem vir em listas próprias e separadas.

LISTA DE ABREVIATURAS

a.C.	Antes de Cristo
abrev.	Abreviatura
Cód. Civ.	Código Civil
CO	Conhecimento Organizacional

LISTA DE SIGLAS

ABIPTI	Associação Brasileira das Instituições de Pesquisa Tecnológica
ANPEI	Associação Nacional de Pesquisa, Desenvolvimento e Engenharia das Empresas Inovadoras
BSC	Balanced Scorecard
CH	Capital Humano

LISTA DE ACRÔNIMOS

CAE	Computer Aided Engineering
FORTTRAN	Formula Translation
NASA	National Aeronautics and Space Administration
OTAN	Organização do Tratado do Atlântico Norte
IPPUC	Instituto de Pesquisa e Planejamento Urbano de Curitiba

LISTA DE SÍMBOLOS

Elemento opcional, que deve ser elaborado de acordo com a ordem apresentada no texto com o devido significado.

$\tilde{\alpha}$	Coeficiente de atenuação da função da onda do elétron no óxido
$\tilde{\epsilon}$	Parâmetro de ajuste para modulação do comprimento do canal
\acute{o}	Efeito DIBL
$\grave{\epsilon}$	Parâmetro de entrada para ajuste de mobilidade
\acute{Y}_{Si}	Permissividade elétrica do silício
$\grave{\mu}_0$	Mobilidade dos portadores para o campo elétrico longitudinal transversal desprezíveis
$\grave{\mu}_{ef}$	Mobilidade efetiva com o campo elétrico transversal
ϕ_s	Potencial de superfície
ϕ_{s0}	Potencial de superfície no equilíbrio

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
2 OFDM – MIMO	15
2.1 OFDM	15
2.1.1 Ortogonalidade	17
2.1.2 Transmissão e Recepção dos Sinais OFDM	18
2.1.3 Processamento Digital do Sinal OFDM.....	20
2.1.4 Intervalo de Guarda	21
2.1.5 Limitações da Técnica OFDM.....	22
2.2 MIMO	24
2.2.1 Capacidade de um Canal MIMO.....	26
3 ARQUITETURA DE REDE	28
3.1 LTE	28
3.2 WiMAX.....	29
4 ASPECTOS DA INTERFACE DE RÁDIO	31
4.1 BANDA DE FREQUÊNCIA	31
4.2 MODO DE ACESSO DE RÁDIO.....	31
4.3 TAXA DE DADOS.....	32
4.4 TECNOLOGIAS DE MÚLTIPLO ACESSO	32
4.4.1 OFDMA	32
4.4.2 SC-FDMA	34
4.5 TÉCNICAS DE MÚLTIPLAS ANTENAS	35
4.5.1 LTE	35
4.5.2 WiMAX.....	37
5 ANÁLISE DE MERCADO E DESAFIOS	40
5.1 ANÁLISE PARA O BRASIL.....	41
5.1.1 WiMAX.....	41
5.1.2 LTE	43
CONCLUSÃO	44
REFERÊNCIAS	45

1 INTRODUÇÃO

As tecnologias WiMAX e LTE aparecem como fortes candidatas para se tornarem a próxima geração de tecnologia móvel. Conhecidas como tecnologias 4G, WiMAX e LTE se assemelham em alguns aspectos incluindo operar em bandas de frequência licenciadas, alta capacidade, ampla cobertura e fortes mecanismos de QoS. No entanto, por terem diferentes origens, estas tecnologias se diferem em diversos outros aspectos.

O WiMAX (padrão IEEE 802.16) vem da família de protocolos IEEE e pode ser entendido como uma extensão do acesso sem fio de uma área de rede local (padrão 802.11) para a área de uma cidade (MAN – Metropolitan Area Network) e para WAN (Wide Area Network). O WiMAX utiliza uma tecnologia para a camada física de acesso chamada de OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) para uplink e downlink. Enquanto que as versões iniciais da 802.16 como a 802.16-2004 focaram mais no acesso fixo, versões mais recentes como a 802.16-2005 focaram em novas funcionalidades necessárias para um maior QoS e mobilidade em altas velocidades. A versão 802.16-2004 ou 802.16d é conhecida como WiMAX fixa, e a versão 802.16-2005 ou 802.16e é conhecida como WiMAX móvel. O WiMAX móvel utiliza-se de um backbone IP com taxa máxima de dados de até 75 Mbps dependendo da configuração de antena e modulação. As primeiras versões do WiMAX foram aprovadas com TDMA TDD e FDD para propagação LOS (Line of Sight) na faixa de frequência entre 10 e 66 GHz que depois foi expandido para incluir a operação na faixa de 2 a 11 GHz com propagação nLOS (non Line of Sight) utilizando OFDMA para alocação dinâmica dos recursos no tempo e na frequência para múltiplos usuários. A força-tarefa do 802.16m (WiMAX 2) está trabalhando com a meta de otimizar a comunicação e coexistência com outras tecnologias de acesso como 3G, Wifi e Bluetooth, além de melhorar as taxas de transmissão para o padrão definido para as tecnologias 4G como 100 Mbps para alta mobilidade e 1Gbps para acesso sem fio fixo.

A LTE por outro lado, evoluiu das tecnologias de terceira geração que são baseadas no WCDMA e definem a evolução de longo termo da tecnologia celular 3GPP UMTS/HSPA. As especificações desses esforços são conhecidas como E-

UTRA (Evolved UMTS Terrestrial Radio Access) e E-UTRAN (Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network), comumente referenciadas pelo projeto LTE 3GPP. A primeira versão do LTE está documentada na versão 8 das especificações 3GPP. É definida uma nova camada física de acesso de rádio baseada em OFDMA para downlink e SC-FDMA (Single Carrier Frequency Division Multiple Access) para uplink. O LTE funciona com taxas de 100 até 326.4 no downlink e de 50 até 86.4 no uplink dependendo da configuração de antena e modulação. [3]

2 OFDM – MIMO

Duas técnicas essenciais para a existência ou para que seja possível a idealização de tecnologias de quarta geração, são a OFDM (Multiplexação por Divisão de Freqüências Ortogonais) que é uma técnica de transmissão multi-portadora que divide o espectro em várias sub-bandas e a técnica MIMO, que é a transmissão e recepção de sinais por múltiplas antenas.

2.1 OFDM

A OFDM (Multiplexação por Divisão de Freqüências Ortogonais) é uma técnica de transmissão multi-portadora que divide o espectro em várias sub-bandas. Neste tipo de modulação pode-se transmitir em altas taxas de bits para receptores móveis, portáteis e fixos, especialmente em ambientes multi-percurso.

Criada em 1966, em um trabalho desenvolvido por Robert Chang e Richard Gibby [1], foi sugerido um sistema com múltiplas portadoras ortogonais entre si, em que garantindo a condição de ortogonalidade, as portadoras poderiam sobrepor umas as outras sem interferência entre elas, aumentando significativamente a eficiência espectral. Foi proposto o uso o uso da Transformada Discreta de Fourier (DFT – Discrete Fourier Transform) e a Transformada Discreta Inversa de Fourier (IDFT – Inverse Discrete Fourier Transform) para gerar e receber o símbolo OFDM.

Com a atual capacidade dos sistemas computacionais, os sistemas OFDM passaram a ser implementados por meio de técnicas de processamento digital de

sinais sendo que a DFT foi substituída pela FFT (Fast Fourier Transform) e a IDFT foi substituída pela IFFT (Inverse Fast Fourier Transform).

Embora a técnica leve o termo multiplexação em seu nome, a rigor não ocorre multiplexação num sistema OFDM, mas sim a transmissão paralela de uma seqüência de bits originalmente única.

A OFDM utiliza do mesmo princípio da técnica conhecida como FDM (Multiplexação por Divisão em Freqüências) onde múltiplos sinais são transmitidos simultaneamente utilizando diferentes portadoras. Na figura abaixo se pode observar a largura total dividida em n sub-bandas e que entre cada banda existe um espaço chamado de banda de guarda. A função da banda de guarda é impedir que duas sub-bandas adjacentes interfiram uma na outra.

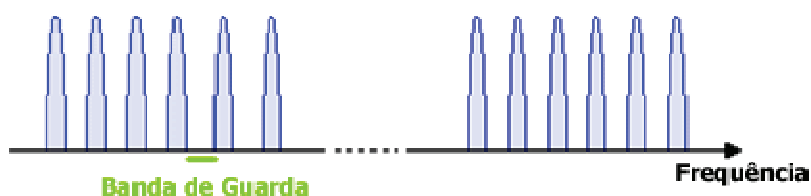


Figura 1 – Banda de Guarda

Na figura 2 temos um exemplo de transmissor FDM. Os sinais $m_i(t)$ são modulados nas n subportadoras que resultam no sinal resultante $s_i(t)$. Os sinais $s_i(t)$ são somados resultando em um sinal que será transmitido após modulado na freqüência do canal transmissor.

Os sinais transmitidos não vão interferir uns nos outros devido à existência da banda de guarda, mas isso resulta em uma perda com relação à eficiência espectral, uma vez que a banda de guarda não carrega nenhuma informação e é utilizada apenas para evitar a interferência entre subportadoras adjacentes.

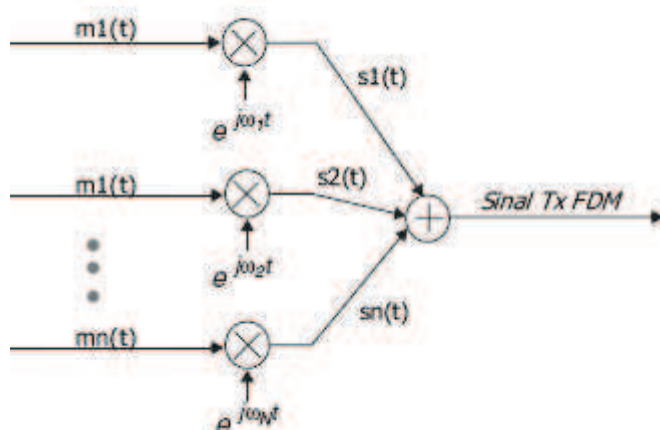


Figura 2 – Transmissor FDM

A técnica OFDM surgiu como uma evolução da técnica FDM onde, no lugar de utilizar-se banda de guarda para a separação das subportadoras, trabalha-se com uma particular sobreposição espectral de subportadoras.

2.1.1 Ortogonalidade

Para que dois sinais sejam ortogonais, eles devem satisfazer a equação abaixo:

$$\int_0^T S_i(t)s_j(t)dt = \begin{cases} R & i = j \\ 0 & i \neq j \end{cases}$$

Ou seja, se o produto entre dois sinais $s(t)$ satisfizer esta equação, então eles serão ortogonais dentro do intervalo de tempo ($0 \leq t < T$). Ao atender o princípio da ortogonalidade, múltiplos sinais podem ser transmitidos simultaneamente, sobrepondo-se uns aos outros, e serem detectados sem que um interfira no outro.

As subportadoras do sinal OFDM, no domínio do tempo, são formadas através de inúmeras sinusoidais ortogonais, conforme é mostrado na figura abaixo.

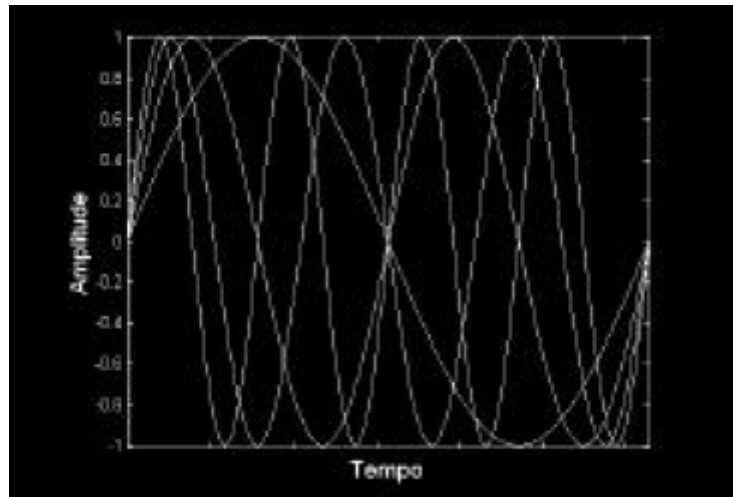


Figura 3 – Subportadoras de um sinal OFDM

Em um sistema OFDM, o aproveitamento espectral pode ser de aproximadamente 50% quando comparado a um sistema FDM.

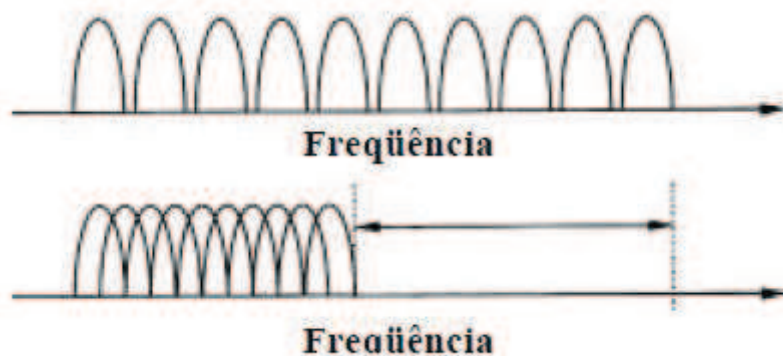


Figura 4 - Economia de banda de um sistema OFDM para um sistema FDM

2.1.2 Transmissão e Recepção dos Sinais OFDM

Os sinais de N subportadoras QAM espaçadas de $\Delta f = (1/T)$ e iniciando em $t = t_s$ são dados por:

$$s_i(t) = \text{Re} \left\{ d_i \cdot \exp \left[j2\pi \cdot \left(\frac{i}{T} \right) \cdot (t - t_s) \right] \right\}, \quad t_s \leq t \leq t_s + T$$

$$s_i(t) = 0, \quad t_s + T > t > t_s$$

$$i = 0, 1, 2, \dots, (N - 1)$$

onde T é a duração do símbolo e d_i é o símbolo complexo QAM transmitido pela subportadora de ordem d_i .

Os símbolos QAM d_i são comumente denominados de subsímbolos de um símbolo OFDM. O sinal OFDM equivalente em banda base é o somatório de N

subportadoras deste tipo. Considerando-se um intervalo de símbolo que se inicie em $t = t_s$, esse sinal pode ser dado por:

$$s_i(t) = \operatorname{Re} \left\{ \sum_{i=0}^{N-1} d_i \cdot \exp \left[j2\pi \cdot \left(\frac{i}{T} \right) \cdot (t - t_s) \right] \right\}, \quad t_s \leq t \leq t_s + T$$

$$s_i(t) = 0, \quad t_s + T < t < t_s$$

A recuperação dos símbolos complexos no receptor é realizada pela passagem do sinal OFDM através de um banco de N correladores, seguidos de comparações com limiares de decisão adequados. O processo de recepção analógica de sinal OFDM é ilustrado abaixo.

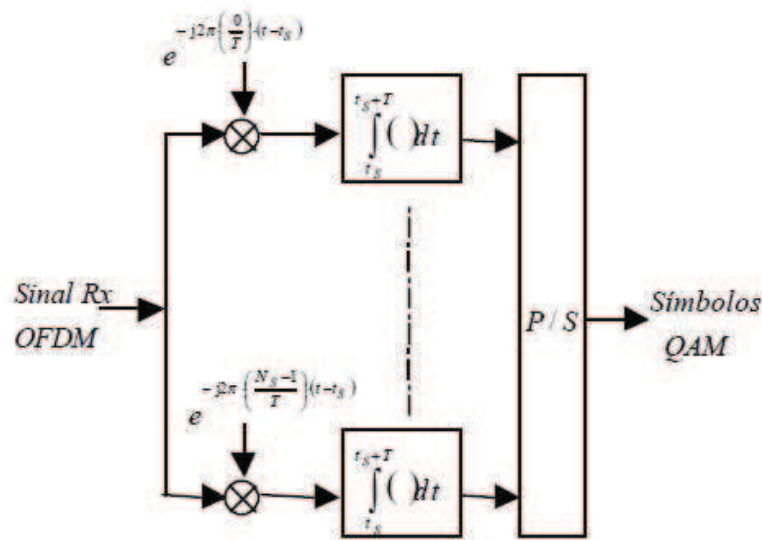


Figura 5 – Recepção de um sinal OFDM

Admitindo-se que a entrada do receptor é o sinal OFDM da equação (x), sem ruído, a saída do j -ésimo correlador será dada por:

$$r_j = \int_{t_s}^{t_s+T} \exp \left[-j2\pi \cdot \left(\frac{j}{T} \right) \cdot (t - t_s) \right] \cdot s_i(t) dt$$

$$r_j = \sum_{i=0}^{N-1} d_i \int_{t_s}^{t_s+T} \exp \left[-j2\pi \cdot \left(\frac{j}{T} \right) \cdot (t - t_s) \right] dt = d_j \cdot T$$

Pela observação da equação x pode-se notar que o sinal complexo OFDM em banda base equivale a uma IDFT da seqüência discreta formada pelos N subsímbolos QAM que compõe cada símbolo OFDM. Utilizando-se deste fato,

elimina-se a complexidade associada ao uso de um banco de osciladores para a geração e recuperação do sinal OFDM.

2.1.3 Processamento Digital do Sinal OFDM

O processo de geração de um sinal OFDM inicia-se com uma conversão série-para-paralelo (S/P) na qual conjuntos de N palavras de k bits são armazenadas num buffer e mapeadas em N subsímbolos complexos d_i , os quais determinam os pontos de constelação de cada subportadora de acordo com o tipo de modulação empregada. Em seguida, é aplicada uma IFFT a este bloco de subsímbolos complexos, fornecendo como resultado N amostras $s(i)$ correspondentes a um símbolo OFDM. Por último é realizado o procedimento de acréscimo de intervalo de guarda ao símbolo, seguido então de uma conversão D/A do sinal resultante.

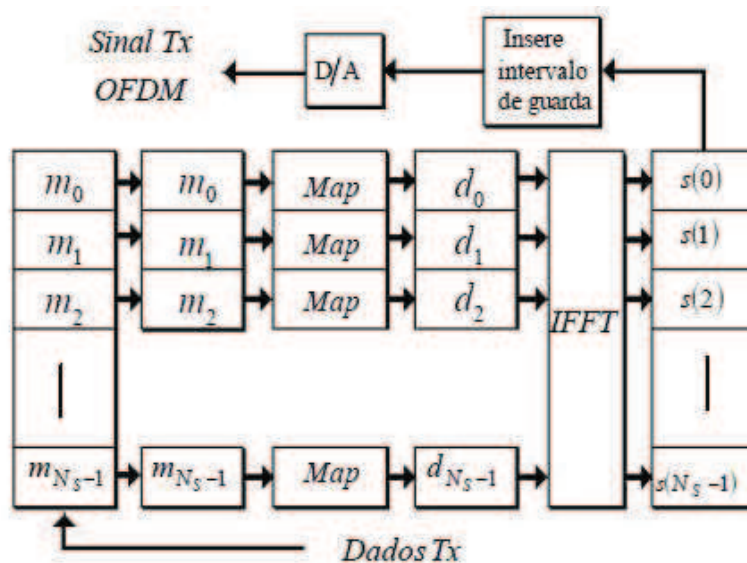


Figura 6 – Geração de um sinal digital OFDM

Caso N não seja potência de 2, é comum acrescentar-se subsímbolos complexos d_i de valor nulo ao bloco de subsímbolos complexos. Isto tem como objetivo tornar possível a utilização do algoritmo IFFT mais comum, que se baseia em seqüência com comprimento potência de dois (algoritmo butterfly) [5]. As subportadoras associadas a estes símbolos são denominadas subportadoras inativas. Com o objetivo de melhor utilizar a faixa de frequência disponível para transmissão, estes subsímbolos nulos ocuparão a parte central na ordenação dos pontos da IFFT.

A recepção do sinal OFDM é realizada como um processo inverso ao da transmissão, conforme é mostrado na figura abaixo:

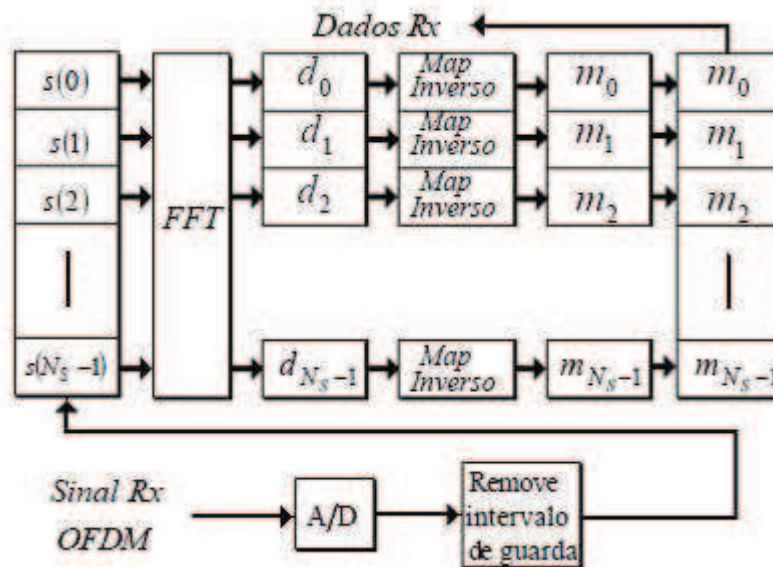


Figura 7 - Recepção de um sinal digital OFDM

2.1.4 Intervalo de Guarda

Uma das mais importantes razões para se utilizar a técnica OFDM é a maneira de como ela lida com o espalhamento de retardo de canal (τ_{rms}). A conversão S/P dos dados de entrada tem como consequência um aumento na duração de cada símbolo transmitido (T) por um fator N , o que faz com que a relação entre τ_{rms} e T seja reduzida pelo mesmo fator.

Para a eliminação da Interferência entre Símbolos (ISI – Intersymbol Interference) introduz-se um intervalo de guarda a cada símbolo OFDM. Projeta-se este intervalo de forma que as componentes multi-percurso de um símbolo OFDM não possam interferir na recepção do símbolo OFDM subsequente. Um símbolo OFDM (de duração T_s) será constituído então pelo símbolo útil OFDM (de duração T) e pelo intervalo de guarda (de duração T_g).

Um intervalo de guarda poderia ter sido criado apenas pela ausência de sinal. Neste caso, porém, as subportadoras deixariam de ser ortogonais, dando origem ao problema de Interferência entre Subportadoras (ICI – Interchannel Interference). Este efeito é ilustrado na fig. 8, através de um exemplo relativo à recepção de duas subportadoras.

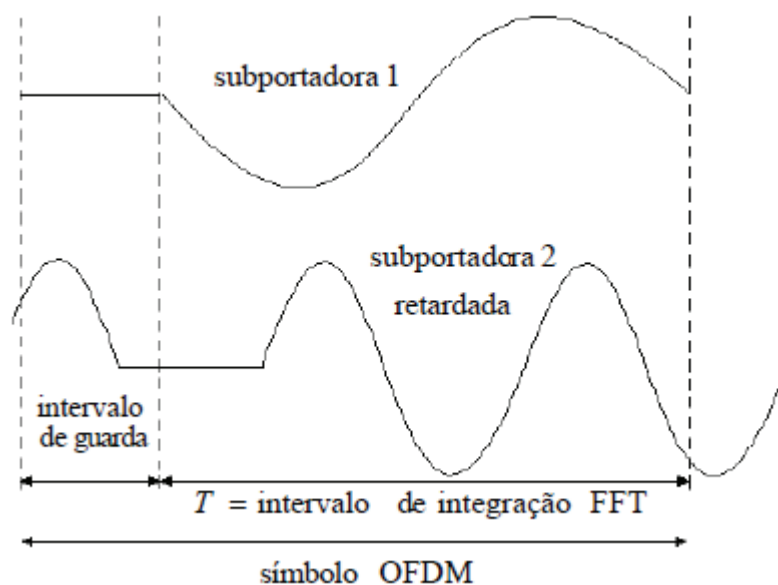


Figura 8 - Intervalo de guarda sem extensão cíclica

Baseado na figura acima (fig. 8), quando o demodulador tentar demodular a primeira subportadora, irá encontrar alguma interferência da segunda. Isto ocorre pelo fato da diferença entre o número de ciclos das duas subportadoras dentro do intervalo de cálculo da FFT (T) não ser um número inteiro. De forma similar, ocorrerá também alguma interferência da primeira subportadora na segunda.

Para que a ICI seja eliminada, o símbolo OFDM é estendido ciclicamente no intervalo de guarda. Isto equivale a acrescentar ao início de cada símbolo uma certa quantidade de amostras da parte final do mesmo.

Desde que seus respectivos valores de retardo sejam menor que o intervalo de guarda, pode-se garantir que réplicas retardadas do símbolo OFDM terão sempre um valor inteiro de ciclos dentro do intervalo de célula da FFT. Como resultado, os sinais multi-percurso com retardo menor do que o intervalo de guarda não causarão ICI.

2.1.5 Limitações da Técnica OFDM

As principais vantagens da técnica OFDM são a robustez aos efeitos da dispersão do sinal no tempo devido à multi-percurso e o melhor aproveitamento da banda de transmissão.

Entretanto, a técnica OFDM também apresenta desvantagens e as mais expressivas são a sua vulnerabilidade a erros de sincronismo, efeito Doppler e as distorções não lineares.

Com relação aos erros de sincronismo, podemos citar os deslocamentos de tempo de símbolo e da frequência da portadora. O deslocamento de tempo de símbolo ocorre devido a uma incerteza na definição dos limites do símbolo OFDM e o deslocamento de frequência da portadora ocorre devido à diferença de frequência do oscilador entre o transmissor e o receptor.

Conforme foi explicado anteriormente, a OFDM é mais robusta a deslocamentos no tempo quando o deslocamento de tempo de símbolo é menor do que o intervalo do tempo de guarda, sem causar ICI ou ISI.

Para um sistema OFDM com N subportadoras e com um espaçamento de frequência entre as subportadoras Δf , o tempo de atraso de um intervalo de amostra causa um significativo deslocamento de fase $\Delta\phi$ entre a primeira e a última subportadora. Este deslocamento de fase é adicionado às demais já existentes no sistema, como por exemplo, o deslocamento em fase devido à dispersão linear do canal no tempo. O deslocamento em frequência impõe um deslocamento no espectro do sinal OFDM recebido. Se o deslocamento em frequência for um número inteiro múltiplo do espaçamento entre as subportadoras Δf , então o sistema mantém a ortogonalidade, mas o n -ésimo símbolo não corresponderá ao n -ésimo símbolo transmitido, o que leva a uma alta taxa de erro de bit (BER).

No caso desse deslocamento não ser um múltiplo inteiro de Δf , então ocorre uma redução da potência do símbolo esperado, além da interferência em outras subportadoras. Conseqüentemente, esse deslocamento em frequência acaba com a ortogonalidade entre as subportadoras, não havendo mais um número inteiro de ciclos para realizar a FFT, e levando a uma degradação da BER. A figura 9 mostra o efeito do erro devido ao deslocamento em frequência Δf .

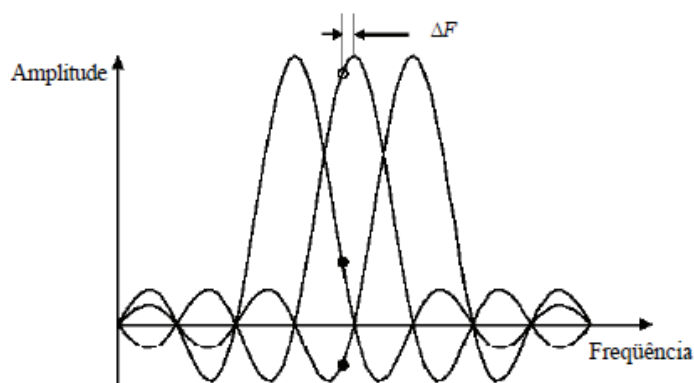


Figura 9 - Erro devido a um deslocamento em frequência

2.2 MIMO

Na década de 80, em um trabalho escrito por J.Winters [4], um sistema com múltiplas antenas foi apresentado e foi mostrado que, com processamento de sinal apropriado no transmissor e no receptor, era possível aumentar a taxa de transmissão quase que proporcional ao numero de antenas.

Em geral um sistema MIMO consiste de n antenas transmissoras e m antenas receptoras, também conhecido como um sistema MIMO(n,m). Todas as antenas Tx podem mandar seus sinais simultaneamente na mesma largura de banda de um canal de rádio. Cada antena receptora recebe a superposição de todos os sinais transmitidos adicionados de ruído no canal de rádio.

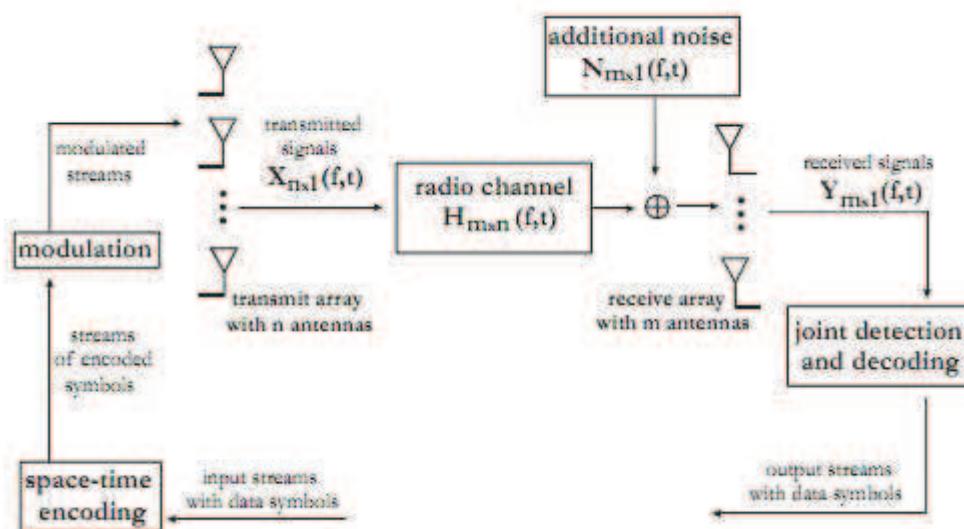


Figura 10 - Sistema MIMO

Antes de entrarmos em mais detalhes sobre os conceitos de sistemas MIMO, algumas condições devem ser estabelecidas:

- A mobilidade das antenas transmissoras e receptoras é limitada, ou seja, assumiremos o canal de rádio como estacionário ou semi-estacionário.

- O tempo de símbolo é considerado muito maior que o espalhamento de atraso do canal, portanto, não existe interferência inter-simbólica entre os símbolos transmitidos em sucessivos intervalos de sinalização.

- Existem vários obstáculos e caminhos de transmissão entre as antenas receptoras e transmissoras.

- As características do canal não são conhecidas para o transmissor, mas o receptor mantém o canal rastreado.

O canal de rádio entre as antenas transmissoras e receptoras pode ser representado como um canal $m \times n$ com matriz de transferência $H(f, t)$, dependente da frequência f e do tempo t . O sistema de transmissão pode ser representado pela seguinte equação:

$$\begin{bmatrix} y_1(f, t) \\ y_2(f, t) \\ \vdots \\ y_m(f, t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11}(f, t) & h_{12}(f, t) & \dots & h_{1n}(f, t) \\ h_{21}(f, t) & h_{22}(f, t) & \dots & h_{2n}(f, t) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{m1}(f, t) & h_{m2}(f, t) & \dots & h_{mn}(f, t) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1(f, t) \\ x_2(f, t) \\ \vdots \\ x_n(f, t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1(f, t) \\ n_2(f, t) \\ \vdots \\ n_m(f, t) \end{bmatrix}$$

A equação acima também pode ser re-escrita como:

$$\mathbf{Y}(f,t) = \mathbf{H}(f,t) \cdot \mathbf{X}(f,t) + \mathbf{N}(f,t)$$

Onde $\mathbf{X}(f,t)$ e $\mathbf{Y}(f,t)$ são os vetores dos sinais transmitidos e recebidos e $\mathbf{N}(f,t)$ representa o ruído no canal.

Se o ruído fosse ignorado, o sistema de transmissão consistiria como m equações com n variáveis. Então, se somente $n \leq m$ então o receptor conheceria a matriz \mathbf{H} e esses n sinais transmitidos poderiam ser detectados no receptor. A precisão da detecção destes valores é limitada pelo ruído, mas mesmo assim é possível detectar os valores.

As condições mencionadas acima limitam a aplicação de sistemas MIMO, mas estas limitações foram vencidas com o surgimento de novos conceitos sobre MIMO.

2.2.1 Capacidade de um Canal MIMO

A medida da quantidade de informação que pode ser transmitida e recebida é chamada de capacidade de canal. Para determinar esta medida de capacidade de canal, assumimos que um codificador de canal recebe um símbolo a cada T_S segundos. Com um código fonte ideal, a média de comprimento de código de todos os símbolos da fonte é igual à taxa de entropia da fonte. Se S representa o conjunto de todos os símbolos da fonte e a taxa de entropia da fonte é dada por $H(S)$, o codificador do canal vai receber em média $H(S)/T_S$ bits de informação por segundo. Assumindo que uma palavra código de canal deixa o codificador de canal a cada T_C segundos, para conseguir transmitir toda a informação da fonte deve ter

$$R = H(S) \cdot T_C / T_S$$

bits de informação por símbolo de canal. R é chamado de taxa de informação do codificador de canal. A máxima taxa de informação que pode ser usada causando uma probabilidade de erros desprezível na saída é chamada de capacidade de canal. Transmitindo informação a uma taxa R , o canal é utilizado a cada T_C segundos. A capacidade é então medida em bits por uso de canal. Assumindo que o canal tem largura de banda W , a entrada e saída podem ser representados por amostras tiradas a cada $T_S = 1/2W$ segundos de diferença. Com um canal limitado por banda, a capacidade é medida em bits de informação por

segundo. É comum representar a capacidade de canal dentro de uma unidade de banda de canal, ou seja, também medida em bits/s/Hz.

É desejável um esquema de transmissão que explore ao máximo a capacidade do canal. Representando a entrada e saída de um canal wireless sem memória com variáveis aleatórias X e Y , respectivamente, a capacidade de canal é definida como

$$C = \max_{f(x)} I(X; Y)$$

onde $f(x)$ é a probabilidade de distribuição do vetor X e $I(X; Y)$ representa a informação mútua entre X e Y . A informação mútua é uma medida da quantidade de informação que uma variável aleatória possui sobre outra variável e também pode ser definida como

$$I(X; Y) = H(Y) - H(Y|X),$$

onde $H(Y|X)$ representa a entropia condicional entre variáveis aleatórias X e Y . A entropia de uma variável aleatória pode ser descrita como uma medida da quantidade de informação necessária na média para descrever uma variável aleatória. Baseado na equação acima pode-se dizer que a informação mútua é uma redução na incerteza de uma variável aleatória qualquer em relação a conhecimento da outra variável. Note que a informação mútua entre X e Y depende das propriedades do canal (através da matriz de canal H) e das propriedades de X (através da probabilidade de distribuição de X).

Considere \mathbf{Q} a matriz de covariância do vetor do sinal a transmitir \mathbf{s} , que é dada por $\mathbf{Q} = E[\mathbf{s}\mathbf{s}^H]$, onde $E[\cdot]$ representa a esperança matemática, e o modelo de sinal é dado pela equação:

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{s} + \mathbf{n}$$

Assim um sistema MIMO N_T antenas transmissoras e N_R antenas receptoras apresenta a capacidade dado por [13]:

$$C_{MIMO} = \log_2 \left[\det \left(\mathbf{I}_{N_R} + \frac{P_T}{N N_T} \mathbf{H} \mathbf{Q} \mathbf{H}^H \right) \right]$$

onde \mathbf{I}_{N_R} é a matriz identidade de dimensão $N_R \times N_R$, \mathbf{H} é a matriz do canal de dimensão $N_R \times N_T$ e \mathbf{H}^H é a matriz trans-conjugada da matriz do canal H . Para que a potência transmitida, P_T , seja sempre contante deve verificar-se $tr(\mathbf{Q}) = P_T$

3 ARQUITETURA DE REDE

3.1 LTE

Em paralelo com o acesso de rádio LTE, os núcleos de rede em pacotes também estão evoluindo para a arquitetura SAE – System Architecture Evolution. Essa nova arquitetura é projetada para aperfeiçoar o desempenho de rede, reduzir os custos e facilitar a captura de serviços baseados em IP.

Existe somente dois nós no plano de usuário na arquitetura SAE: a estação rádio base LTE (eNodeB) e o Gateway SAE (SAE GW). As estações rádio base LTE são conectadas ao núcleo da rede usando a interface RAN-núcleo da rede (S1). Essa arquitetura plana reduz o número de nós envolvidos nas conexões.

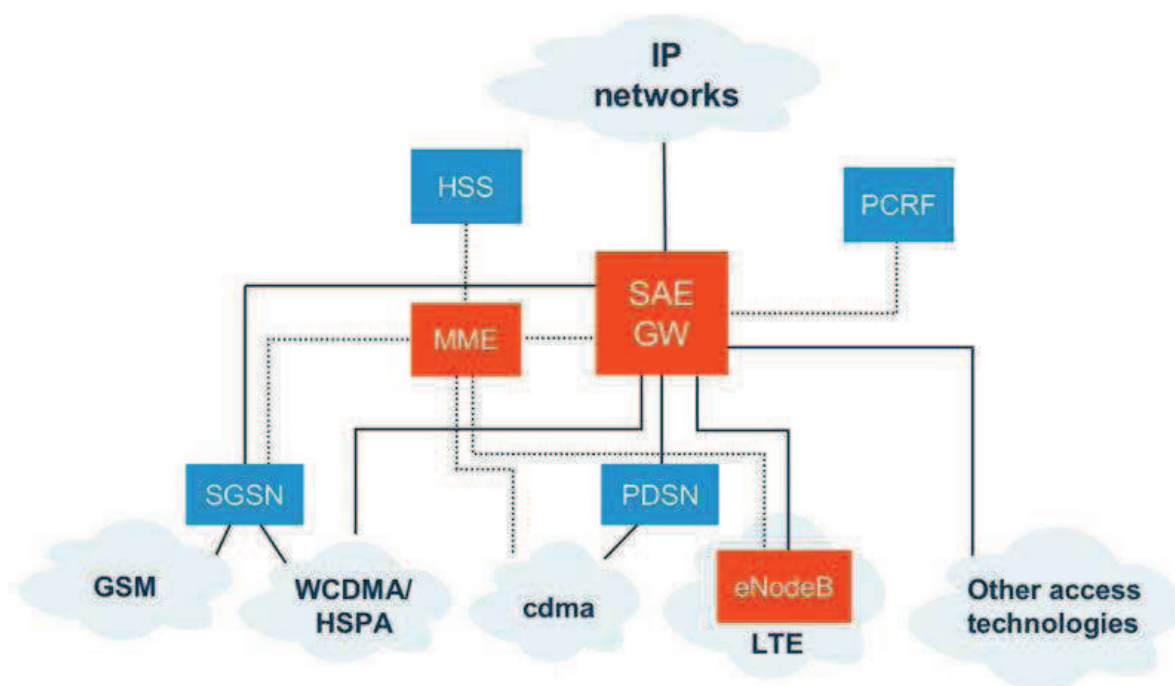


Figura 11 - Arquitetura do LTE-SAE [8]

Os sistemas 3GPP (GSM e WCDMA/HSPA) e 3GPP2 (CDMA2000 1xRTT, EV-DO) existentes são integrados ao sistema evoluído através de interfaces padronizadas fornecendo mobilidade otimizada com o LTE. Para os sistemas 3GPP, isso significa uma interface de sinalização entre o SGSN e o núcleo da rede evoluído e para 3GPP2, uma interface de sinalização entre CDMA RAN e o núcleo da rede

evoluído. Tal integração suportará o *handover* dual e único, permitindo uma migração flexível para o LTE.

A sinalização de controle – por exemplo, para mobilidade – é feita pelo nó da MME – Mobility Management Entity, separada do Gateway. Isso facilita a implantação otimizada da rede e permite a escalabilidade total da capacidade flexível.

O HSS – Home Subscriber Server conecta-se ao núcleo da rede de pacote por meio de uma interface baseada no protocolo Diameter, e não na sinalização SS7, conforme usado nas redes GSM e WCDMA anteriores. A sinalização de rede para controle de política e cobrança já está baseada no Diameter. Assim, todas as interfaces na arquitetura são interfaces IP.

Sistemas GSM e WCDMA/HSPA existentes são integrados ao sistema evoluído através de interfaces padronizadas entre o SGSN e o núcleo da rede evoluído. Espera-se que o esforço para integralizar o acesso CDMA também leve à mobilidade transparente entre o CDMA e o LTE. Tal integração suportará o *handover* dual e único, permitindo a migração flexível do CDMA para o LTE.

O LTE-SAE adotou um conceito de QoS baseado em classe de serviços. Isso fornece uma solução simples, ainda que eficaz, para que as operadoras ofereçam diferenciação entre os serviços.

3.2 WIMAX

A Arquitetura da tecnologia WiMAX é basicamente composta por rádios e antenas. O rádio contém um transmissor e um receptor. Ele gera oscilações elétricas na frequência da portadora. O rádio pode ser pensado como sendo um componente semelhante a um roteador, que é configurado por software. As antenas, assim como as antenas para carros, celulares, rádio ou TV, são construídas com a função de aperfeiçoar o desempenho. O WiMAX tem suporte para as Antenas Inteligentes. Essas antenas são capazes de combinar um arranjo de antenas simples com processamento digital de sinais, transmitindo e recebendo dados de forma adaptativa, isto é, os sinais irão se comportar de acordo com as variações do meio. Esse sistema de antena procura aumentar o ganho do sinal recebido em função da posição espacial do usuário.

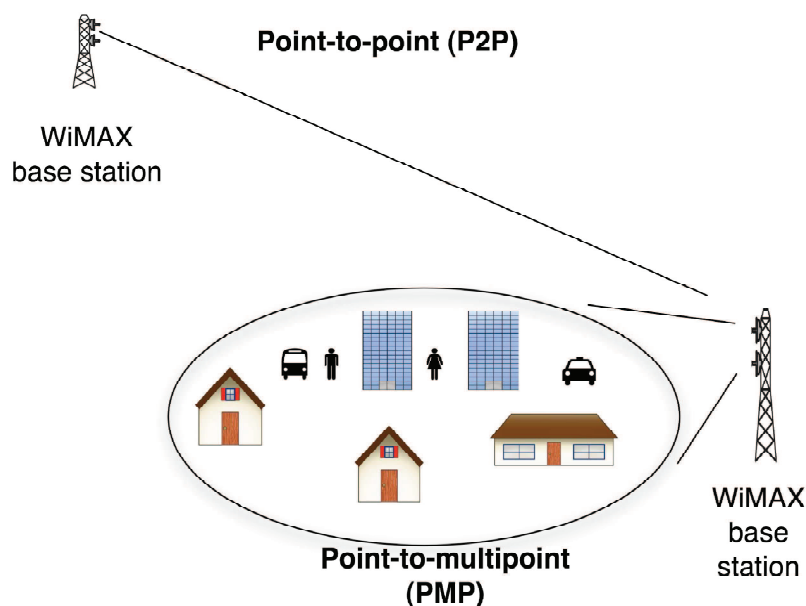


Figura 12 - Estrutura WiMAX

O WiMAX possui características similares à telefonia celular, pois sua cobertura é implementada em formato de células. De modo simplificado, no WiMAX um equipamento em uma torre (BS – Base Station), transmite o sinal aos assinantes (SS - Subscriber station) que, por sua vez, utilizam um equipamento especializado para recepção do sinal, que pode ficar, por exemplo, no telhado de uma residência, ao lado de computadores, ou até mesmo embutido em notebooks ou dispositivos portáteis, utilizando placas de adaptação. A BS realiza a interface entre a rede sem fio e uma rede núcleo (Core Network), suportando interfaces IP, ATM, Ethernet ou E1/T1. A SS permite ao usuário acessar a rede, por intermédio do estabelecimento de enlace com a BS, em uma topologia Ponto-Multiponto, na qual uma estação base pode servir a centenas de assinantes em termos de banda e serviços oferecidos. Outra topologia especificada pelo padrão é a topologia *Mesh*, ou malha, na qual uma SS pode se conectar a uma ou mais SS intermediárias, até atingir a BS.

A multiplexação dos sinais emitidos da estação base para o assinante é realizada por TDM (Time Division Multiplex) e o acesso de assinantes à estação base é por TDMA (Time Division Multiple Access). Enquanto o TDD utiliza somente um canal de radiofrequência, a FDD (Frequency Division Duplexing) utiliza dois canais, sendo este utilizado na multiplexação do sistema WiMAX.

Porém, a grande maioria das soluções WiMAX usam rádios separados das antenas na BS. A grande vantagem é que o equipamento de rádio é protegido contra

o calor e a umidade, o que aumenta a durabilidade e aperfeiçoa o desempenho da conexão wireless. Então, a antena é conectada ao rádio por um cabo chamado de pigtail, que deve ser o mais curto possível para evitar perdas de performance entre a antena e o rádio. Da mesma maneira, muitos SS também são divididos em duas partes: a antena localizada do lado de fora do estabelecimento e uma estação assinante do lado de um computador ou até mesmo embutido em dispositivos portáteis.

4 ASPECTOS DA INTERFACE DE RÁDIO

A interface aérea de rádio corresponde a várias especificações de transmissão e recepção de rádio.

4.1 BANDA DE FREQUÊNCIA

O LTE herda todas as bandas de frequência definidas para UMTS, espectro esse que consiste de 800 MHz, 900 MHz, 1800 MHz, 1900 e 2100 MHz. Dependendo de variáveis locais e regionais, a LTE também pode estar alocada entre 800 MHz e 2.62 GHz.

O WiMAX foi primeiro desenvolvido para ambientes Line-of-Sight (LOS) (IEEE 802.16c) em bandas de alta frequência entre 10-66 GHz. Outras versões (IEEE 802.16a, d, e) operam em ambientes Non-Line-of-Sight (N-LOS) e em bandas de frequência entre 2-11 GHz.

4.2 MODO DE ACESSO DE RÁDIO

Tanto LTE quanto WiMAX operam em TDD e FDD. Em versões mais antigas do WiMAX, antes do 802.16e, somente o modo TDD era suportado. O modo FDD em WiMAX é definido por um FDD half duplex para atender terminais de baixa complexidade que divide os recursos de hardware entre uplink e downlink. Este modo está em consideração para o LTE.

4.3 TAXA DE DADOS

A taxa máxima de dados para LTE pode variar de 100 até 326.4 Mbps no downlink e 50 até 86.4 Mbps no uplink dependendo da configuração de antena e modulação. Os sistemas WiMAX tem taxa máxima de dados de 75 Mbps no downlink e 25 Mbps no uplink.

4.4 TECNOLOGIAS DE MÚLTIPLO ACESSO

As transmissões downlink e uplink no LTE e WiMAX são baseadas em transmissões de múltiplo acesso. A tecnologia conhecida como Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA) é utilizada para transmissões downlink no LTE e transmissões uplink e downlink no WiMAX. As transmissões uplink no LTE utilizam uma tecnologia conhecida como Single Carrier Frequency Division Multiple Access (SC-FDMA). O SC-FDMA é superior a OFDMA, no entanto é restrita somente as transmissões uplink do LTE devido a um maior processamento no domínio do tempo do SC-FDMA o que ocasiona uma sobrecarga nas estações base. A seguir, OFDMA e SC-FDMA serão descritas com mais detalhes.

4.4.1 OFDMA

A OFDMA é derivada da tecnologia OFDM, que conforme explicada anteriormente consiste de um sistema baseado no princípio de que a informação pode ser transmitida em um canal de rádio através de variações na frequência, fase ou amplitude do sinal da portadora. Ao invés de transmitir toda a informação em um simples sinal RF, a alta taxa de dados é multiplexada em uma combinação de sinais paralelos com uma taxa de dados menor. Os sinais paralelos são modulados em subportadoras separadas no domínio da frequência e através do uso da IFFT são transmitidos através do canal. Na recepção, o sinal é demodulado através da FFT para transformar o sinal variável no domínio do tempo de volta as suas componentes espectrais.

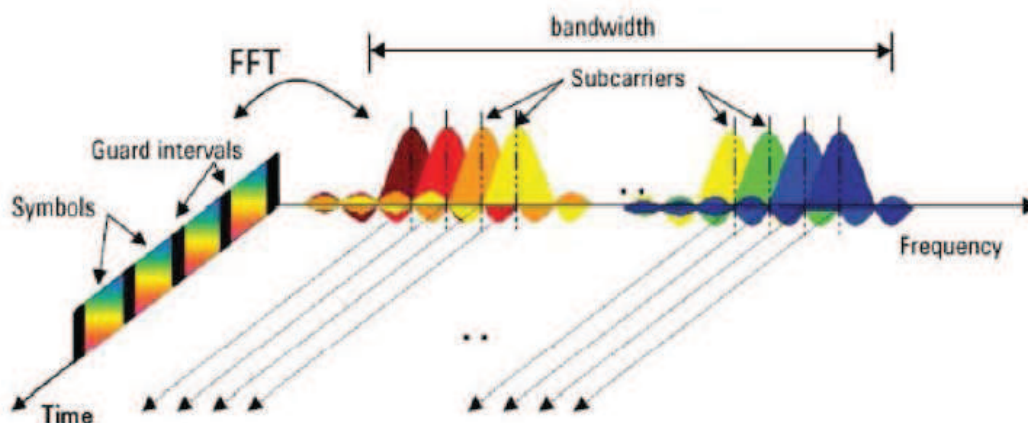


Figura 13 - Representação do Sinal OFDM na frequência e no tempo [6]

Utilizando TDMA juntamente com OFDM, teremos a OFDMA onde é possível uma alocação dinâmica das subportadoras entre diferentes usuários do canal. A técnica OFDMA resulta em um sistema mais robusto com capacidade aumentada e uma maior resistência a desvanecimentos por multipercurso. A figura abaixo mostra a alocação de subportadoras para OFDM e OFDMA.

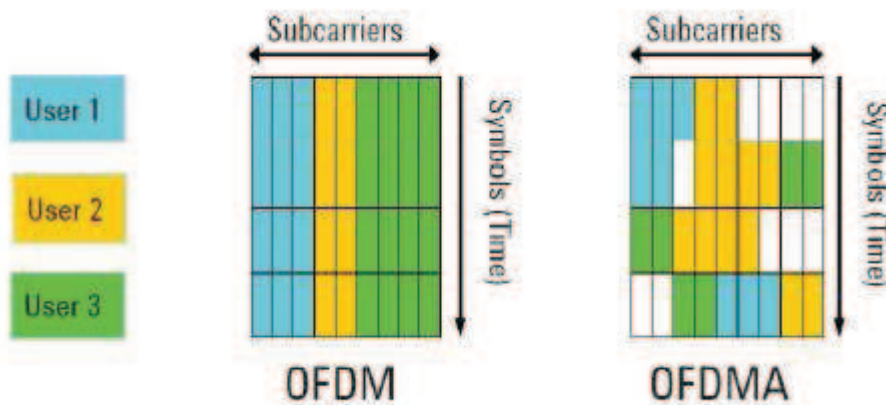


Figura 14 - Alocação de subportadoras para OFDM e OFDMA [6]

Tanto no LTE quanto no WiMAX, cada subportadora é modulada de acordo com a condição do canal. LTE utiliza QPSK, 16QAM ou 64QAM enquanto WiMAX utiliza BPSK, QPSK, 16QAM ou 64QAM para modulação a uma baixa taxa de símbolos. No domínio do tempo, intervalos de guarda são inseridos entre os símbolos para prevenção contra interferência inter-simbólica. O intervalo de guarda comum para LTE é de 4,69 μ s enquanto que para o WiMAX este intervalo é de 1/8

do tamanho do símbolo OFDMA, tipicamente $11.43 \mu\text{s}$ para um símbolo OFDMA de duração de $102.86 \mu\text{s}$.

4.4.2 SC-FDMA

O LTE utiliza uma nova técnica de modulação chamada Single Carrier Frequency Division Multiple Access que funciona criando uma única portadora e deslocando-a para a frequência desejada. Essa nova técnica fornece resistência a multipercursos que ocorre no OFDMA a medida que o número de subportadoras aumenta. A figura abaixo fornece uma comparação no tempo e na frequência entre OFDMA e SC-FDMA transmitindo uma seqüência de quatro (M) símbolos QPSK. Na realidade, sinais LTE são alocados em unidades de 12 subportadoras adjacentes.

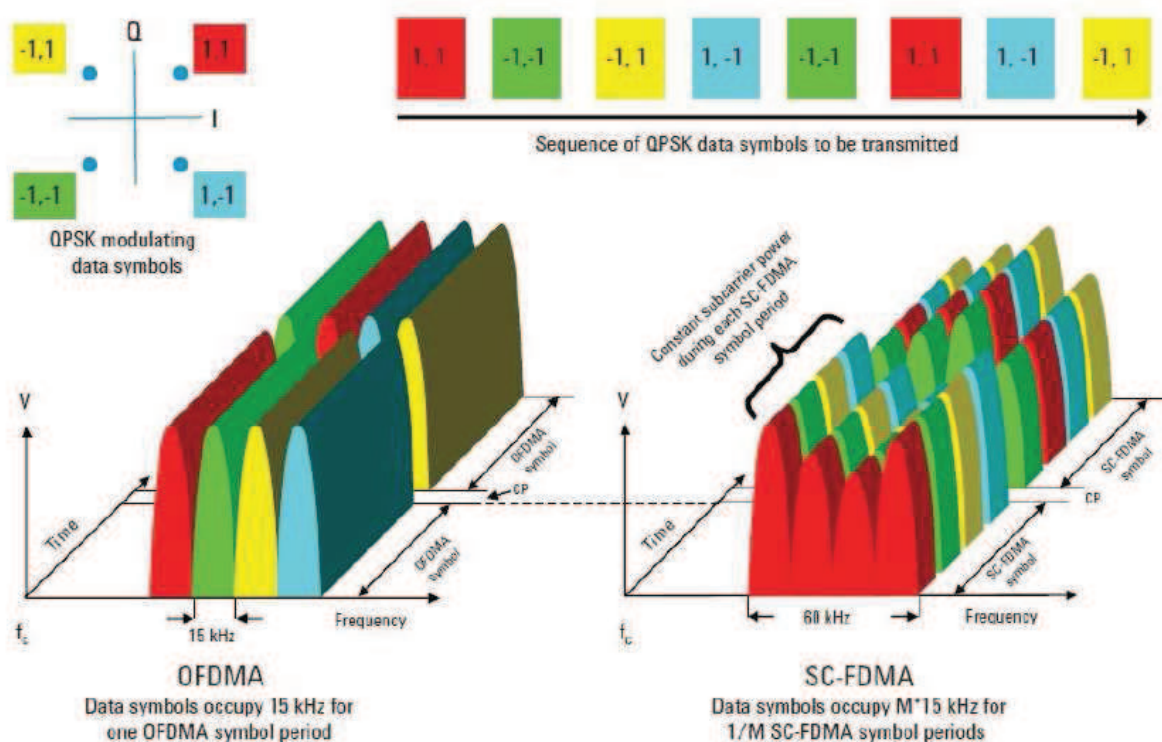


Figura 15 - Comparação entre OFDMA e SC-FDMA transmitindo uma série de símbolos QPSK

O SC-FDMA transmite os símbolos em séries de 4 (M) símbolos vezes a taxa, com cada símbolo ocupando $M \cdot 15 \text{ kHz}$. No OFDMA os símbolos são transmitidos em paralelo, um por subportadora. O símbolo SC-FDMA contém M sub-símbolos que representam os dados modulados.

Transmitindo M símbolos em M vezes a taxa, o SC-FDMA ocupou a mesma banda que o OFDMA, mas com um nível menor de ruído Gaussiano.

4.5 TÉCNICAS DE MÚLTIPLAS ANTENAS

As técnicas de múltiplas antenas possuem um papel muito importante em qualquer transmissão de rádio. Essas técnicas melhoram a robustez do sinal e aumentam a capacidade do sistema aproveitando da diversidade espacial do canal de rádio.

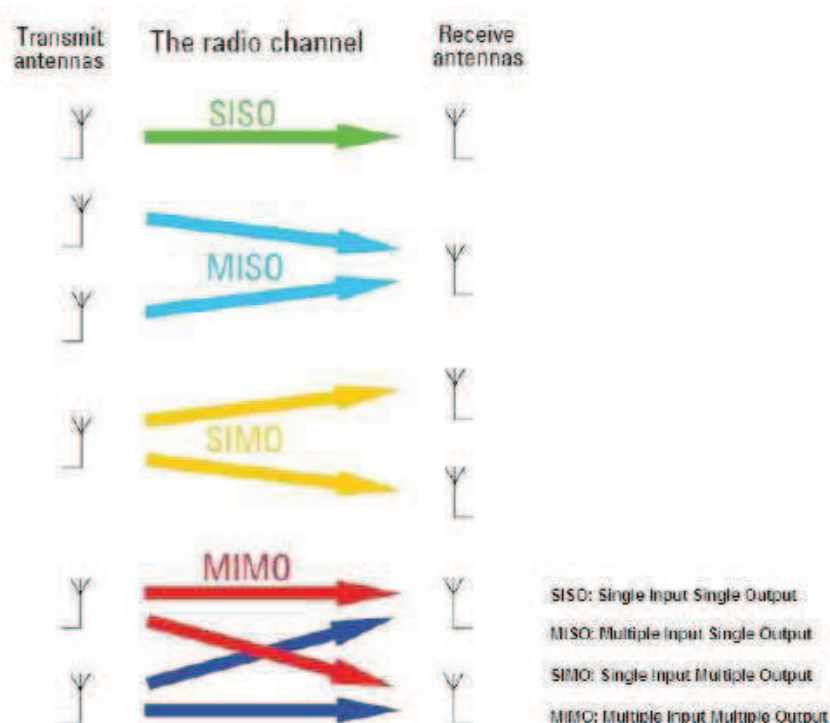


Figura 16 - Técnicas de múltiplas antenas [6]

4.5.1 LTE

4.5.1.1 LTE Downlink

Para o LTE downlink, três técnicas de múltiplas antenas são consideradas. Diversidade no transmissor (MISO), diversidade no receptor (SIMO) e MIMO.

Na diversidade no transmissor, a configuração open-loop é utilizada enquanto que a configuração mais complexa closed-loop não é utilizada. São utilizadas duas ou quatro antenas para a diversidade no transmissor.

A diversidade no receptor é obrigatória no equipamento de usuário LTE. A relação sinal-ruído é melhorada pela combinação de todos os sinais recebidos.

Para MIMO, a tecnologia LTE utiliza a configuração com duas ou quatro antenas. Equipamento de usuário com dois canais possibilita a configuração 2x2 ou 4x2, sendo que a configuração 2x2 mais comum para LTE, também conhecida como SU-MIMO (Single-User MIMO). No SU-MIMO, os dados a serem transmitidos são divididos em dois sinais com amplitude e fase diferentes. Um outro artifício utilizado é a utilização de intervalos de guarda diferentes para o sinal de cada antena, criando artificialmente multipercursos nos sinais e prevenindo o cancelamento dos sinais em casos de antenas muito próximas.



Figura 17 - SU-MIMO LTE [6]

4.5.1.2 LTE - Uplink

O equipamento de usuário LTE possui somente uma antena transmissora de modo a economizar custos e bateria. Essa configuração possibilita a MU-MIMO (Multiple-User MIMO) no qual dois diferentes usuários transmitem na mesma frequência e tempo para o eNB. Sob condições ideais, essa configuração tem a capacidade de dobrar o potencial de uplink. Uma segunda antena transmissora também pode ser utilizada pelo equipamento de usuário, criando maiores taxas de transmissão dependendo das condições do canal.



Figura 18 - MU-MIMO LTE

4.5.2 WiMAX

O WiMAX trabalha com vários sistemas de múltiplas antenas. O WiMAX trabalha tanto com Open-loop MIMO quanto Closed-loop MIMO. Open-loop MIMO inclui Space-Time Block Coding (STBC – Código Espaço-Temporal de Bloco), Multiplexação Espacial Open-loop (SM-MIMO) e modo de seleção adaptativa entre os dois. No Closed-loop MIMO, o transmissor envia “raios” de sinal adaptáveis de acordo com informações sobre o canal para aumentar o alcance e capacidade.

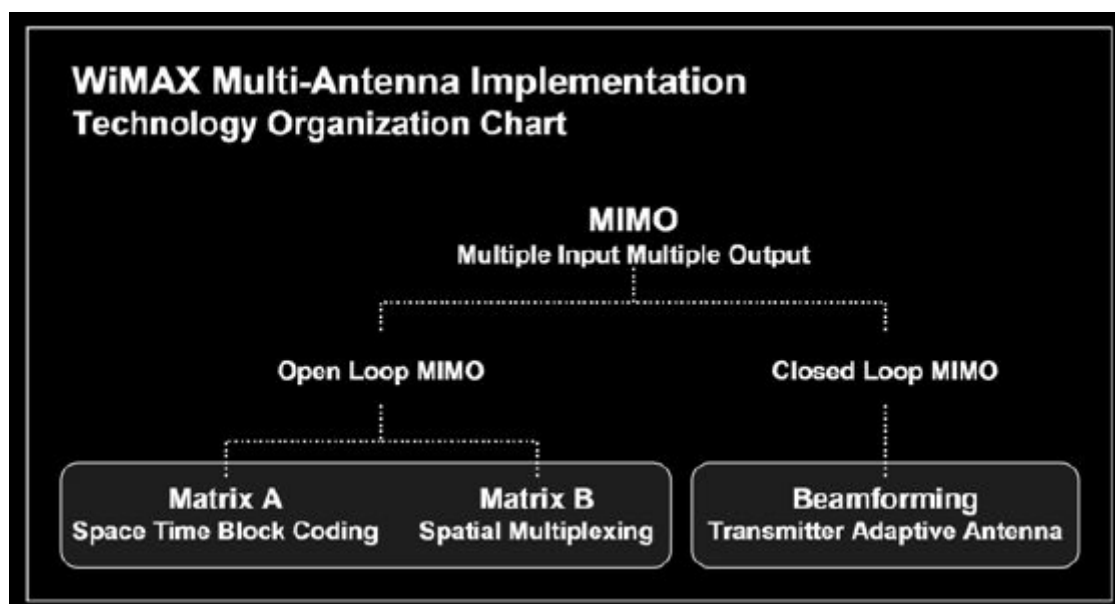


Figura 19 - Sistemas multi-antenas WiMAX [7]

4.5.2.1 WiMAX Downlink

Tanto o STBC quanto o SM-MIMO são sistemas MIMO Open-loop. O critério para a escolha de qual sistema utilizar é baseado em qual sistema fornece a melhor eficiência espectral. A tarefa de escolher o melhor sistema é chamada de modo de seleção adaptativa.

A codificação STBC também é conhecida como Alamouti e transmite cada símbolo duas vezes, uma vez por antena. O código espaço-temporal de bloco utilizado para o caso de duas antenas transmissoras e uma receptora é o Alamouti, que é ortogonal e passível ao máximo risco de detecção. O WiMAX também define STBCs para situações com 3 ou 4 antenas.

O esquema WiMAX móvel SM-MIMO trabalha com dois fluxos de dados downlink na mesma frequência para um receptor móvel. Um único fluxo de dados é codificado e dividido em um par de símbolos modulados entre duas antenas, dobrando a taxa de dados máxima e melhorando a performance do sistema quando a largura de banda é limitada.

4.5.2.2 WiMAX Uplink

Similar ao SC-MIMO, o WiMAX funciona com um esquema chamado de Space Division Multiplex Access (SDMA). Neste esquema, um agendador de ponto de acesso permite que dois fluxos de dados utilizando os mesmos recursos de tempo e frequência vindos de transmissores móveis distintos. O SDMA também dobra a taxa de dados máxima e melhora a performance do sistema quando a largura de banda é limitada.

O WiMAX uplink também pode funcionar com a tecnologia de Multiplexação Espacial Colaborativa (CSM Collaborative Spatial Multiplexing) onde os terminais que correspondem a duas antenas de transmissão únicas com os mesmos recursos de tempo e frequência aumentando a capacidade de uplink através da multiplexação. Os sinais dos diferentes canais são ortogonais entre si [6].



Figura 20 - Multiplexação Espacial Colaborativa

4.5.2.2.1 Beamforming Espacial (Closed Loop MIMO)

Para aumentar a capacidade de cobertura do sistema, o WiMAX utiliza o beamforming usando um Sistema de Antenas Adaptativas (AAS – Adaptive Antenna System). Utilizando-se de varias antenas para transmitir e receber, as antenas de beamforming controlam a direção e a forma do padrão de radiação.

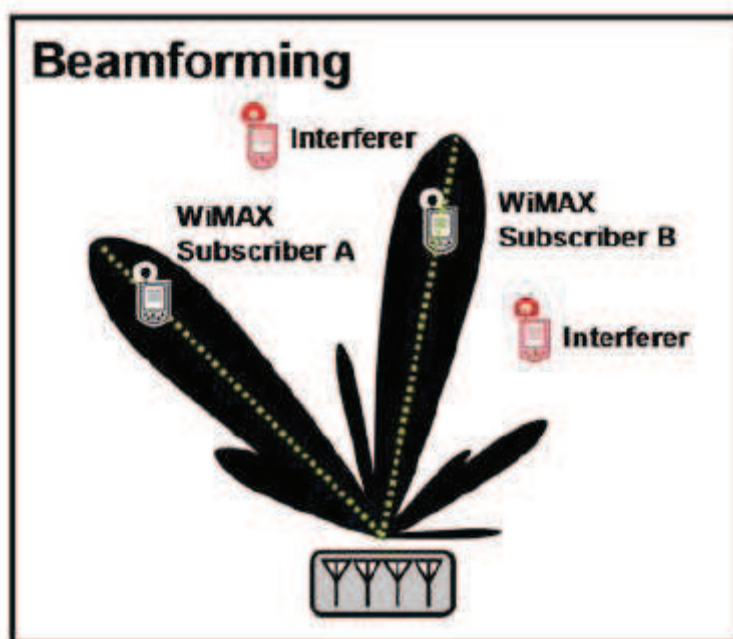


Figura 21 - Beamforming Espacial no WiMAX [7]

5 ANÁLISE DE MERCADO E DESAFIOS

A demanda por maiores taxas de transmissão de dados tem aumentado nos últimos anos devido a aplicativos que necessitam cada vez mais de banda e também devido a operadoras tentando juntar voz, vídeo e serviços de dados em uma só plataforma. Para os provedores de serviço de telecomunicação ao redor do mundo o maior desafio é decidir qual a tecnologia de próxima geração escolher para satisfazer esta demanda. Os concorrentes mais fortes para a banda larga sem fio 4G são a 3GPP Long Term Evolution (LTE) e o WiMAX móvel 802.16m, sendo que ambas as tecnologias estão na direção de serem capazes de suprir a demanda de mobilidade e banda.

Atualmente, a IEEE 802.16d (WiMAX fixa) e a IEEE 802.16e (WiMAX móvel) já alcançaram diversos mercados pelo mundo com experiências e implantações comerciais enquanto que as tecnologias WiMAX 802.16m e a 3GPP LTE ainda estão sendo desenvolvidas e testadas. A LTE vem de uma evolução agressiva das duas redes 3GPP predecessoras UMTS/HSPA. O WiMAX se utiliza de avançadas técnicas de rádio para fornecer alta eficiência espectral e recursos de QoS. O desenvolvimento do LTE está se desenvolvendo juntamente com o desenvolvimento da arquitetura SAE para redes IP. Alguns dos desafios no desenvolvimento de produtos para WiMAX e LTE está no desenvolvimento de equipamentos de usuários que suportam altas taxas de dados e técnicas de múltiplas antenas. Além disso, uma implantação de sucesso do novo esquema de modulação SC-FDMA ainda é um desafio para um desenvolvimento completo do sistema LTE. Também existem desafios na integração entre WiMAX e LTE, assim como a integração com tecnologias anteriores, que estão sendo endereçadas assim como a configuração de handover entre elas que estão sendo definidas e desenvolvidas. As metas de performance e tempo para entrar no mercado são chaves para o sucesso dos produtos de LTE e WiMAX. Para o WiMAX, existe o WiMAX Forum que ajuda na certificação e padronização dos produtos WiMAX.

Mesmo ainda estando em desenvolvimento, a LTE possui o apoio de três grandes operadoras ao redor do mundo, incluindo Vodafone, Verizon e AT&T. Por outro lado, a Intel tem sido a principal força por trás do WiMAX que também ganhou o apoio de vários fabricantes de equipamentos de usuário e planeja uma grande integração com produtos para PC existentes[9].

Com relação à disponibilidade de mercado, o serviço WiMAX já está disponível com a operadora americana US Sprint que lançou o seu serviço Xohm WiMAX em setembro de 2008. Esta é uma vantagem do WiMAX com relação à acumulação de usuários e montagem de infraestrutura.

Exceto pela Ericsson que tem concentrado seus investimentos na LTE, os outros fabricantes tem investido consideráveis recursos de P&D no desenvolvimento de equipamentos WiMAX. Os equipamentos WiMAX da Samsung e Motorola estão entre os primeiros produtos certificados para 2.5 GHz. Companhias envolvidas na iniciativa LTE incluem Alcatel-Lucent, Ericsson, Orange, NXP, Samsung, Nokia, Nortel, T-Mobile, Vodafone, ZTE, Agilent, Huawei, LG, Motorola, Telecom Italia e Telefonica [9].

5.1 ANÁLISE PARA O BRASIL

5.1.1 WiMAX

O Brasil já foi visto por muitos como o país da futura promessa do WiMAX, devido à alta densidade de sua população (190 milhões de habitantes), o baixo índice de penetração de 5,6% e a grande quantidade de áreas rurais e não atendidas (110 milhões de pessoas ainda não tinham acesso à banda larga). No entanto, a situação do Brasil mudou, permitindo uma muito pequena oportunidade de o WiMAX se desenvolver.

Em 2003, a Anatel, agência reguladora brasileira, alocou cinco licenças em 3,5Hz. Neste leilão somente 25% do espectro foi licenciado e o restante deixado para ser ofertado num segundo leilão planejado para 2006, e que vem sendo adiado desde então. Dos cinco licenciados, apenas dois – Neovia e Embratel – implantaram redes comerciais de WiMAX até hoje.

Em novembro de 2008, a Anatel realizou uma consulta pública (nº 54) para atribuição dos 75% de espectro remanescente nos 3,5GHz. A Anatel propôs disponibilizar esta banda para operadores móveis em serviços móveis e serviços móveis pessoais (SMP); para as empresas de serviços de transmissão fixa e comutada (STFC); e para provedores de serviços. A Anatel também propôs permitir serviços móveis nesta banda e alocar uma parte deste espectro para o setor público.

A Anatel recebeu mais de 2 mil contribuições de interessados, mas não chegou a qualquer decisão com esta consulta. De momento, nenhum operador, exceto a Embratel, tem acesso a espectro suficiente para instalar uma rede de WiMAX em larga escala no Brasil.

A banda dos 2,5GHz foi alocada para os serviços de MMDS em 2002 e depois, em 2006, a Anatel liberou as operadoras de MDS a usar 184MHz deste espectro para prover serviços de dados também. Os serviços de MMDS não fizeram muito progresso, exceto em algumas áreas rurais de pequena extensão. Por outro lado, todas as operadoras de MMDS usam seu espectro entre 2,5 e 2,7 GHz para prover serviços de banda larga sem fio, embora estes serviços não sejam em WiMAX já que o regulador não liberou o WiMAX nesta banda.

As operadoras de MMDS provêm serviços sem fio usando sistema DOCSIS e NextNet. Em anos anteriores, as MMDS conduziram vários testes de WiMAX no Brasil. No entanto, a Anatel não forneceu nenhuma certificação para equipamentos que operam em 2,5GHz, pois considera que isto poderia representar uma ameaça aos serviços e 3G.

O regulador lançou uma consulta pública (nº 31) em março de 2009, para alteração do uso da banda dos 2,5GHz. Com esta consulta, a Anatel propôs dar uma grande mordida no espectro das MMDS e alocá-la para serviços móveis. O uso desta nova alocação se fará sobre tecnologia neutra, o que significa que pode ser usado tanto por WiMAX móvel quanto LTE. Mas, é sabido que, se este espectro for atribuído às operadoras móveis, a última coisa que farão é implantar uma rede WiMAX, em favor da prestação de serviços 4G/LTE. Se esta premissa for verdadeira, o WiMAX não tem nenhuma chance de ser implantado na faixa de 2,5 GHz no Brasil.

Simplificando: o progresso do WiMAX no Brasil tem sido difícil. Há muitos obstáculos que terão de ser superados antes que ele possa chegar à dinâmica do mercado. Um deles é o ambiente regulatório. Em segundo lugar, se o espectro for atribuído aos operadores móveis, os 2,5 GHz serão utilizados para serviços 4G/LTE ao invés de WiMAX. Finalmente, o 3G tem sido um tremendo sucesso no Brasil, e as operadoras móveis precisam de espectro adicional para manter a expansão e modernização de suas redes. [11]

5.1.2 LTE

A tecnologia Long Term Evolution (LTE) está na mira de operadoras de telefonia móvel no Reino Unido, nos Estados Unidos e na Suécia. As iniciativas pontuais de provedores em mercados mais maduros não significam que brasileiros devem se entusiasmar – o LTE só deve dar as caras no mercado brasileiro muitos anos depois do primeiro serviço comercial do tipo estrear na Europa ou nos EUA.

Não bastasse as redes 3G ainda estarem engatinhando no mercado nacional, o que faz com que as operadoras reservem suas verbas de investimento em curto prazo para o padrão, há problemas técnicos quanto à implementação. O primeiro deles é o pesado investimento que operadoras teriam de fazer em fibra óptica para que a velocidade teórica prometida pelo LTE alcançasse os usuários sem problemas de lentidão como os registrados durante a implementação do 3G.

Nos Estados Unidos, operadoras, como Verizon e AT&T, pagaram bilhões de dólares em março de 2008 para que pudessem explorar a parte do espectro “liberado” pela TV Digital para redes de comunicação como o LTE, por exemplo. A partir de 12 de junho, prazo postergado pelo governo norte-americano em fevereiro dada a ainda alta taxa de penetração do set-top boxes entre famílias mais pobres no país, as operadoras com licenças poderão começar a desenvolver projetos de redes LTE. No Brasil, o Ministério das Comunicações já esclareceu que pretende desligar o sinal analógico da TV em detrimento ao digital apenas em junho de 2016, o que faz com que o aproveitamento da faixa do espectro vazia esteja a mais de 7 anos dos brasileiros.

Não bastassem os dois problemas anteriores, a crise econômica mundial não parecer ajudar a adoção do LTE em mercados mais maduros, o que deverá atrasar sua replicação em mercados em desenvolvimento que não podem se dar ao luxo de investir em uma tecnologia que não vingará pela menor quantia de investimento. Considerando que o leilão 3G da Europa aconteceu em 2000 e no Brasil aconteceu em 2008, ao menos que a Anatel seja mais ágil, vai demorar um bom tempo para a tecnologia LTE invadir o mercado brasileiro. [12]

CONCLUSÃO

A demanda cada vez maior para acesso banda larga sem fio de alta velocidade que suporta uma alta taxa de dados com capacidade para triple-play (voz, dados, vídeo) com mobilidade tem criado um interesse da indústria de telecomunicações em formular novas tecnologias e arquiteturas que ofereçam tais serviços com baixo custo e alta eficiência tanto para as operadoras quanto para o usuário final.

Após a definição dos requisitos para 4G pela ITU, as tecnologias WiMAX e LTE apontaram como as principais candidatas a obter a “coroa 4G”. Este estudo comparativo revelou diversas semelhanças entre as duas tecnologias, no entanto, se analisarmos as perspectivas de mercado as duas tecnologias diferem em termos de herança e tempo de implantação. Implantações de WiMAX já começaram pelo mundo enquanto que o LTE ainda continua em fase de desenvolvimento. Esforços estão sendo feitos para que seja feita a integração, roaming e mobilidade entre essas tecnologias, assim como a integração com suas respectivas tecnologias antecessoras.

Novos provedores de serviço, provedores de TV a cabo e provedores de DSL com o objetivo de fornecer acesso móvel banda larga em curto prazo podem escolher o WiMAX como o seu sistema de banda larga móvel sem fio. Por outro lado, as operadoras de telefonia celular devem aguardar a LTE por ser uma maneira mais conveniente e natural de atualizar seus já existentes sistemas 3GPP UMTS/HSPA para o 4G. Para as operadoras de celular que utilizam GSM/EDGE e cdma2000, tanto o WiMAX quanto a LTE podem ser empregadas para atualização para o 4G. Como ambas as tecnologias possuem perfis técnicos similares, a escolha de tecnologia de próxima geração dependerá mais do benefício da tecnologia no decorrer do tempo e da plataforma a ser atualizada.

REFERÊNCIAS

- [1] CHANG, Richard W., **Orthogonal Frequency Division Multiplexing**, U.S. Patent 3 488 455, 06/01/1970.
- [2] ANDREWS, Jeffrey G., GHOSH, Arunabha and MUHAMED, Rias. **Fundamentals of WiMAX: Understanding Broadband Wireless Networking**. Prentice Hall, 2008.
- [3] WiMAX Forum, "**WiMAX and IMT-2000**", 22/01/2007 (url: http://www.wimaxforum.org/technology/downloads/WiMAX_and_IMT_2000.pdf)
- [4] Winters, J. H. On the capacity of radio communication systems with diversity in a Rayleigh fading environment. IEEE, Select. Areas Commum., Junho 1987.
- [5] PINTO, Ernesto L., PENEDO DE ALBUQUERQUE, Claudio. **A técnica de transmissão OFDM**. Revista Científica Periódica. Volume 5, número 1, Junho 2002.
- [6] Agilent Technologies, **3GPP Long Term Evolution: System Overview**, Product Development and Test Challenges, 19/05/2008. (url: <http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5989-8139EN.pdf>)
- [7] Motorola, **A Practical Guide to WiMAX Antennas: MIMO and Beamforming Technical Overview**. (url: http://www.motorola.com/web/Business/Solutions/Industry%20Solutions/Service%20Providers/Wireless%20Operators/Wireless%20Broadband/wi4%20WiMAX/Document/StaticFile/A_Practical_Guide_to_WiMAX_Antennas_White_Paper.pdf)
- [8] **LTE Tutorials**, (<http://www.eventhelix.com/lte/lte-tutorials.htm>)
- [9] Market Intelligence Center, **The LTE-WiMAX face-off**, Industry Intelligence Program (url: http://www.wimaxforum.org/sites/wimaxforum.org/files/analystreports/wimax_forum_the_wimax_lte_face_off_mic.pdf)
- [11] url: <http://idgnow.uol.com.br/telecom/999/12/31/lte-no-brasil-depende-de-fim-da-tv-analogica-e-ascensao-de-servicos-3g/>
- [12] url: <http://www.rapidinfoshop.com.br/blog/2010/01/o-ano-do-wimax-no-brasil/>
- [13] P.Almers, E. Bonek, A. Burr, N. Czink, M. Debbahg, V. Degli-Esposti, H. Hofstetter, P. Kyosti, D. Laurenson, G. Matz, A. F. Molish, C. Oestges, and H.Ozcelik, "Survey of Channel and Radio Propagation Models for Wireless MIMO Systems," *EURASIP Journal of Wireless Communication and Networking*, 2007



TERMO DE APROVAÇÃO

Título da Monografia Comparação entre WiMAX e LTE

por

Emmanuel G. Chapaval dos Santos

Esta monografia foi apresentada às 18h do dia 05 de setembro de 2011 como requisito parcial para a obtenção do título de ESPECIALISTA EM TELEINFORMÁTICA E REDES DE COMPUTADORES, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O candidato foi argüido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado com a nota *9,0 (NOME INTEIRO)*

Prof. Dr. Ricardo Carvalho Pereira
(UTFPR)

Prof. Dr. Walter Godoy Junior
(UTFPR)

Visto da Coordenação

Prof. Dr. Walter Godoy Júnior
Coordenador do Curso