

1. Tecnologia WiMAX

O vasto crescimento da *internet* tem gerado demanda para serviços de acesso à *internet* em alta velocidade. O acesso *wireless* banda larga está sendo cogitado como excelente opção para um mercado futuro, uma vez que esta tecnologia combina a conveniência do sistema sem fio (*wireless*) com o desempenho de banda larga.

Atualmente, as tecnologias de banda larga mais difundidas são: i) DSL, que possui como meio físico o par trançado, e ii) *cable modem*, que faz uso do cabo coaxial para sua transmissão.

A tecnologia de banda larga sem fio pode ser classificada de acordo com a estacionariedade do receptor. Sistemas em que o receptor é estático ou nomádico são classificados como sistemas de banda larga sem fio fixo. Existem, também, os sistemas de banda larga sem fio móvel, onde os receptores são portáteis ou móveis.

Os sistemas sem fio fixo oferecem certas vantagens em relação aos sistemas fixos tradicionais, entre as quais podem ser citadas: baixo custo de entrada e distribuição; distribuição e rendimento mais rápidos e simples; custos operacionais e de manutenção mais baixos e independência das operadoras tradicionais.

O Instituto de Engenharia Elétrica e Eletrônica dos Estados Unidos (IEEE – *Institute of Electrical and Electronics Engineers*) formou, em 1998, o grupo denominado 802.16 para desenvolver um padrão para redes metropolitanas sem fio. A partir da formação deste grupo, foi criado o padrão IEEE 802.16, que especifica todos os parâmetros para as redes WiMAX (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*). O primeiro padrão produzido por este grupo foi aprovado em 2001 e foram especificadas as camadas físicas e de acesso ao meio (MAC). Este padrão foi desenvolvido, tendo em vista, como aplicação principal, a comunicação em alta velocidade para empresas que não poderiam adquirir fibra óptica. Como características do padrão IEEE 802.16 podem ser citadas a faixa de frequência de operação entre 10 GHz a 66 GHz, comunicação em visada direta (LOS – *Line of Sight*), camada física baseada em portadora única (*Single Carrier*), multiplexação por divisão do tempo (TDM – *Time Division Multiplexing*),

suporte à duplexação por divisão de frequência (FDD – *Frequency Division Duplexing*) e divisão do tempo (TDD – *Time Division Duplexing*) .

O padrão IEEE 802.16 exige a existência de visada direta entre o transmissor e o receptor, limitando sua aplicação a estes ambientes. O grupo 802.16 ampliou este padrão, de tal forma a operar em faixas de frequências licenciadas e não licenciadas e permitir comunicação sem visada direta (NLOS – *Non Line of Sight*). Em 2003, foi finalizado o padrão 802.16a que consiste no uso da tecnologia OFDM na camada física e a camada MAC provê suporte a múltiplo acesso por divisão de frequências ortogonais (OFDMA – *Orthogonal Frequency Division Multiple Access*), entre outras opções. Em 2004, foram finalizadas revisões realizadas no IEEE 802.16a e criado o padrão IEEE 802.16-2004 que substituiu todos os anteriores, tornando-se a base para a primeira aplicação da tecnologia WiMAX.

Em 2005, foi finalizada uma emenda do padrão IEEE 802.16-2004, denominada IEEE 802.16e-2005. Esta emenda especifica na camada física o OFDMA escalável (*scalable* OFDMA) e faz modificações na camada MAC para que seja possível mobilidade em alta velocidade.

Os padrões 802.16 foram desenvolvidos tanto para aplicações de banda larga sem fio fixa, quanto móvel. A especificação IEEE 802.16-2004 abrange acesso fixo e nomádico, enquanto que a sua emenda, 802.16e-2005, faz alterações na especificação base para que seja possível acrescentar a portabilidade e mobilidade. A Tabela 1.1 [8] define os tipos de acessos possíveis para cada padrão 802.16.

Tipo de acesso	Velocidade	Handoff	IEEE 802.16-2004	IEEE 802.16e-2005
Fixo	Estacionário	No	Sim	Sim
Nomádico	Estacionário	No	Sim	Sim
Portabilidade	Velocidade de pedestre	Hard handoffs	Não	Sim
Mobilidade	Veicular	Soft handoffs	Não	Sim

Tabela 1.1: Classificação de acesso fixo a móvel de acordo com o padrão WiMAX.

As aplicações da tecnologia de banda larga sem fio fixa estão classificadas em ponto-a-ponto e ponto-multiponto. Dentre as aplicações ponto-a-ponto podem ser destacadas a conectividade entre prédios e *backbone* de microondas. Por outro lado, podem ser citados como exemplos de aplicações ponto-multiponto: banda larga para residências, *small office/home office* (SOHO); provisionamento de E1 para empresas; *backbone wireless* para zonas WiFi e para tecnologia celular 3G. Provedores de serviços banda larga utilizando a tecnologia WiMAX fixo poderiam prover acesso à *internet* em alta velocidade,

serviços de telefonia usando voz sobre o protocolo *internet* (VoIP – *Voice Over Internet Protocol*) e hospedagem para aplicações baseadas em *internet*.

A tecnologia WiMAX móvel pode ser utilizada para realizar o acesso à internet em alta velocidade, voz sobre IP, bem como operadoras que possuem infraestrutura fixa (operadoras a cabo, satélite e companhias telefônicas tradicionais) podem utilizar esta tecnologia para prover serviços móveis. Por outro lado, as operadoras móveis existentes podem utilizar o WiMAX como solução para realizar *overlay* e oferecer taxas mais altas em regiões específicas como centros urbanos e *metrozones*.

O padrão WiMAX define grande gama de recursos, incluindo MIMO (*Multiple Input Multiple Output*), sistema de antenas adaptativas (AAS – *Adaptative Antenna System*), operação em frequências licenciadas e não licenciadas, diversas larguras de banda do sinal transmitido, modos distintos de operação (TDD, FDD, *full-deplex*, *half-duplex*), dentre outros. Diante de tantas possibilidades de configurações, surgiu a necessidade de uma entidade que regulamentasse os parâmetros do padrão e os equipamentos oferecidos pelos diversos fabricantes, com o objetivo de promover a interoperabilidade entre fabricantes. O fórum WiMAX foi criado para assumir este papel e tem como principal função definir *profiles* que consistem na seleção de determinados recursos dentre todos aqueles definidos no padrão IEEE 802.16. O WiMAX fórum também realiza a certificação de equipamentos de banda larga sem fio, de acordo com o IEEE 802.16, com o intuito de garantir a interoperabilidade entre eles.

A denominação da tecnologia como WiMAX é proveniente do fórum WiMAX.

Este capítulo abrange o padrão WiMAX com informações sobre a camada física e de acesso ao meio (MAC), parâmetros sistêmicos da tecnologia em questão e finaliza com maiores informações sobre a modulação OFDM, uma vez que esta tecnologia é de grande relevância para o WiMAX;

1.1. Padrão WiMAX

O WiMAX é uma tecnologia de rede sem fio, banda larga, capaz de prover: i) cobertura de até 50 km para estações fixas e de 3 a 5 km para estações móveis; ii) largura de banda máxima de 20 MHz para os sinais de transmissão, podendo assumir valores múltiplos inteiros de 1,25 MHz, 1,5 MHz e

1,75 MHz; iii) taxas de transmissão de até 74 Mbps para cada estação rádio base, utilizando um sinal com largura de banda de 20 MHz; iv) acesso fixo, nomádico, portátil e móvel; v) além de qualidade de serviço (QoS) e interfaces para redes IP, ATM, E1/T1 e *Ethernet*.

WiMAX 802.16e-2005 é uma solução de próxima geração, completamente IP e padronizada tanto para aplicações fixas quanto móveis. Neste padrão WiMAX foram acrescentados protocolos para mobilidade (*handover*, *sleep mode*), camada física robusta baseada em SOFDMA (*Scalable Orthogonal Frequency Division Multiple Access*) com mecanismo eficiente de proteção a erro e suporte à avançada tecnologia de antenas denominada MIMO (*Multiple-Inputs and Multiple-Outputs*).

As especificações IEEE 802.16 abrangem os aspectos da Camada Física (PHY) e de Controle de Acesso ao Meio (MAC).

1.1.1. Camada Física (PHY)

O padrão 802.16d-2004 define quatro camadas físicas, sendo que qualquer uma delas pode ser utilizada com a camada MAC para desenvolver um sistema banda larga sem fio. As camadas físicas definidas são as seguintes [17]:

- **WirelessMAN-SC:** camada física com portadora única (*Single Carrier*) que define frequências de operação entre 10 GHz a 66 GHz. O uso de altas frequências implica que a comunicação seja feita em linha de visada entre a estação rádio base e o receptor. Antenas diretivas devem ser utilizadas nas estações cliente, com o objetivo de diminuir o número de reflexões do sinal e a interferência devida a causas diversas. São especificados três tipos de modulação: QPSK, 16-QAM (opcional para o *uplink*), e 64-QAM (opcional para o *downlink* e para o *uplink*).

Ao longo da comunicação de *downlink*, é utilizada a multiplexação por divisão do tempo (TDM – *Time Division Multiplexing*). Já no enlace reverso (*uplink*), é utilizada a técnica de múltiplo acesso por divisão do tempo (TDMA – *Time Division Multiple Access*). Esta especificação suporta duplexação FDD (*Frequency Division Duplexing*) e TDD (*Time Division Duplexing*). A técnica FDD aloca os canais, direto e reverso, em frequências diferentes. Por outro lado, a técnica TDD consiste

em dividir os canais ao longo do tempo, e utilizar a mesma frequência. Ambas as tecnologias, FDD e TDD, suportam perfil de rajada adaptativa em que a modulação e codificação podem ser designadas dinamicamente para cada SS (SS – *Subscriber Station*) em cada período da rajada. A utilização de diversos esquemas de modulação fornece vários graus de robustez e eficiência às rajadas.

Como a transmissão no canal de *downlink* pode ser feita em rajadas, existe suporte tanto *full-duplex* quanto *half-duplex* a estações cliente.

- **WirelessMAN-SCa:** camada física com portadora única (*Single Carrier*), desenvolvida para operação entre as frequências de 2 – 11 GHz, possibilitando a comunicação em ambientes com linha de visada obstruída (NLOS – *Non Line of Sight*) e aplicações ponto-multiponto. Este padrão define o suporte a, pelo menos, uma técnica de duplexação (FDD ou TDD). Para o enlace direto (*downlink*), é especificado o uso da multiplexação por divisão do tempo ou a técnica de múltiplo acesso por divisão do tempo. Por outro lado, para o enlace reverso (*uplink*) é especificada a técnica TDMA. São especificadas estruturas de quadro que permitem melhor equalização e estimação de desempenho em regiões NLOS ou regiões com um grande espalhamento de retardos. Esta especificação abrange as seguintes modulações: *Spread* BPSK, BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM e 256-QAM, sendo a última opcional.
- **WirelessMAN-OFDM:** camada física baseada em Multiplexação por Divisão de Frequências Ortogonais (OFDM – *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*), 256 subportadoras, Transformada Rápida de Fourier (FFT - *Fast Fourier Transform*) no processo de demodulação e Transformada Rápida de Fourier Inversa (IFFT – *Inverse Fast Fourier Transform*) na modulação. Esta camada física foi finalizada na especificação IEEE 802.16-2004 e desenvolvida pelo grupo 802.16 para aplicações fixas, sendo conhecida como WiMAX fixo. Abrange a comunicação em ambientes com condições de NLOS, frequência entre 2GHz a 11GHz e modulações BPSK, QPSK com mapeamento Gray, 16-QAM e 64-QAM (opcional em bandas que não precisem de

licenciamento). Em bandas licenciadas, deve ser utilizado o método de duplexação FDD ou TDD. Por outro lado, a duplexação TDD deve ser aplicada a bandas não licenciadas.

- **WirelessMAN-OFDMA:** baseada em modulação OFDM, Múltiplo Acesso por Divisão Ortogonal de Frequências, e FFT de 2048 pontos. Desenvolvida para operação em condições NLOS, ponto-multiponto, com frequências entre 2 a 11 GHz.

Neste sistema, múltiplo acesso é adquirido pela designação de subcanais das múltiplas subportadoras para receptores individuais, permitindo que diversos clientes possam transmitir simultaneamente. A divisão em subcanais lógicos tem por objetivo a escalabilidade, o acesso múltiplo e o processamento de grupos de antenas. As modulações utilizadas são QPSK com mapeamento Gray, 16-QAM e 64-QAM (opcional). Para bandas licenciadas, a duplexação pode ser tanto FDD quanto TDD. As SS (*Subscriber Station*) podem ser H-FDD, que tenta combinar os benefícios do TDD com a duplexação de frequências do FDD. Em bandas não licenciadas, a duplexação utilizada é TDD.

Esta camada é modificada na especificação IEEE 802.16e-2005 e passa a suportar SOFDMA (*scalable* OFDMA) e FFT de tamanhos variáveis entre: 128, 512, 1024 e 2048. A FFT, de tamanho variável, permite implementação otimizada do sistema sob várias larguras de banda de canal e condições de enlace. Esta camada física foi desenvolvida pelo grupo 802.16 para aplicações móveis e portáteis, sendo conhecida como WiMAX móvel.

O WiMAX fórum definiu um *profile* para o padrão 802.16-2004, que consiste na especificação do OFDM na camada física, FFT de 256 pontos, duplexação por divisão da frequência e do tempo. As larguras de banda e frequências definidas neste *profile* são descritas na Tabela 1.2 [8]. Os parâmetros de um símbolo OFDM-256 são detalhados na Tabela 1.3 [23].

FAIXA DE FREQUÊNCIA [MHz]	DUPLEXAÇÃO	LARGURA DE BANDA [MHz]
3400 – 3600	TDD	3,5
3400 – 3600	FDD	3,5
3400 – 3600	TDD	7,0
3400 – 3600	FDD	7,0
5725 – 5850	TDD	10,0

Tabela 1.2: *Profile* criado pelo WiMAX fórum para o padrão IEEE 802.16-2004.

PARÂMETROS	VALORES
Número de pontos da FFT (N_{FFT})	256
Quantidade de subportadoras de dados (N_{used})	200
Fator de amostragem (n)	Para larguras de banda múltiplas de 1,75 MHz, então $n = \frac{8}{7}$. Para larguras de banda múltiplas de 1,5 MHz, então $n = \frac{86}{75}$. Para larguras de banda múltiplas de 1,25 MHz, então $n = \frac{144}{125}$. Para larguras de banda múltiplas de 2,75 MHz, então $n = \frac{316}{275}$. Para larguras de banda múltiplas de 2,0 MHz, então $n = \frac{57}{50}$. Para larguras de banda não especificadas, então $n = \frac{8}{7}$.
Prefixo Cíclico ($G = T_g / T_b$)	$\frac{1}{4}$; $\frac{1}{8}$; $\frac{1}{16}$; $\frac{1}{32}$
Quantidade de subportadoras de guarda em frequências mais baixas ($N_{Guard, left}$)	28
Quantidade de subportadoras de guarda em frequências mais altas ($N_{Guard, right}$)	27
Índice do <i>offset</i> de frequência da subportadora DC	0
Índice do <i>offset</i> de frequência das subportadoras de guarda	-128, -127, -126, ..., -101 +101, +102, +103, ..., +127
Índice do <i>offset</i> de frequência das subportadoras piloto	-88, -63, -38, -13, 13, 38, 63, 88

Tabela 1.3: Parâmetros do símbolo OFDM-256

Outro *profile* divulgado pelo WiMAX fórum define os parâmetros referentes ao padrão IEEE 802.16e-2005, como pode ser visualizado na Tabela 1.4 [4].

LARGURA DE BANDA [MHz]	NÚMERO DE PONTOS DA FFT	LARGURA DE BANDA [MHz]					
		2300	2305	2345	2496	3300	3400
		–	–	–	–	–	–
5,0	512	2400	2320	2,36	2690	3400	3800
7,0	1024	TDD	TDD	TDD	TDD	TDD	TDD
8,75	1024	TDD					
10,0	1024	TDD	TDD	TDD	TDD	TDD	TDD

Tabela 1.4: *Profile* para o padrão IEEE 802.16e-2005

O WiMAX fixo e o móvel possuem diferentes implementações do OFDM em suas camadas físicas. O WiMAX fixo (IEEE 802.16-2004) utiliza em sua camada física a FFT-256. Por outro lado, o WiMAX móvel (IEEE 802.16e-2005) possui camada física baseada em OFDMA escalável (o tamanho da FFT varia entre 128 a 2048 pontos). A Tabela 1.5 mostra os parâmetros de um símbolo OFDM para o WiMAX fixo e móvel.

PARÂMETROS	WiMAX fixo OFDM-PHY	WiMAX móvel OFDMA-PHY			
Tamanho da FFT	256	128	512	1024	2048
Subportadoras de dados	192	72	360	720	1440
Subportadoras piloto	8	12	60	120	368
Subportadoras nulas/guarda	56	44	92	184	368
Prefixo Cíclico	$\frac{1}{4}; \frac{1}{8}; \frac{1}{16}; \frac{1}{32}$				
Largura de Banda [MHz]	3.5	1.25	5	10	20
Espaçamento entre subportadoras [KHz]	15.625	10.64			
Tempo útil do símbolo [μ s]	64	91.4			
Duração do símbolo OFDM [μ s]	72	102.9			

Tabela 1.5: Parâmetros de um símbolo OFDM e OFDMA.

1.2. Camada MAC

De acordo com o modelo OSI, a camada de Controle de Acesso ao Meio (MAC) está posicionada acima da camada física, sendo responsável pelo controle e multiplexação de vários enlaces em um único meio físico. Segundo [3] algumas das principais funções da camada MAC são:

- Segmentar ou concatenar os SDUs (*Service Data Units*), recebidos de camadas superiores, em MAC PDU (*Protocol Data Units*);
- Selecionar o perfil de rajada e o nível de potência apropriados para a transmissão dos MAC PDUs;
- Retransmitir os MAC PDUs que foram recebidos incorretamente, uma vez que a técnica ARQ (*Automated Repeat Request*) tenha sido usada;
- Prover prioridade e controle de QoS para os MAC PDUs que pertencem a diferentes classes de dados e sinalização;
- Agendar MAC PDUs nos recursos da camada física;
- Prover suporte à gerência de mobilidade para camadas superiores;
- Prover segurança e gerenciamento principal;

- Prover modo de operação *idle* e modo de operação em que a bateria seja economizada.

O protocolo de acesso ao meio do padrão IEEE 802.16 foi criado para funcionar sob aplicações ponto-multiponto e para suportar taxas muito altas, tanto no enlace direto, quanto no reverso. Por isso, os algoritmos de alocação de taxa de dados devem acomodar centenas de terminais por canal.

Os serviços suportados por redes WiMAX são de diversas naturezas, incluindo voz e dados TDM, conectividade IP (*Internet Protocol*) e Voz sobre IP (VoIP). Para acomodar estes diversos serviços, a camada MAC abrange tanto o tráfego contínuo quanto em rajada e, assim, garante a qualidade de serviço.

O padrão MAC 802.16 disponibiliza inúmeros tipos de serviços. Alguns já existentes, como os análogos às categorias de serviço do ATM, bem como categorias inovadoras, como taxa garantida de quadro (GFR – *Guaranteed Frame Rate*).

1.3.

Aspectos sistêmicos

1.3.1.

Multiplexação por Divisão de Frequências Ortogonais – OFDM

A Multiplexação por Divisão de Frequências Ortogonais (OFDM – *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) é em uma técnica de transmissão de múltiplas portadoras. É similar ao FDM (*Multiplexação por Divisão de Frequência*). Entretanto, são utilizadas frequências ortogonais que caracterizam as subportadoras, de tal forma que podem se aproximar e sobrepor parte de seu espectro de frequência sem causar interferência mútua, tornando este processo mais eficiente quando comparado ao de múltiplas portadoras tradicional. Como mostra a Figura 1.1.

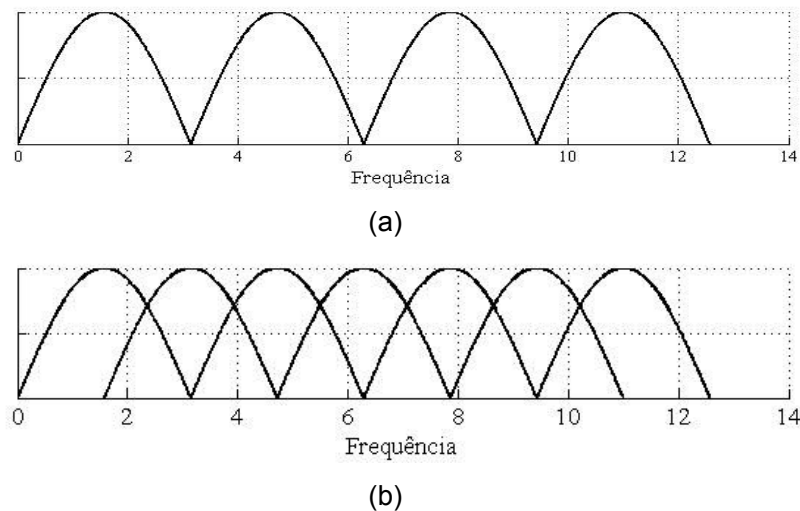


Figura 1.1: Multiplexações FDM e OFDM: (a) espectro FDM; (b) espectro OFDM.

Os processos de modulação e demodulação de sinais OFDM são realizados utilizando a transformada rápida de Fourier inversa (IFFT) e direta (FFT), respectivamente.

A técnica de múltiplas portadoras, implementada no OFDM, acarreta em grande benefício, uma vez que o desvanecimento seletivo de banda larga se restringe a um subconjunto de subportadoras, o que reduz a complexidade da equalização adaptativa. A Figura 1.2 [64] ilustra a distorção imposta pelo canal de rádio propagação a um sinal de banda larga de portadora única e de múltiplas portadoras.

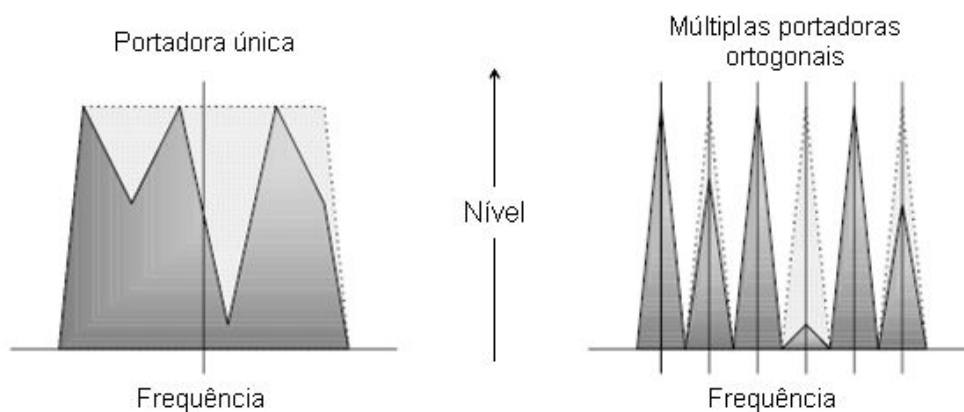


Figura 1.2: Sinal recebido com transmissão de portadora única e OFDM.

O sinal OFDM no domínio do tempo, Figura 1.3, é caracterizado pelo seu tempo útil (T_b) e o tempo de guarda (T_g). Uma cópia do final do símbolo, com duração T_g , é posicionada no início para coleta, caso o sinal tenha passado por múltiplos caminhos, mantendo assim sua ortogonalidade.

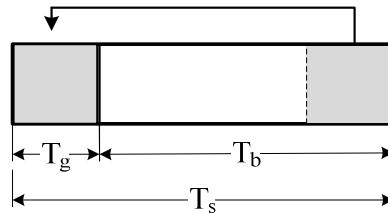


Figura 1.3: Estrutura do símbolo OFDM no domínio do tempo.

O símbolo OFDM no domínio de frequência, como mostra a Figura 1.4, abrange três tipos de subportadoras [23]:

- Subportadoras de dados, cuja função é transmissão de dados;
- Subportadoras pilotos, utilizadas em estimativas diversas;
- Subportadoras nulas, onde não há transmissão e são utilizadas como bandas guarda, subportadoras inativas ou subportadora DC.

As bandas de guarda têm o objetivo de permitir que o sinal decaia naturalmente. A subportadora DC equivale à frequência RF central da estação.

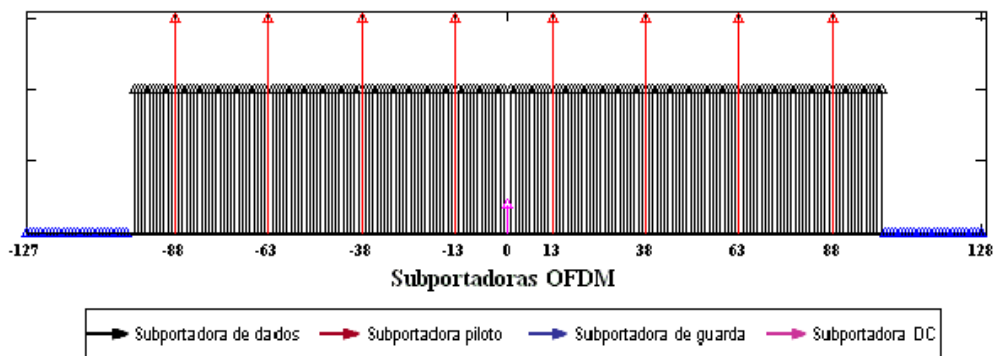


Figura 1.4: Subportadoras OFDM no domínio da frequência.

Pode ser aplicado ao OFDM o acesso de vários usuários utilizando o mesmo símbolo OFDM, o que consiste na tecnologia de Múltiplo Acesso por Divisão de Frequências Ortogonais (OFDMA - *Orthogonal Frequency Division Multiple Access*) e permite que algumas subportadoras sejam designadas para diferentes usuários. Por exemplo, subportadoras 1, 3 e 7 são designadas para o usuário 1 e as subportadoras 2, 5 e 9, designadas para o usuário 2. Este grupo de subportadoras designadas para cada usuário é denominada subcanal.

O símbolo OFDMA no domínio do tempo é semelhante àquele do padrão OFDM. Por outro lado, no domínio de frequência, as subportadoras são divididas

em subcanais, como mostra a Figura 1.5 [8]. No *downlink*, cada subcanal pode ser utilizado para a comunicação com diferentes usuários. No *uplink*, cada cliente pode utilizar um ou mais canais. Não é necessário que as subportadoras que compõem um mesmo canal sejam adjacentes, como indicado na figura.



Figura 1.5: Subportadoras OFDMA no domínio da frequência.

A tecnologia OFDM permite que sistemas 802.16 operem com os grandes espalhamentos temporais (*Delay Spread*) de sinal, típicos dos ambientes NLOS, onde se espera que tais sistemas sejam implementados. A característica do OFDM de eficientemente superar os malefícios do *delay spread*, multipercurso e interferência intersimbólica permite maior vazão e o torna uma tecnologia apropriada a sistemas sem fio, como o WiMAX

1.3.2.

SubCanalização em WiMAX

A subcanalização define a organização das subportadoras em grupos (subcanais) e quais deles podem ser alocados para as estações dos assinantes (SS – *subscriber station*), variando de acordo com a sua condição do canal e da necessidade de dados. Originalmente, em OFDM apenas uma SS transmite em um slot¹ de tempo. Em OFDMA, vários SSs podem transmitir no mesmo *slot* de tempo ao longo de vários subcanais. A Figura 1.6 mostra o padrão de alocação das subportadoras para os SSs em um sistema OFDM e OFDMA, onde cada padrão de preenchimento representa um usuário.

¹ Slot é o mínimo recurso de tempo-frequência que pode ser alocado por um sistema WiMAX para um determinado link. Cada slot consiste de um subcanal por um, dois ou três símbolos OFDM [2].

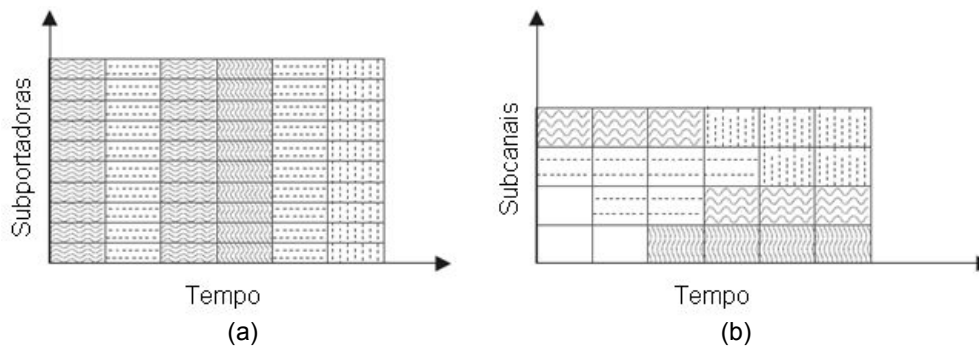


Figura 1.6: Subcanalização do sistema WiMAX: (a) OFDM; (b) OFDMA.

Ao utilizar subcanalização, em um mesmo *slot* de tempo, uma estação base (BS – *Base Station*) do sistema WiMAX pode alocar maior potência de transmissão para SS's que estejam com baixa razão sinal/ruído (SNR – *signal-to-noise ratio*) e menor potência para SS's que estejam com melhor SNR. A subcanalização também possibilita à estação base (BS) alocar maior potência para subcanais designados à SS *indoor*, resultando em uma melhor cobertura dentro de ambientes construídos. Subcanalização no *uplink* proporciona uma economia da potência transmitida pelo SS, pois a potência é concentrada apenas nos subcanais designados para este determinado usuário. Este recurso de economia de potência é particularmente útil para equipamentos que utilizam bateria.

Como citado na subseção 1.3.1, as subportadoras que compõem um subcanal não precisam estar sequencialmente distribuídas. Em OFDMA existem dois modos de distribuir as subportadoras ao longo dos subcanais, sendo eles: permutação por diversidade (ou distribuída) e contínua (ou adjacente). A permutação por diversidade consiste em alocar as subportadoras pseudo aleatoriamente para formar os subcanais. Esta técnica provê diversidade em frequência. Por outro lado, a estimação do canal não é simples, uma vez que as subportadoras são distribuídas ao longo de toda a largura de banda disponível. A permutação contínua, por sua vez, agrupa um bloco de subportadoras contínuas para formar um subcanal. Nesta técnica, a estimação de canal é simplificada, pois as subportadoras são adjacentes e possuem alocação fixa. Em geral, a permutação por diversidade de subportadoras tem um bom desempenho em aplicações móveis e a permutação contínua de subportadora é mais eficiente em aplicações fixas, portáteis ou baixa mobilidade [61].

1.3.3.

Modulação adaptativa

A modulação adaptativa permite que a tecnologia WiMAX adapte a modulação utilizada de acordo com os requisitos de taxas de transmissão do usuário e a relação sinal ruído (SNR) presente no enlace de transmissão. Consiste em um compromisso entre capacidade e robustez e propicia um aumento médio de duas vezes na capacidade do sistema, quando comparado a sistemas não-adaptativos.

Os esquemas de modulação com alta eficiência espectral (maior quantidade de níveis de modulação) permitem altas taxas de transmissão de dados. Entretanto, são mais susceptíveis à interferência (menos robustos), por isso, são utilizados quando o enlace de rádio é de alta qualidade. Caso contrário, o sistema WiMAX utiliza esquemas de modulação com menor eficiência espectral que têm a capacidade de manter a qualidade da conexão e a estabilidade do link, devido a sua maior robustez. No primeiro caso, onde altas taxas são necessárias e as condições de propagação são favoráveis, são tipicamente utilizadas as modulações 16-QAM e 64-QAM. Por outro lado, são usualmente utilizados esquemas QPSK e BPSK em enlaces que possuem menor relação sinal-ruído. A Figura 1.7 [22] representa o diagrama simplificado do sistema de modulação adaptativa.

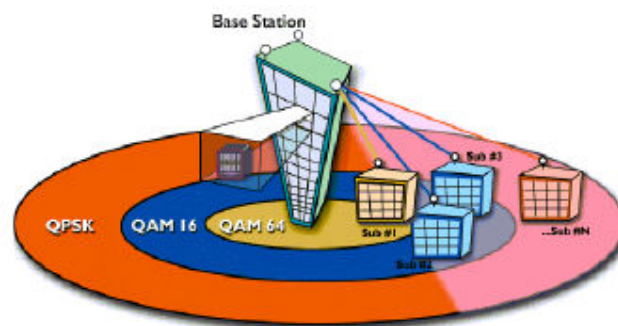


Figura 1.7: Modulação adaptativa.

1.3.4.

Arquitetura de rede

A arquitetura básica do WiMAX define os elementos Estação Base (BS – *Base Station*) e Estação do Usuário (SS – *Subscriber Station*). A SS permite acesso do usuário à rede, através do enlace intermediário com a Estação Base,

como pode ser visto na Figura 1.8 [35]. Pode ser oferecida ao usuário uma topologia ponto-multiponto ou ponto-a-ponto, variando de acordo com as necessidades do serviço a ser utilizado. O padrão IEEE 802.16 especifica a topologia Mesh como alternativa à topologia ponto-multiponto. Tal configuração permite que cada nó da rede, inclusive os terminais dos usuários, tenha a capacidade de roteamento, assim podendo expandir a cobertura da rede sem a necessidade do aumento proporcional das Estações Base (BS). Isto representa grande benefício, uma vez que o custo das Estações dos Usuários é inferior ao das Estações Base.

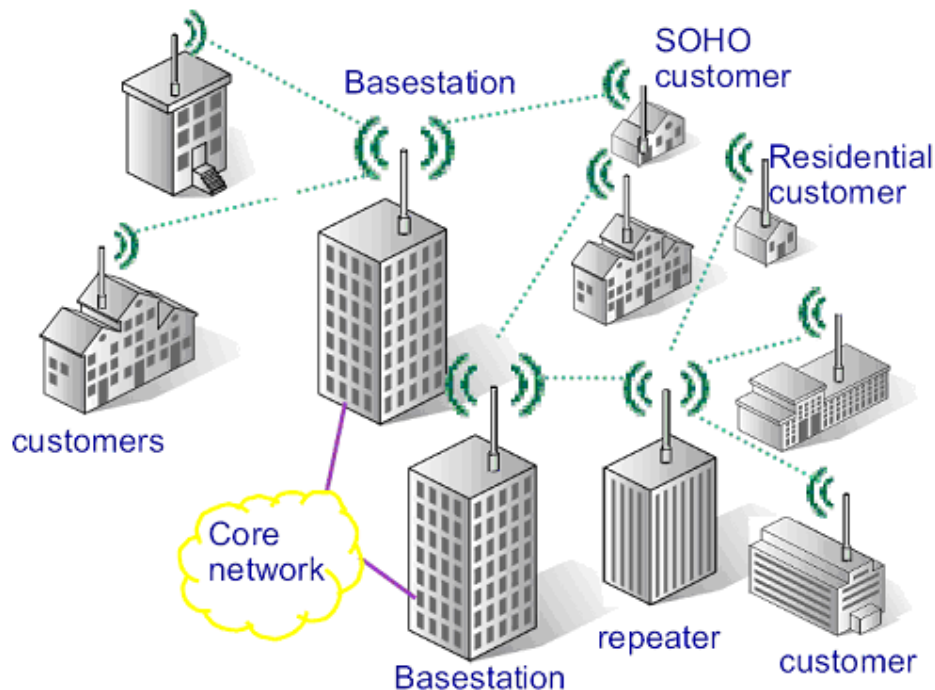


Figura 1.8: Arquitetura WiMAX 802.16-2004.

1.4. Tecnologias competitivas

Além do WiMAX, existem outras tecnologias que proveem serviços *wireless* de banda larga. Entre elas, podem ser citadas a terceira geração de sistemas celulares, e as redes WiFi. A tecnologia WiFi é baseada no padrão IEEE 802.11 e consiste em uma solução de redes locais sem fio (WLAN), já amplamente difundida. O padrão IEEE 802.11 suporta operações em bandas não licenciadas, além de cobertura na ordem de centenas de metros e com taxas de transmissão de até 54 Mbps. A vazão (*throughput*) dos sistemas WiMAX depende da largura de banda do canal utilizado, que pode variar entre

1,25 MHz a 20 MHz. Tal característica proporciona uma implementação flexível. Por outro lado, o sistema 3G (terceira geração) possui canal com largura de banda fixa. A Figura 1.9 [26] mostra a cobertura WiFi e WiMAX em determinada região. As tecnologias Wi-Fi e WiMAX possuem modulação OFDM, o que lhes proporciona altas taxas de pico. Já em sistemas CDMA, a necessidade do espalhamento de frequência dificulta altas taxas de pico. O WiMAX oferece maior vazão média (*average throughput*) e maior capacidade sistêmica.

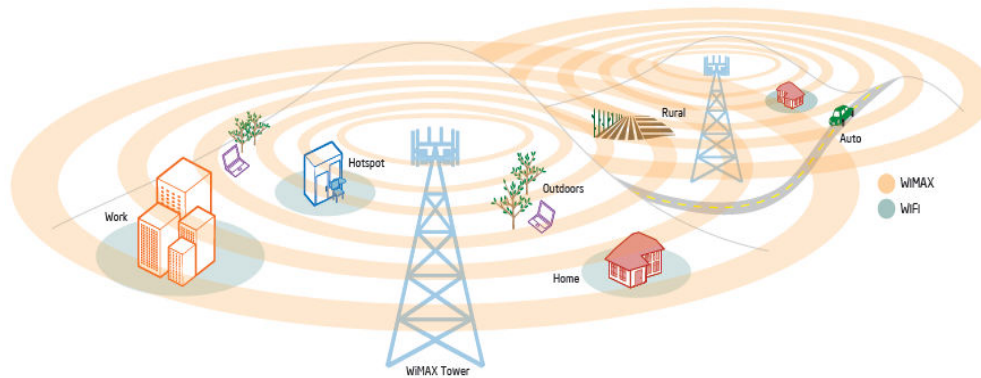


Figura 1.9: Cobertura WiFi e WiMAX.

Em termos de *roaming* e mobilidade em alta velocidade, os sistemas 3G possuem melhor desempenho que o WiMAX, uma vez que o primeiro foi desenvolvido com foco na mobilidade e, no caso do WiMAX, a mobilidade foi adaptada a ele.

O padrão WiMAX pode ser considerado com características intermediárias entre as tecnologias WiFi e 3G, quando comparadas a taxas de dados, cobertura, QoS, mobilidade e custo.

1.5.

OFDM – Multiplexação por Divisão de Frequências Ortogonais

Em muitas aplicações, são desejadas altas taxas de dados. Entretanto, à medida que a duração do símbolo diminui com o aumento da taxa de dados, os sistemas utilizando esquema de modulação com portadora única sofrem com maior interferência entre símbolos (ISI – *intersymbol interference*) causada pelo efeito dispersivo do canal sem fio, logo, necessitando de equalização mais complexa. Para que não haja ISI, o tempo do símbolo tem que ser maior que o espalhamento de retardos (*delay spread*) apresentado no canal de comunicação. À medida que o espalhamento de retardos passa a ser muito maior do que o tempo do símbolo (T_s), acarreta em maior interferência entre símbolos.

Sistemas que transmitem altas taxas de dados possuem espalhamento de retardos muito maior que o tempo do símbolo ($\sigma_r \gg T_s$), uma vez que é muito alto o número de *bits* enviados por segundo.

A técnica de transmissão OFDM divide todo o canal banda larga, com desvanecimento seletivo em frequência, em diversas subportadoras banda estreita, nas quais os dados são transmitidos em paralelo, sendo menos afetadas pela ISI, devido à longa duração do símbolo, e mantêm a taxa de dados total desejada. Utilizar sinais com banda mais estreita, em vez de um único sinal com banda mais larga, traz um grande benefício, no que diz respeito à seletividade em frequência. As subportadoras possuem largura da banda inferior à banda de coerência do canal. Logo, sofrem com os efeitos de desvanecimento relativamente plano. Isso elimina ou reduz, significativamente, a necessidade de equalização e permite que técnicas apropriadas para canais com característica de desvanecimento plano sejam aplicadas de forma direta a esses sinais OFDM [68].

A tecnologia OFDM surgiu como uma evolução da multiplexação por divisão de frequência (FDM – frequency division multiplexing), uma vez que, em vez de se utilizar bandas de guarda para a separação de subportadoras, utiliza-se sobreposição espectral das mesmas. A separação em frequência é definida de tal forma que uma subportadora não cause interferência nas outras, conforme ilustrado na Figura 1.10.

Esta sobreposição espectral particular produz uma economia significativa de banda, quando comparada com a técnica FDM tradicional. Pode-se obter uma economia de banda de, aproximadamente, 50%.

A técnica de múltiplas portadoras pode ser analisada tanto no domínio do tempo quanto da frequência. No domínio do tempo, a duração do símbolo em cada subportadora (T_{sub}) passa a ser o tempo do símbolo (T_s), em banda larga, multiplicado pelo número de subportadoras (L), ou seja, $T_{sub} = T_s \cdot L$. Percebe-se que quanto maior o número de subportadoras maior a probabilidade da duração do símbolo exceder o espalhamento de retardos (*delay spread*), sendo este um dos requisitos para que ocorra comunicação sem ISI. Por outro lado, no domínio da frequência, as subportadoras possuem largura de banda (B_{sub}) equivalente à largura de banda do sinal (B_s) dividido pelo número de subportadoras, logo, propiciando que a largura de banda do sinal seja menor do que a banda de coerência do canal, característica que assegura o

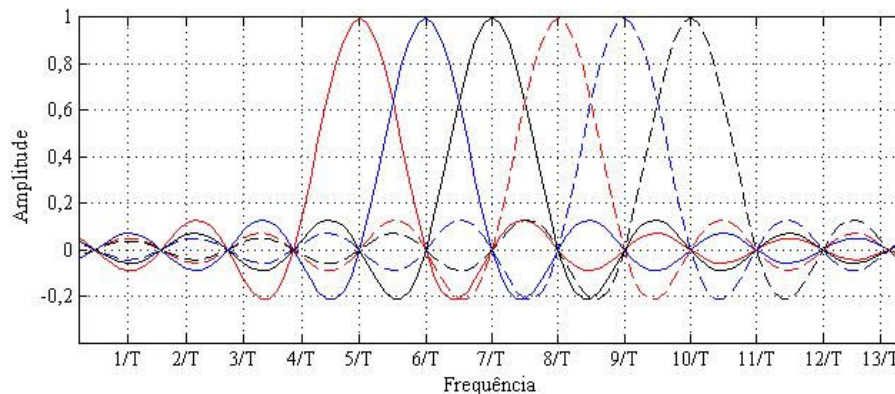
desvanecimento plano, condição equivalente em frequência para que não haja ISI na comunicação.

Em um sistema OFDM, o espaçamento entre subportadoras é cuidadosamente selecionado, de tal forma que cada subportadora seja alocada em pontos de cruzamento de zero do espectro das demais, conforme ilustrado na Figura 1.10(a).

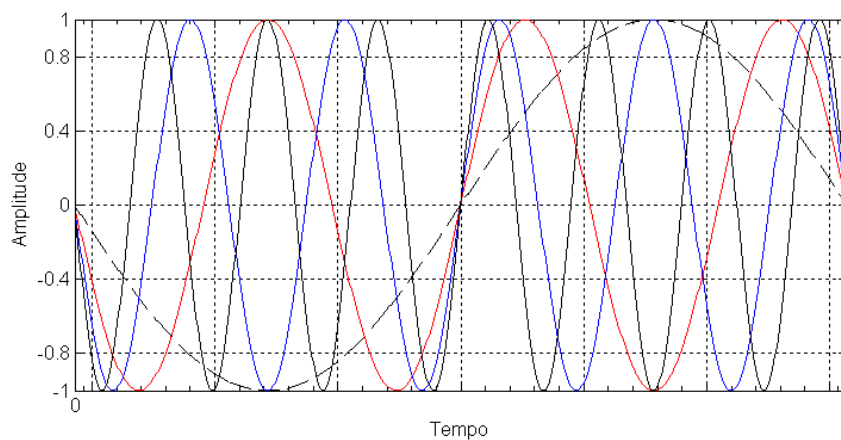
No domínio do tempo, Figura 1.10(b), a característica da ortogonalidade implica que duas portadoras quaisquer diferem exatamente por um número inteiro de ciclos durante um intervalo de símbolo OFDM, uma vez que estas estão sobrepostas com espaçamento em frequência dado por:

$$\Delta f = \frac{1}{T}$$

onde, T representa o período de duração de um símbolo OFDM.



(a)



(b)

Figura 1.10: Subportadoras de um sinal OFDM: (a) domínio da frequência; (b) domínio do tempo.

Sistemas que utilizam o método de transmissão OFDM são capazes de, eficientemente, superar interferência e desvanecimento seletivo em frequência

causado pelo multipercurso. O efeito da interferência entre símbolos (ISI - Intersymbol interference) é superado devido às subportadoras OFDM terem maior período de símbolo (redução na taxa de transmissão) do que as portadoras em sistema de única portadora. Esta característica do período do símbolo implica em uma diminuição da sensibilidade à seletividade em frequência (dispersão no tempo) causada pelo multipercurso. Além disso, a utilização de símbolos ciclicamente estendidos (tempo de guarda) torna a técnica OFDM ainda mais eficaz no combate a desvanecimentos dessa natureza.

A técnica de modulação OFDM permite que todas as subportadoras sejam transmitidas em paralelo, com a mesma amplitude e contendo a informação já modulada. Este sistema tem alguma restrição quanto à capacidade de mobilidade obtida, chegando no máximo à categoria de portátil. Porém, sua modulação e demodulação são mais simples e necessitam de menor capacidade de processamento, quando comparados à modulação OFDMA. Esta modulação permite que as subportadoras sejam divididas em grupos denominados de subcanais. A informação é dividida entre estes subcanais e é transmitida em posições diferentes, caracterizando o acesso múltiplo, como pode ser observado na Figura 1.5. Este sistema aumentou muito a capacidade de mobilidade obtida, chegando a alcançar a completa mobilidade. Mas, a modulação e a demodulação são mais complexas e exigem um grau maior de processamento.

Um modulador OFDM pode ser implementado por meio de uma transformada discreta de Fourier inversa (IDFT – *inverse discrete Fourier transform*) de N pontos, sendo aplicada em um bloco de informação de N símbolos, seguido de um conversor digital/analógico, atuando nas amostras da IDFT. Na prática, a IDFT pode ser implementada computacionalmente por meio da transformada rápida de Fourier inversa (IFFT – *inverse fast Fourier transform*). A IDFT do bloco de dados é dada por [68], Equação 1.1.

$$S_k = \sum_{k=0}^{N-1} s_k \exp\left\{\frac{j2\pi nk}{N}\right\}, \quad n = 0, 1, \dots, N-1 \quad \text{Equação 1.1}$$

onde:

S_k : sequência IDFT no domínio do tempo;

s_k : símbolo de dados escolhido de uma constelação;

N : quantidade de símbolos de informação.

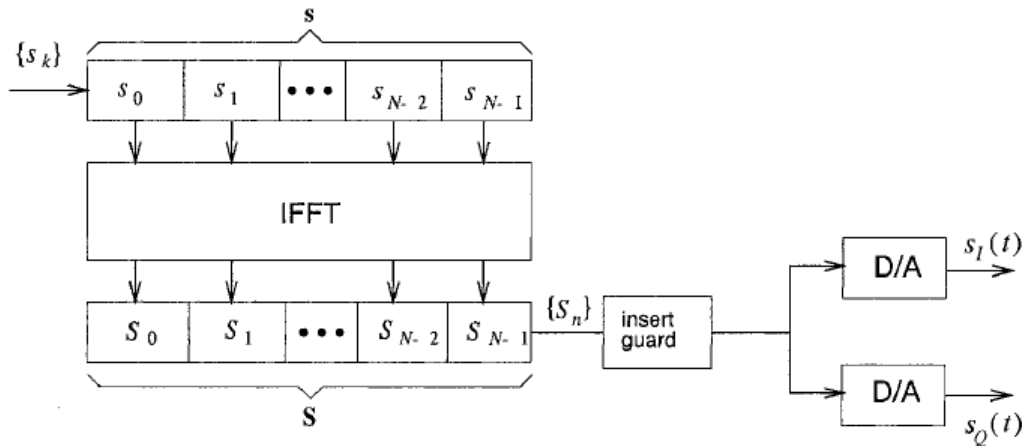


Figura 1.11: Diagrama de blocos de um modulador OFDM.

Cada bloco de N coeficientes da IFFT é, geralmente, precedido por um prefixo cíclico (CP – *cyclic prefix*), ou seja, um intervalo de guarda que tem o intuito de combater o espalhamento de retardos (*delay spread*) introduzido pelo canal sem fio, bem como manter a ortogonalidade entre as subportadoras. Existem três tipos de extensões cíclicas: sufixo cíclico; prefixo cíclico; prefixo e sufixo cíclico.

O CP é formado pelas últimas amostras (N_g) do símbolo OFDM que, por sua vez, são repetidas no início do bloco, como mostra a Figura 1.3. O número de amostras tem que ser calculado de tal forma que o comprimento do prefixo cíclico (T_g) tenha, no mínimo, a mesma duração dos atrasos causados pelos efeitos do canal. Com o acréscimo do CP a duração do símbolo OFDM (T_s) passa a ser a somatória da duração do tempo útil e do tempo de guarda, ou seja, $T_s = T_b + T_g$.

A extensão cíclica é um cabeçalho que consiste em símbolos redundantes, logo resulta em penalidades nos parâmetros potência e largura de banda. Por outro lado, a extensão cíclica é útil no receptor para a implementação da função de sincronismo nos domínios do tempo e da frequência, uma vez que esta extensão possui símbolos repetidos em um intervalo de amostragem conhecido.