

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROJETO DE GRADUAÇÃO**



WESLEY DA SILVA COSTA

**TRANSMISSÃO EXPERIMENTAL E ANÁLISE DE
DESEMPENHO DE UM SISTEMA MB-OFDM**

VITÓRIA – ES
JANEIRO / 2018

WESLEY DA SILVA COSTA

TRANSMISSÃO EXPERIMENTAL E ANÁLISE DE DESEMPENHO DE UM SISTEMA MB-OFDM

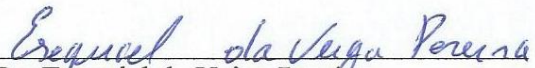
Parte manuscrita do Projeto de Graduação do aluno Wesley da Silva Costa, apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para aprovação na disciplina “ELE08553 – Projeto de Graduação 2”.



Prof. Dr. Jair Adriano Lima Silva
Orientador



Prof. Dr. Jorge Leonid Aching Samatelo
Examinador



Dr. Esequiel da Veiga Peretia
Examinador

AGRADECIMENTOS

Considerando que um trabalho como este não se faz sozinho, agradeço a todos que contribuíram para a conclusão do mesmo:

Agradeço à minha família: avós, avô, tios, mãe Maria e irmã Wanessa; eles que nas horas difíceis durante, para a conclusão deste curso me estenderam as mãos, ofereceram amparo e entenderam as minhas ausências nos churrascos, aniversários e reuniões familiares.

Agradeço ao meu orientador Jair Adriano Lima Silva que aceitou o desafio de me orientar e está fazendo da forma mais sábia possível. E que continuará pelos próximos dois anos!

Agradeço, novamente, ao professor Jair Adriano pela liberação da infraestrutura do NIDA para a realização de todos os testes para este trabalho.

Agradeço imensamente aos meus colegas de turma que apoiaram, facilitaram e foram companheiros na empreitada de “se tornar” engenheiro.

Demais agradecimentos vão para:

- minha equipe de professores do CEDTEC que esteve comigo desde o início do curso.
- os meus amigos Kissila Pinheiro e Ton Camilo pelos muitos momentos de diversão, insultos carinhosos, conselhos e conversas que motivam e desmotivam, mas que sempre me edificam. Valeu *bests!!!*
- Lucas, pelo incentivo, companhia, conselhos e por diversas vezes auxílio para o término deste projeto.
- os meus alunos que me ensinam bastante, inclusive sobre a vida.

A todos que, de alguma forma de expressar, ajudou construtivamente para a realização do meu Projeto de Graduação, muito obrigado gente e que venham os próximos trabalhos...

L'essentiel est invisible pour les yeux.
(Antoine de Saint-Exupéry)

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Setup B2B elétrico entre o MDO e o <i>Laptop</i>	14
Figura 2 – Resolução tempo frequência dos sistemas (a) uniportadora e (b) multiportadora	16
Figura 3 – Multiplexação (a) utilizando a multiplexação por divisão de frequências (FDM) sem sobreposição das subportadoras e (b) multiplexação por divisão de frequências ortogonais (OFDM).	17
Figura 4 – Espectro de subportadoras OFDM individuais	18
Figura 5 – Configuração de um transmissor OFDM	19
Figura 6 – Configuração de um receptor OFDM.....	20
Figura 7 – Espectro da técnica MB-OFDM. Sendo Δf o espaçamento entre as subportadoras e Δg a distância entre as bandas OFDM.....	24
Figura 8 – MB-OFDM em blocos destacando a transmissão e a recepção.	25
Figura 9 – Proposta da utilização da banda UWB disponibilizada pela FCC usando a técnica MB-OFDM.	25
Figura 10 – Esquemático do Magnitude do Vetor Erro (EVM)	27
Figura 11 – Sinal OFDM simulado em banda-base. O sinal transmitido no domínio no tempo e o espectro do sinal em banda-base (largura de banda de aproximadamente 16 MHz).....	29
Figura 12 – Constelação gerada a partir dos símbolos transmitidos e recebidos a partir da simulação. O EVM calculado foi de -310.6014 dB (2.9507e-14%), ou seja, ideal.....	30
Figura 13 – Constelação dos símbolos transmitidos, recebidos e recebidos e equalizados. ..	30
Figura 14 – Espectro do sinal MB-OFDM gerado	31
Figura 15 – Espectro do sinal MB-OFDM na recepção após a filtragem com Butterworth de ordem 10, ganho 0 dB e desvio de fase 0.	32
Figura 16 – BER em função do SNR para o sistema MB-OFDM com modulação 4QAM....	33
Figura 17 – BER em função do SNR para o sistema MB-OFDM com modulação 16QAM.	33
Figura 18 – BER em função do SNR para o sistema MB-OFDM com modulação 64QAM.	34
Figura 19 – BER em função do SNR para o sistema MB-OFDM com modulação 128QAM.....	34
Figura 20 – BER em função do SNR para o sistema MB-OFDM com modulação 256QAM.....	35
Figura 21 – EVM em função do SNR para o sistema MB-OFDM para 4QAM	35
Figura 22 – Sinal no domínio do tempo (amarelo) e espectro do sinal (vermelho) gerado pelo osciloscópio. Nele é possível ver várias cópias atenuadas do espectro do sinal.	37

Figura 23 – Zero-Order Hold aplicado no conversor digital analógico. No domínio da frequência o espectro do sinal é multiplicado por uma função sinc.	38
Figura 24 – Sincronização do sinal recebido; (a) representa o sinal enviado, (b) os 10 mil pontos adquiridos através do osciloscópio e (c) mostra a sincronização realizada.	39
Figura 25 – Alinhamento entre o sinal transmitido e recebido.....	39
Figura 26 – Diagrama de constelação dos símbolos recebidos (azul) e dos símbolos transmitidos (vermelho) da banda OFDM 1. Os símbolos recebidos se encontram com atraso de fase e ocasiona em erros na recepção.	40
Figura 27 – Diagrama de constelação para símbolos recebidos e equalizados (sem distorção em fase) e os símbolos transmitidos da Banda OFDM 1.....	41
Figura 28 – Aquisições realizadas pelos osciloscópios digitais: Modo Amostra (<i>Sample Mode</i>) em que os dados são adquiridos em máxima taxa de amostragem e decimados para a taxa de amostragem configurada no osciloscópio e o Modo HiRes (<i>High Resolution</i>) em que os sinais são filtrados e utilizando o algoritmo <i>boxcar</i> são decimados.	42
Figura 29 – EVM medido em função do ruído adicionado pelo AFG e do modo de aquisição da onda, modo amostra (baixa resolução de 8 bits) e HiRes com (11 bits) e os diagramas de constelação para o ruído do AFG setado para 20% para o modo Amostra (à esquerda) e HiRes (à direita).....	44
Figura 30 – EVM medido em função do ruído adicionado pelo AFG com modo de aquisição HiRes. Verifica-se um aumento considerável nos erros com o incremento de ruído. Abaixo são mostrados os diagramas de constelação para 0% de ruído e 80% de ruído.	45
Buscou-se verificar os efeitos adicionados ao sinal com o aumento do espaçamento entre as bandas OFDM, alterando desta forma a constante m de espaçamento entre as bandas mostrado no item 2.2 deste trabalho. A interferência inter-canal (ICI) tende a ser minimizada com o aumento de m como mostram os testes realizados ilustrados pela Figura 32.	
Figura 31 – Espectro do MB-OFDM para frequências próximas a 25 MHz. Nesta imagem fica clara o efeito passa-baixa do canal.	45
Figura 32 – EVM medido em função da constante de espaçamento entre as bandas OFDM. Abaixo são mostrados os diagramas de constelação para o espaçamento de Δf (à esquerda) e $60\Delta f$ (à direita); quanto maior o espaçamento melhor é o comportamento do diagrama de constelação.....	47
Figura 33 – EVM em função de M símbolos utilizados na modulação digital. Abaixo são mostradas as constelações para 16QAM e 256QAM; com o aumento do nível de modulação o sistema torna-se susceptível ao ruído causado pelo <i>setup</i> elétrico.	48

Figura 34 – EVM em função de M símbolos utilizados na modulação digital em duas distâncias entre bandas OFDM distintas.....	49
Figura 35 – Montagem realizada para comunicação B2B.....	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Parâmetros OFDM para Wi-Fi segundo a 802.11a	21
Tabela 2: Resolução vertical aprimorada devido ao HiRes em um osciloscópio de 5 GS / s	42

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ADC	<i>Analog-to-Digital Converter</i>
AFG	<i>Arbitrary Function Generator</i>
ASK	<i>Amplitude Shift Keying</i>
BER	<i>Bit Error Rate</i>
B2B	<i>Back-to-Back</i>
DAC	<i>Digital-to-Analog Converter</i>
EVM	<i>Error Vector Magnitude</i>
FCC	<i>Federal Communications Commission</i>
FDM	<i>Frequency-Division Multiplexing</i>
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i>
HPA	<i>High Power Amplifier</i>
ICI	<i>Inter-Channel Interference</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics</i>
ISI	<i>Inter-Symbol Interference</i>
IFFT	<i>Inverse Fast Fourier Transform</i>
LabTel	Laboratório de Telecomunicações
LaEEC	Laboratório de Aprendizagem e Ensino de Eletromagnetismo e Comunicação
MB-OFDM	<i>Multiband Orthogonal Frequency Multiplexing</i>
MCM	<i>Multi-Carrier Modulation</i>
MDO	<i>Mixed Domain Oscilloscope</i>
NIDA	Núcleo de Inovação, Pesquisa e Desenvolvimento Pró-África
OFDM	<i>Orthogonal Frequency-division Multiplexing</i>
PAPR	<i>Peak-to-Average Power Ratio</i>
PSD	<i>Power Spectrum Density</i>
PSK	<i>Phase Shift Keying</i>
QAM	<i>Quadrature Amplitude Modulation</i>
RF	Radiofrequência
SNR	<i>Signal to Noise Ratio</i>
UFES	Universidade Federal do Espírito Santo
UWB	<i>Ultra-wide Band</i>
WPAN	<i>Wireless Personal Area Network</i>
ZOH	<i>Zero-order hold</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
1.1	OBJETIVOS.....	11
1.1.1	Objetivos Gerais	11
1.1.2	Objetivos Específicos	12
1.2	PRINCIPAIS CONTRIBUIÇÕES	12
1.3	ESTRUTURA DO TEXTO.....	12
2	METODOLOGIA E ETAPAS DE DESENVOLVIMENTO	14
2.1	ETAPA 1 – Levantamento do Referencial Teórico	14
2.2	ETAPA 2 – Comunicação entre o MDO3012 e o MATLAB	14
2.3	ETAPA 3 – Simulações e Experimentos.....	15
2.4	ETAPA 4 – Análise dos Resultados.....	15
3	REFERENCIAL TEÓRICO	16
3.1	Introdução.....	16
3.2	Multiplexação por Divisão de Frequências Ortogonais (OFDM)	16
3.2.1	Concepção do Sistema OFDM	19
3.2.1.1	O Transmissor OFDM	19
3.2.1.2	O Receptor OFDM	19
3.2.2	Parâmetros de Projeto para Sistemas OFDM	20
3.2.3	Transmissão e Eficiência Espectral de Sistemas OFDM.....	23
3.3	MB-OFDM.....	24
3.4	Indicadores de Desempenho de Sistemas de Comunicação	26
3.4.1	Taxa de Erro de Bit (BER)	26
3.4.2	Erro de Magnitude do Vetor (EVM).....	26
4	ANÁLISE DOS RESULTADOS DE SIMULAÇÃO	29
5	ANÁLISE DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS	36
6	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....	50
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	51
	ANEXO A – INSTALAÇÃO DOS DRIVERS DO MDO3012 E MONTAGEM.....	54

1 INTRODUÇÃO

A tecnologia *Ultra Wideband* (UWB), é apresentada como uma candidata potencial devido à crescente demanda por altas taxas de dados e à necessidade de um sistema flexível, em curtas distâncias sem fio (BATRA, 2004). Em 2002, a Comissão Federal de Comunicações (FCC - em inglês *Federal Communications Commission*), órgão estadunidense de regulação em comunicações, dedicou a faixa de frequência de 3,1 a 10,6 GHz, do espectro eletromagnético, para sistemas UWB, que são aqueles que apresentam largura de faixa igual ou superior a 500 MHz, ou faixa de frequência fracionária superior a 20% (WYLIE-GREEN, RANTA e SALOKANNEL, 2005). De acordo com Zhang (2009) a FCC fixou um valor máximo de Densidade Espectral de Potência (PSD) para a faixa de frequências para o sistema UWB em de -41.3 dBm / MHz.

No Brasil, em junho de 2017 foi publicada a Resolução nº 680, que aprova o regulamento sobre equipamentos de radiação restrita e libera diversas faixas de frequência para uso sem a necessidade de licenciamento. As larguras de banda de frequência liberadas chegam a 1349,8 MHz (com faixa de frequência fracionária de 18%) e podem ser utilizadas desde que não gerem interferências acima do estipulado para sistemas licenciados (como o ISM - *Industrial, scientific and medical*) em outras faixas de frequência (ANATEL, 2017).

Inicialmente, as faixas UWB foram utilizadas para aplicação interna de redes de área pessoal sem fio WPAN (*Wireless Personal Area Network*). A abordagem de design tradicional para o sistema de comunicação UWB envolveu o uso de pulsos estreitos de domínio do tempo que ocupam um espectro muito amplo. Esta arquitetura apresenta como principal desvantagem o desafio de construir circuitos de radiofrequência (RF) e analógicos com grande largura de banda, conversores analógico-digitais de alta velocidade (ADCs) para processar estes pulsos cujos períodos são muito pequenos carecendo de uma complexidade digital significativa. Além disso essa proposta não é eficiente em ambientes com propagação multipercurso (BATRA, 2003).

Um sistema de comunicações capaz de lidar de forma efetiva com interferência entre símbolos e ser eficiente em ambientes dispersivos é a multiplexação ortogonal por divisão de frequência (OFDM), em que o espectro é dividido em várias bandas e estas são ocupadas através da modulação ortogonal realizada por um bloco IFFT na transmissão (Armstrong, 2009). Baseando-se nisso, Batra (2004) propôs uma outra alternativa para aumentar a eficiência espectral e atender às limitações citadas, baseada na combinação entre o sistema de

multiplexação por divisão de frequência ortogonal (OFDM) com múltiplas bandas (do inglês *multiband OFDM*) em que os pontos fortes do sistema multibanda pulsado podem ser mantidos enquanto, ainda, abordam a questão da robustez contra o multipercurso, insensibilidade às variações de atraso de grupo e a capacidade de lidar com interferências de banda estreita no receptor sem ter que sacrificar bandas ou taxa de dados.

A solução MB-OFDM é adotada como candidata adequada para aplicações WPAN, uma vez que atingir taxa de dados elevadas, alcançando em certos casos, velocidades de 480 Mbit/s (ECMA, 2005), sendo apresentada como uma abordagem multiportadora descrita pela proposta do *WiMedia* (BATRA et al., 2003), pois além de todas as vantagens citadas, ainda oferece solução de acesso múltiplo para os sistemas de comunicações UWB.

A desvantagem potencial desta abordagem MB-OFDM é que o transmissor é mais complexo devido à utilização da inversa da transformada de Fourier (IFFT) e uma relação de pico médio maior que um sistema baseado em pulsos (BATRA, BALAKRISHNAN e DABAK, 2004).

A proposta deste trabalho é, via simulação e experimentos, implementar a técnica de multiplexação por divisão de frequência ortogonal de multibanda (MB-OFDM), e investigar seu comportamento diante de variações nas parametrizações, tais como níveis de modulação, ruído, modo de aquisição do osciloscópio e espaçamento entre as bandas OFDM. Para os experimentos, foram desenvolvidos em MATLAB e os sinais OFDM foram multiplexados em frequência e transmitidos para o osciloscópio de domínio misto MDO3012 e recebidos pelo osciloscópio via comunicação serial. Para a validação do sistema é necessário analisá-lo de acordo com os indicadores de desempenho de sistemas de comunicação, como a magnitude do vetor erro (EVM) e a taxa de erro de bit (BER).

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivos Gerais

O presente trabalho visa compreender e implementar as modulações OFDM e MB-OFDM através de testes experimentais e simulações em equipamentos disponíveis no Laboratório de Eletromagnetismo e Comunicação (LaEEC) de forma a transmitir simultaneamente diversos sinais (*multiband*) e analisar os resultados obtidos na comunicação de acordo com os indicadores de desempenho de sistemas de comunicações (BER e EVM).

1.1.2 Objetivos Específicos

De maneira mais específica o presente trabalho pretende:

- Realizar a comunicação entre o osciloscópio MDO 3012 e o computador via MATLAB.
- Estudar a modulação multiportadora OFDM e o MB-OFDM.
- Estudar e aplicar as métricas de desempenho de sistemas OFDM, como o EVM e BER.
- Realizar a transmissão e recepção de sinais MB-OFDM pelo conjunto gerador de funções arbitrárias (AFG) e Osciloscópio (MDO 3012).
- Investigar o comportamento do sistema MB-OFDM com variações da distância das bandas, adição de ruídos e modulações digitais das bandas OFDM.

1.2 PRINCIPAIS CONTRIBUIÇÕES

O presente trabalho contribui com a comunicação realizada entre o computador e o osciloscópio para testes, aulas e experiências. Contribui, inclusive, como arcabouço teórico e experimental sobre MB-OFDM, podendo a técnica ser implementada em pesquisas realizadas pelo Laboratório de Telecomunicações (LabTel), como por exemplo, em comunicações Li-Fi (*Light Fidelity*), em que os dados são transmitidos via luz visível.

1.3 ESTRUTURA DO TEXTO

O texto do trabalho se divide da seguinte forma:

- Capítulo 2 – Metodologia e Etapas de Desenvolvimento. Neste capítulo serão abordados quais foram os procedimentos metodológicos para alcançar os objetivos estabelecidos para o projeto.
- Capítulo 3 – Referencial Teórico. Neste capítulo é realizada a revisão bibliográfica sobre os conceitos abordados no trabalho, a saber, OFDM, MB-OFDM e também os indicadores de desempenho de sistemas de comunicação.
- Capítulo 4 – Análise dos Resultados de Simulação. Após a abordagem teórica, são mostradas as simulações realizadas e as suas posteriores análises.
- Capítulo 5 – Análise dos Resultados Experimentais. A partir das análises das simulações prontas buscou-se montar o setup com o osciloscópio, realizar os

diversos testes de comunicação e, a seguir, fazer as análises do comportamento do sistema de comunicação desenvolvido, as quais são mostradas neste capítulo.

- Capítulo 6 – Conclusões e Trabalhos Futuros. Com todos os testes e simulações realizados e com as análises feitas, foi possível vislumbrar algumas conclusões, dificuldades encontradas, contribuições com a linha de pesquisa, bem como possibilidades de trabalhos futuros.

2 METODOLOGIA E ETAPAS DE DESENVOLVIMENTO

De forma a organizar a metodologia e simplificar as tarefas, o desenvolvimento do projeto é descrito em etapas, a seguir:

2.1 ETAPA 1 – Levantamento do Referencial Teórico

Nesta etapa foram desenvolvidas as pesquisas bibliográficas para início do projeto. As fontes de pesquisa primária para este trabalho foram artigos, livros e revistas obtidos nas bibliotecas do campus e ainda via acesso pela Universidade Federal do Espírito Santo ao acervo de artigos e recomendações da IEEE - *Institute of Electrical and Electronics Engineers*. A caráter de orientação, as fontes secundárias foram realizadas através de entrevistas / conversas com especialistas na área de Telecomunicações e pesquisadores em OFDM.

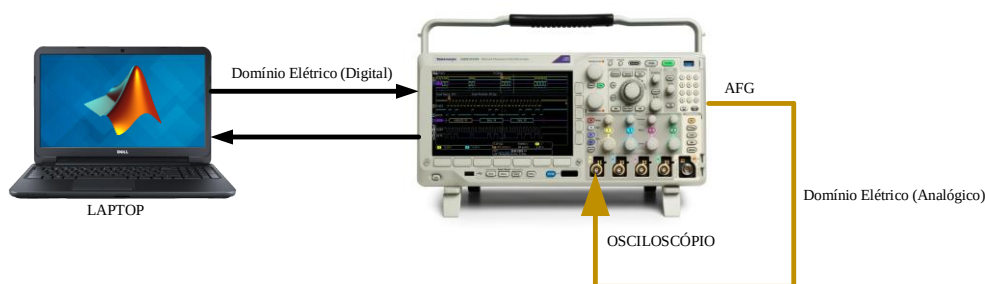
Buscou-se entender o funcionamento dos sinais OFDM, cada processo do sistema de comunicação, bem como os parâmetros de projeto e indicadores de desempenho de sistemas de comunicação (BER e EVM). Procurou-se, inclusive, compreender o sistema MB-OFDM.

2.2 ETAPA 2 – Comunicação entre o MDO3012 e o MATLAB

Neste momento do projeto, o foco foi na elaboração dos códigos para comunicação serial entre o MATLAB e o gerador de função arbitrária (AFG - *Arbitrary Function Generator*) já incluso no osciloscópio de modelo MDO 3012 da Tektronix® disponível no Laboratório de Eletromagnetismo e Comunicação (LAEEC) da UFES.

Em uma configuração *back-to-back* (B2B), como mostrada na Figura 1, em que o MDO3012 através do seu AFG gera sinais arbitrários (determinados via MATLAB) e faz a aquisição dos sinais transmitidos a partir do código desenvolvido pelo osciloscópio via comunicação serial. Alguns destes códigos já foram desenvolvidos pela equipe do LabTel - Laboratório de Telecomunicações e foram devidamente adaptados para este equipamento.

Figura 1 – Setup B2B elétrico entre o MDO e o Laptop



Os osciloscópios e conectores que foram utilizados para os experimentos do presente trabalho são materiais pertencentes ao LabTel. Todos os experimentos foram realizados no NIDA (Núcleo de Inovação, Pesquisa e Desenvolvimento Pró-África) sob permissão do Professor Dr. Jair Adriano Silva (orientador).

O Anexo A orienta em relação à instalação de *softwares*, *drivers* e a montagem realizada.

2.3 ETAPA 3 – Simulações e Experimentos

Nesta fase os sinais OFDM foram gerados seguindo parametrização próxima àquela padronizada para comunicação Wi-Fi (802.11a), levando-se em consideração as limitações dos equipamentos. O mesmo sinal foi modulado para banda base em três frequências distintas (f_{c1} , f_{c2} e f_{c3}). Foram escolhidas três bandas de forma a analisar o que acontece com as extremas e também com a do meio, qual sofre mais interferência e qual é mais sensível a ruídos.

De forma a validar os sinais gerados, foram executados (sem o *setup* citado) e os erros e o EVM foram desprezíveis, ideais, desta forma, confirmando que os sinais podem ser testados no AFG/osciloscópio.

Após a etapa de simulação os testes foram realizados juntamente com o *setup* citado na última etapa e foram levantadas curvas de EVM por ruído adicionado pelo AFG, modo de aquisição, quantidade de símbolos na constelação (M) e constante do espaçamento entre as bandas OFDM.

2.4 ETAPA 4 – Análise dos Resultados

Com as curvas da EVM geradas e todas as taxas de erro de bit computadas, esta fase do trabalho foi criada para a realização das análises, desenvolver o levantamento de hipóteses dos efeitos que o canal impunha ao sinal.

São abordados também as diversas limitações que o equipamento possui que impediram as parametrizações padrões, como o IEEE 802.11a (Wi-Fi).

Finalizados todos os testes e análises, é inexorável a descrição dos resultados na parte escrita do Projeto de Graduação.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

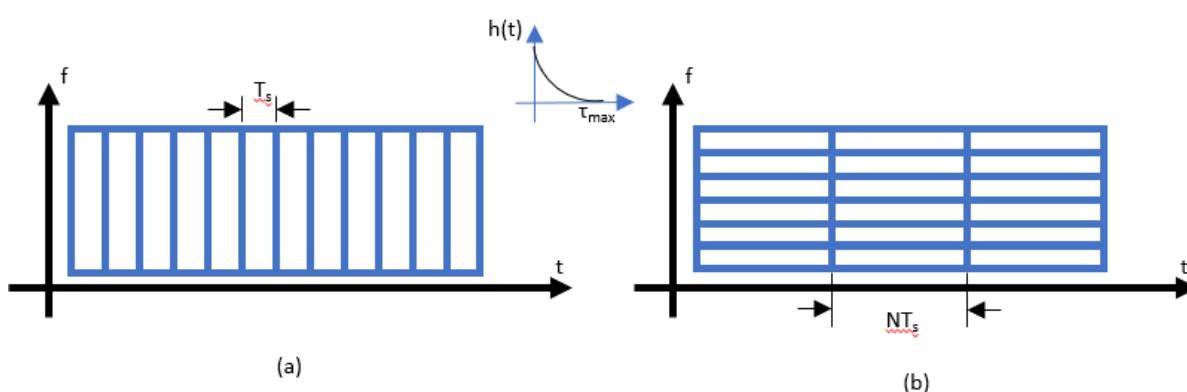
3.1 Introdução

Para o avanço do projeto se faz necessário o conhecimento acerca das tecnologias empregadas para então desenvolvê-lo. Neste sentido as seções abaixo tratam da multiplexação por divisão de frequências ortogonais, MB-OFDM e os indicadores de desempenho de sistemas de comunicação.

3.2 Multiplexação por Divisão de Frequências Ortogonais (OFDM)

A modulação uniportadora utiliza-se de uma faixa inteira de banda para pulsos pequenos no tempo. Alguns efeitos são perceptíveis quando o canal sofre com desvanecimento, em inglês *fading*, $h(t)$, já que apresentará várias cópias atrasadas no tempo decorrente do espalhamento multipercurso do canal, $\tau_{\max}$, e que interferirá com os próximos sinais a serem enviados, causando assim interferência entre os símbolos (ISI). Segundo Hara e Prasad (2003) a modulação multiportadora (MCM – *multi-carrier modulation*) baseia-se na subdivisão do espectro do sinal, com isso haverá no tempo sinais mais largos (N vezes) de forma que seja maior que o espalhamento citado e a taxa de transmissão de dados não será afetada já que teremos vários símbolos processados paralelamente. A relação uni e multiportadora é enfatizada a partir da Figura 2.

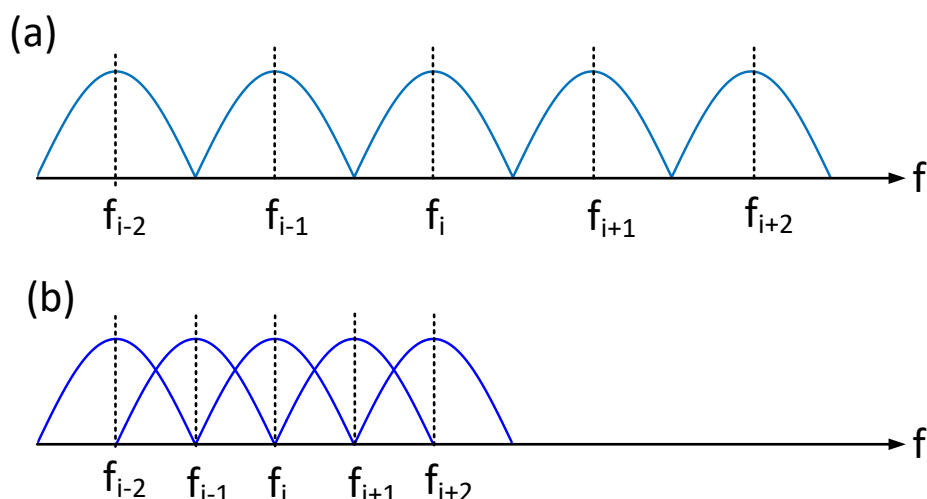
Figura 2 – Resolução tempo frequência dos sistemas (a) uniportadora e (b) multiportadora



A multiplexação OFDM é uma técnica de transmissão paralela de dados que possui um grande número de subportadoras divididas pela largura de banda disponível. A separação entre as subportadoras é mínima, o que faz com que a eficiência espectral seja maior e, desta forma, usa menos largura de banda do que modulações tradicionais para transmitir em taxas iguais. Na Figura 3 no item (a) é mostrada a técnica convencional de multiplexação no domínio da

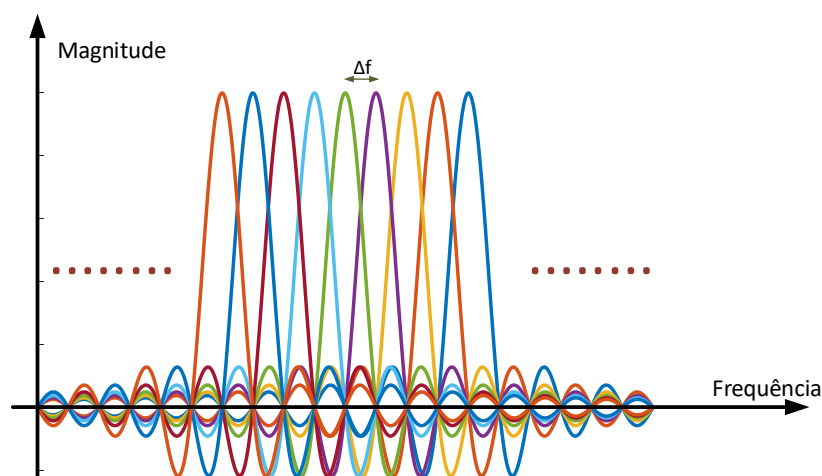
frequência (FDM – *Frequency-Division Multiplexing*) em que os subcanais não são sobrepostos e em (b) ilustra como a técnica OFDM é implementada no domínio da frequência, com sobreposição entre os subcanais. Entre as duas imagens mostradas é possível verificar que com a técnica de modulação multiportadora sobreposta temos quase 50% de economia da largura de banda do que se fosse utilizada uma técnica com a não-sobreposição.

Figura 3 – Multiplexação (a) utilizando a multiplexação por divisão de frequências (FDM) sem sobreposição das subportadoras e (b) multiplexação por divisão de frequências ortogonais (OFDM).



De acordo com Nee e Prasad (2010), para obter grande eficiência espectral é necessária a sobreposição das formas de ondas dos subcanais, mas para isso os subcanais devem ser ortogonais. A ortogonalidade é propriedade que garante que os sinais transmitidos sejam detectados sem interferência inter-canal (ICI) e consequentemente a perda de informação. Como pode ser verificado no espectro genérico de um sinal OFDM (Figura 4) os picos de uma subportadora coincidem com os *nulls* de outras subportadoras, logo não há interferência entre subportadoras no pico daquela desejada.

Figura 4 – Espectro de subportadoras OFDM individuais



Segundo Nee (2000), a técnica OFDM se mostra robusta contra canais que apresentam características de multipercurso, como em comunicações *Wireless*. Multipercurso apresenta dois efeitos: o desvanecimento seletivo de frequência (em inglês *frequency selective fading*), em que cada componente de frequência possui uma atenuação diferente e a interferência intersimbólica (ISI) em que componentes do sinal enviado, no domínio do tempo, interferem nos próximos sinais recebidos e que é facilmente resolvido com a adição de intervalos de guarda entre os sinais enviados. É interessante salientar que em um sistema de única portadora (*single carrier*) com desvanecimento ou interferência, o *link*, ou seja aquele sub-canal, será totalmente perdido, enquanto que com um sistema multiportadora somente parte do *link* é perdido, podendo ser ainda corrigido por códigos de correção de erros.

Osama (2013) enfatiza que devido aos benefícios citados, esta multiplexação é utilizada para altas taxas de comunicação, tendo sido empregada em vários padrões *wireless*, como *Digital Video Broadcasting* (DVB) e *Digital Subscriber Lines* (XDSL), *Wireless Local Area Networks* (WLAN), *Worldwide Interoperability for Microwave Access* (WiMAX), *Long Term Evolution* (LTE), também conhecida como tecnologia de quarta geração (4G).

Como desvantagem da utilização da técnica OFDM, Hu et al. (2014) citam a relação entre a potência de pico e a potência média (PAPR) que o sinal pode atingir, já que grandes valores de PAPR em sistemas OFDM necessitam de amplificadores de Alta Amplitude de Potência (HPA – *High Power Amplitude*) com níveis dinâmicos, o que tornaria o sistema oneroso. Outra desvantagem notável do sistema OFDM é a sensibilidade para erros de frequência tais como offsets ou ruídos de frequência (POLLET, BLADEL e MOENECLAHEY, 1995).

3.2.1 Concepção do Sistema OFDM

O sistema de multiportadora ortogonais pode ser dividido entre o transmissor e o receptor OFDM, como são mostrados nos subitens seguintes.

3.2.1.1 O Transmissor OFDM

O diagrama de blocos da Figura 5 ilustra o processo de transmissão OFDM. O transmissor OFDM inicia-se com a conversão série-paralela da sequência de dados a ser enviada para que assim N_s (número de subportadoras OFDM de dados) símbolos possam ser processados paralelamente. Após este processo os dados são modulados (ou mapeados) em $M = 2^{m_b}$ pontos no diagrama de constelação, onde m_b é a quantidade de bits que representa o símbolo. A modulação digital a ser utilizada pode ser PSK (*Phase Shift Keying*), ASK (*Amplitude Shift Keying*) ou QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*).

Os sub-símbolos mapeados são adicionados na entrada da IFFT da Inversa da Transformada Rápida de Fourier (*Inverse Fast Fourier Transform –IFFT*) de N_{FFT} entradas e saídas. Esta etapa tem a função de modular e multiplexar os sinais de entrada através de sua propriedade de subportadoras garantindo a ortogonalidade entre elas (ARMSTRONG, 2009). As entradas da IFFT que não possuem dados ora podem ser usadas como piloto para posterior equalização ou simplesmente anuladas (*zero-padding*).

Após a modulação utilizando a IFFT é adicionado a cada sinal o prefixo cíclico, que nada mais é do que a cópia de N_{cp} pontos do final do símbolo OFDM no início do mesmo, o que combate o espalhamento multipercurso do canal.

Em seguida, o sinal é convertido de paralelo, modulado para a banda passante, reamostrado e, finalmente, transmitido para o canal.

Figura 5 – Configuração de um transmissor OFDM



3.2.1.2 O Receptor OFDM

A Figura 6 mostra a configuração da recepção do sistema multiportadora organizada em blocos. A recepção inicia-se pela captura do sinal que pode ser feita por meio de antenas

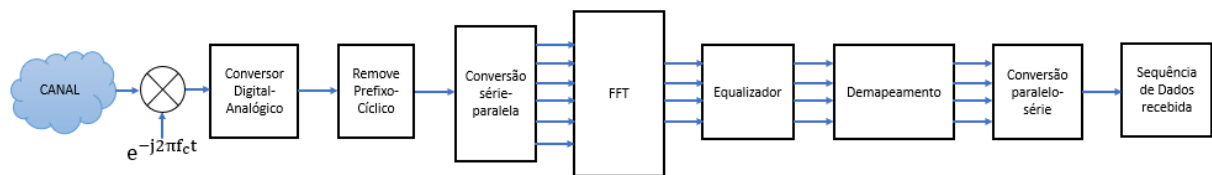
(domínio RF) ou fotodetector (meio óptico). O sinal recebido é demodulado para a banda base e processado pelo conversor ADC (*Analog to Digital Converter*) que o amostrará e quantizará.

O prefixo cíclico adicionado no início de cada símbolo OFDM na transmissão é removido e então a sequência de símbolos OFDM é convertida para serem processados paralelamente.

Os sinais são demodulados via FFT e os sub-símbolos passam por um equalizador, que tem a função de corrigir os efeitos de distorção que o canal possa adicionar ao sinal. Para isso são utilizados os pilotos adicionados na transmissão. O equalizador mais simples e mais utilizado é o equalizador de um *tap*, ou seja, um equalizador para cada subportadora com único coeficiente cada, que analisa os efeitos de fase e amplitude do canal e os corrige de acordo com a quantidade de dados recebidos e a mutabilidade do canal.

Imediatamente após a equalização, ocorre a demodulação digital em que os símbolos são convertidos em dados os quais são convertidos em uma sequência de dados através da conversão série-paralela.

Figura 6 – Configuração de um receptor OFDM



3.2.2 Parâmetros de Projeto para Sistemas OFDM

Os parâmetros de um sistema OFDM devem seguir alguns critérios de forma a obter maior eficiência. Com o valor da taxa de transmissão (R_b) desejado, a largura de banda disponível, o atraso característico do canal com multipercurso e a modulação por subportadora escolhida na comunicação, um sistema OFDM pode ser projetado.

De acordo com Wamicha e Winberg (2011) considerando que o espalhamento multipercurso (τ_{max}) deve ser combatido pelo sistema OFDM a partir da inserção, ao sinal útil, o intervalo de guarda (IG), ou prefixo cíclico, e que deve obedecer à relação da expressão 1, para que não ocorra interferência inter-canal dos dados na recepção e, por consequência, indesejáveis erros.

$$T_g = (2 \sim 4) \tau_{max} \quad (1)$$

Recomenda-se que a duração do símbolo OFDM seja no mínimo o quádruplo do IG, como mostrado na Expressão 2.

$$T_{\text{Símbolo}} \geq 5T_g \quad (2)$$

De acordo com a Equação 3, a duração útil do símbolo OFDM pode ser definida como a diferença entre o intervalo de tempo de um símbolo com o período do IG adicionado.

$$T_u = T_s - T_g \quad (3)$$

O espaçamento entre subportadoras é determinado pelo inverso do intervalo de tempo útil do sinal, como definido na Equação 4.

$$\Delta_f = \frac{1}{T_u}, \quad (4)$$

e a quantidade de Subportadoras pode ser definida a partir da largura de banda disponível (B) e o espaçamento entre as subportadoras, e deve ser uma potência de 2, como decorre a propriedade da transformada rápida de Fourier (FFT), como na Equação (5).

$$N = \frac{B}{\Delta_f} \quad (5)$$

Desta forma a quantidade de dados (em bits) que poderá ser processada paralelamente é dada por:

$$Seq = N * \log_2 M \quad (6)$$

Como exemplo do projeto, é possível verificar que o projeto do Wi-Fi segundo o padrão 802.11a seguem as recomendações de parâmetros mostrados acima.

Tabela 1: Parâmetros OFDM para Wi-Fi segundo a 802.11a

Parâmetro	Valor
Taxa de Transmissão (R_b)	6-54 Mbits/s
Tamanho da IFFT/FFT (N_{FFT})	64 pontos
Subportadoras de Dados (N_s)	48
Modulação por Subportadora (M)	BPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM
Fração do Prefixo Cíclico ($G = N_{\text{CP}}/N_{\text{FFT}}$)	1/4

Largura de Banda (B_w)	20 MHz
Espaçamento entre Subportadoras ($\Delta f = \frac{B_w}{N_{FFT}}$)	312,5 kHz (20 MHz/64)
Duração de dados do Símbolo (T_{FFT})	3,2 μ s
Duração do Prefixo Cíclico (T_{GI})	0,8 μ s
Duração Total do Símbolo T_s	4 μ s ($T_{GI} + T_{FFT}$)
Frequência Central $f_c = \frac{B_w}{2}$	~2,4 GHz ou ~5 GHz

3.2.3 Transmissão e Eficiência Espectral de Sistemas OFDM

O período de um símbolo OFDM é dado por

$$T_{\text{símbolo}} = T_{\text{FFT}} + T_{\text{GI}}, \quad (7)$$

em que $T_{\text{útil}}$ é o intervalo de tempo do sinal e T_{CP} é o prefixo cíclico adicionado.

Considerando que

$$T_{\text{FFT}} = \frac{1}{\Delta_f}, \quad (8)$$

sendo $\Delta_f = \frac{B}{N_{\text{FFT}}}$ a distância entre as subportadoras OFDM, e que

$$T_{\text{GI}} = GT_{\text{FFT}}, \quad (9)$$

ou seja, a quantidade de amostras de prefixo cíclico é uma fração G de $T_{\text{útil}}$. Então o $T_{\text{símbolo}}$ pode ser representado como

$$T_{\text{símbolo}} = \frac{N_{\text{FFT}} (1+G)}{B}. \quad (10)$$

Tendo em vista que cada subportadora carrega $\log_2 M$ bits então um sistema OFDM com N_s subportadora de dados transportará $N_s \log_2 M$ bits. Desta maneira a taxa de transmissão de dados de um sistema OFDM é determinado pela razão de dados transmitidos pelo tempo de um símbolo como mostrado na Equação 11.

$$R_b = \frac{B * N_s * \log_2 M}{N_{\text{FFT}} * \left(1 + \frac{N_{\text{CP}}}{N_{\text{FFT}}}\right)} \quad (11)$$

Ou seja, com o aumento de pontos na constelação no mapeamento (M), cada subportadora OFDM transportará mais dados e desta forma aumentará a taxa de transmissão. Este aumento também ocorre com larguras de bandas e relação N_s/N_{FFT} maiores ou um decréscimo na relação $N_{\text{CP}}/N_{\text{FFT}}$.

A partir da taxa de transmissão de dados é possível determinar a eficiência espectral do sinal, também conhecida como eficiência de largura de banda, que se refere à medida de quantidade de informação que pode ser transmitida através de uma dada largura de banda por um específico sistema de comunicação (ZHANG et. Al, 2008). Desta forma a eficiência espectral (η) é calculada, em bit/s/Hz, por meio da expressão (12), onde B_w é a banda efetiva utilizada pelo sistema.

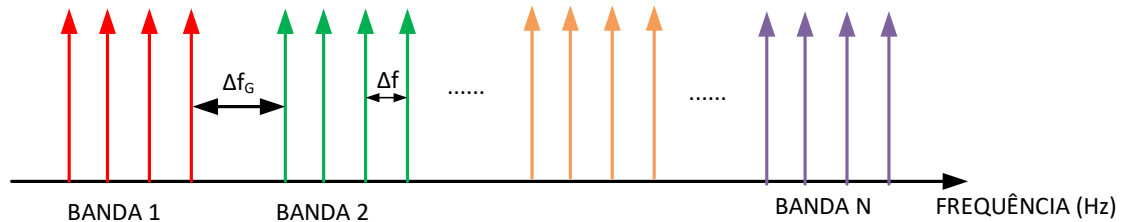
$$\eta = \frac{R_b}{B_w} \quad (12)$$

Como discutido anteriormente o sistema OFDM tem como uma de suas diversas vantagens uma eficiência espectral superior aos sistemas com portadora única e isto pode ser matematicamente provado pelas expressões (11) e (12), já que para se obter a mesma taxa de transmissão de dados temos uma largura de banda reduzida.

3.3 MB-OFDM

Nikookar e Prasad (2009) afirmam que a técnica MB-OFDM divide o espectro de frequência UWB em múltiplas bandas não sobrepostas e cada uma destas possui a modulação multiportadora OFDM, como pode ser visto na Figura 7. O espaçamento entre as subportadoras OFDM é dado por Δf enquanto que o espaçamento entre as bandas é dado por Δf_g .

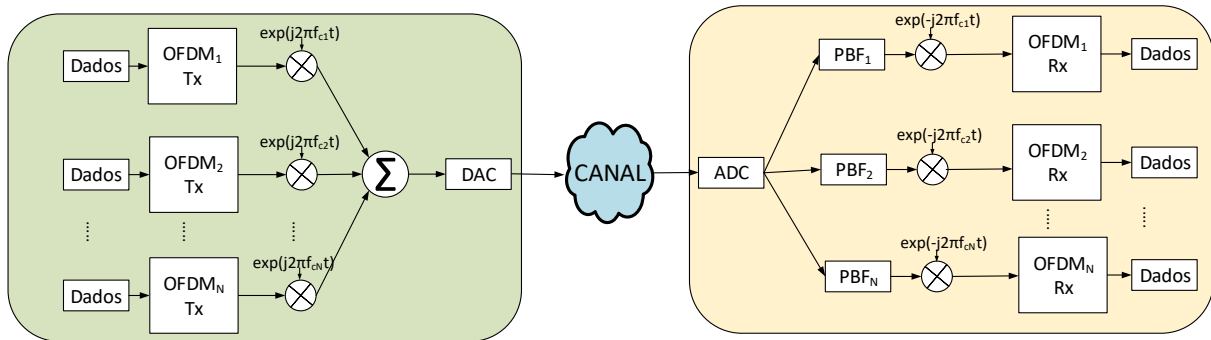
Figura 7 – Espectro da técnica MB-OFDM. Sendo Δf o espaçamento entre as subportadoras e Δf_g a distância entre as bandas OFDM.



A abordagem utilizada neste trabalho é a mostrada por Kumar (2011) ao se tratar de OBM-OFDM, uma vertente do MB-OFDM, em que $\Delta f_g = m\Delta f$, ou seja, o espaçamento entre as bandas OFDM é o produto de uma constante (m) inteira com o espaçamento entre as subportadoras OFDM. Isto se deve ao fato de que é mantida a ortogonalidade entre as bandas OFDM. Desta forma, garantindo a ortogonalidade entre as bandas OFDM faz com que uma seja uma extensão de outra e, desta maneira, aumenta a capacidade do canal (i.e eficiência do canal), diminuindo interferências e assegurando “alta flexibilidade espectral para o sistema e resiliência a interferências RF e multipercurso” (RENISHA; RENISHA, 2014, traduzido pelo autor).

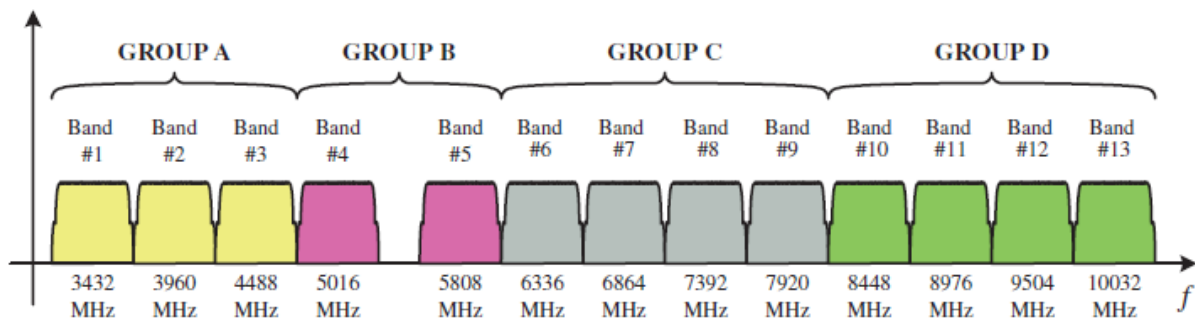
O sistema MB-OFDM pode ser representado em blocos como mostrado na Figura 8. Na transmissão são gerados os sinais OFDM, modulados para banda passante, multiplexados e então transmitidos ao canal. Na recepção os sinais recebidos são filtrados através de um filtro passa-faixa (*pass-band filter* - PBF) de forma a eliminar todas as componentes de frequência indesejadas, outras bandas e ruídos de mais alta frequência, então o sinal é demodulado para banda-base, passa pela recepção OFDM, de forma a ser convertido em dados recebidos.

Figura 8 – MB-OFDM em blocos destacando a transmissão e a recepção.



Como aplicação, a proposta do MB-OFDM para WPAN é dividir a faixa de frequência UWB, que nos EUA variam de 3,1 a 10,6 GHz (7500MHz), conforme Figura 9, em 14 bandas com 528 MHz cada (NIKOOKAR e PRASAD, 2009). Desta forma, o sistema MB-OFDM trabalharia até 480 Mbps (em 2 metros), esperando-se BER de 10^{-5} (NIKOOKAR; PRASAD, 2009). Esta abordagem, entretanto, é inaplicável no Brasil, já que o máximo de banda disponível para aplicações UWB é 1349,8 MHz (ANATEL, 2017).

Figura 9 – Proposta da utilização da banda UWB disponibilizada pela FCC usando a técnica MB-OFDM.



Fonte: Nikookar e Prasad (2009)

Nikookar e Prasad (2009) pontua que a captura energia de multipercurso com um único sinal RF, insensibilidade a atraso de grupo, habilidade de lidar com interferência de bandas estreitas e arquiteturas simples são vantagens do sistema MB-OFDM e que a complexidade devido a IFFT no processo, alto PAPR (*peak-to-average-power rate*) e problemas de sincronização OFDM são pontos fracos.

3.4 Indicadores de Desempenho de Sistemas de Comunicação

3.4.1 Taxa de Erro de Bit (BER)

Em transmissões analógicas, o parâmetro de qualidade de transmissão e recepção de dados é a relação sinal-ruído (SNR) enquanto que em comunicações digitais a qualidade da transmissão de dados é expressa em termos da taxa de erro de bits (BER). A BER é a relação entre a quantidade de erros de bits ocorridos em uma transmissão e a quantidade de bits transmitidos (Gupta, 2014).

De acordo com Shafik (2006) a relação de potência de sinal e potência de ruído (SNR) pode ser definida como sendo

$$SNR = \frac{\text{Potência do Sinal}}{\text{Potência do Ruído}} = \left[\frac{\frac{1}{T} \sum_{t=1}^T [I_t^2 + Q_t^2]}{\frac{1}{T} \sum_{t=1}^T [|n_{I,t}|^2 + |n_{Q,t}|^2]} \right], \quad (13)$$

em que I_t e Q_t são as componentes em fase e em quadratura do sinal com modulação digital de M símbolos e $n_{I,t}$ e $n_{Q,t}$ são as componentes em fase e em quadratura do ruído complexo considerado.

Desta forma a taxa de erros de bits pode ser predita através da probabilidade do erro considerando uma modulação M-QAM de sequência de bits codificados com código de Gray através da Equação 14.

$$P_b = \frac{2 \left(1 - \frac{1}{\sqrt{M}} \right)}{\log_2(M)} * \text{erfc} \left(\sqrt{\frac{3SNR}{2M-2}} \right) \quad (14)$$

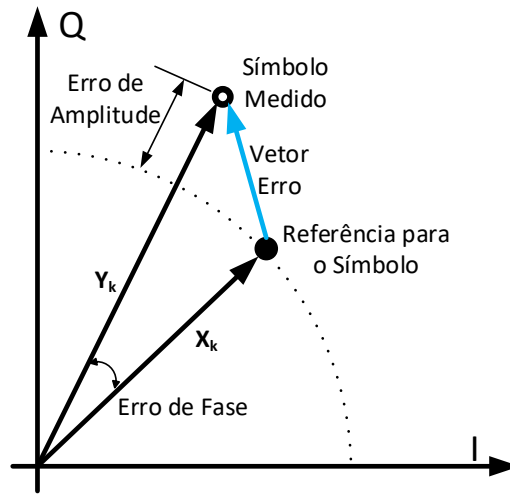
Onde, $\text{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^\infty e^{-y^2} dt$ é a função erro complementar.

Através deste equacionamento é esperado que para canais cujo SNR seja baixo a taxa de erro de bits seja elevada, enquanto que para índices de modulação baixos a probabilidade de erro de bit diminui em relação a valores maiores de M .

3.4.2 Erro de Magnitude do Vetor (EVM)

Outra maneira de analisar a performance de um sistema de comunicação de dados é a métrica de Erro de Magnitude do Vetor (EVM). Segundo Golio (2008), o EVM é a medição que quantifica a performance de uma transmissão de rádio tendo como referência o sinal ideal transmitido. O sinal enviado pelo transmissor deve se localizar precisamente nos locais de magnitude e fase do diagrama de constelação I-Q, ilustrado na Figura 10.

Figura 10 – Esquemático do Magnitude do Vetor Erro (EVM)



O sinal ao percorrer o canal sofre distorções no diagrama de constelação e a forma de quantificar a diferença do valor ideal transmitido e o recebido é calculando a potência do vetor erro. Através desta métrica qualquer desvio no diagrama de constelação provocado por ruído ou distorção linear ou não, inerentes aos sistemas de telecomunicações, cria uma distância escalar entre os referidos fasores cuja magnitude de erro $D_k = |Y_k| - |X_k|$ e o erro de fase $\phi_k = \angle Y_k - \angle X_k$ são perfeitamente mensuráveis pela métrica EVM. Para determinar o valor em RMS do EVM basta calcular a magnitude da potência do vetor erro pela potência do sinal enviado como mostrado na Equação 15, em que N representa a quantidade de símbolos transmitidos/recebidos e que $X_k = X_I + jX_Q$ e $Y_k = Y_I + jY_Q$ os símbolos complexos ideais transmitidos e recebidos, respectivamente.

$$EVM_{RMS} = \sqrt{\frac{\frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} |Y_k - X_k|^2}{\frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} |X_k|^2}} \quad (15)$$

De acordo com Zhao (2006), de forma a simplificar a equação 15, pode-se utilizar a Equação 16, em que X_{max} é o máximo valor de amplitude de X_k . O ganho da simplificação é a menor utilização de recurso computacional no cálculo do EVM.

$$EVM_{RMS} = \sqrt{\frac{\frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} |D_k|^2}{X_{max}^2}} \quad (16)$$

O erro de magnitude do vetor é geralmente representado em porcentagem e determinado através da Equação 17.

$$\text{EVM (\%)} = 100 * \text{EVM}_{\text{RMS}} \quad (17)$$

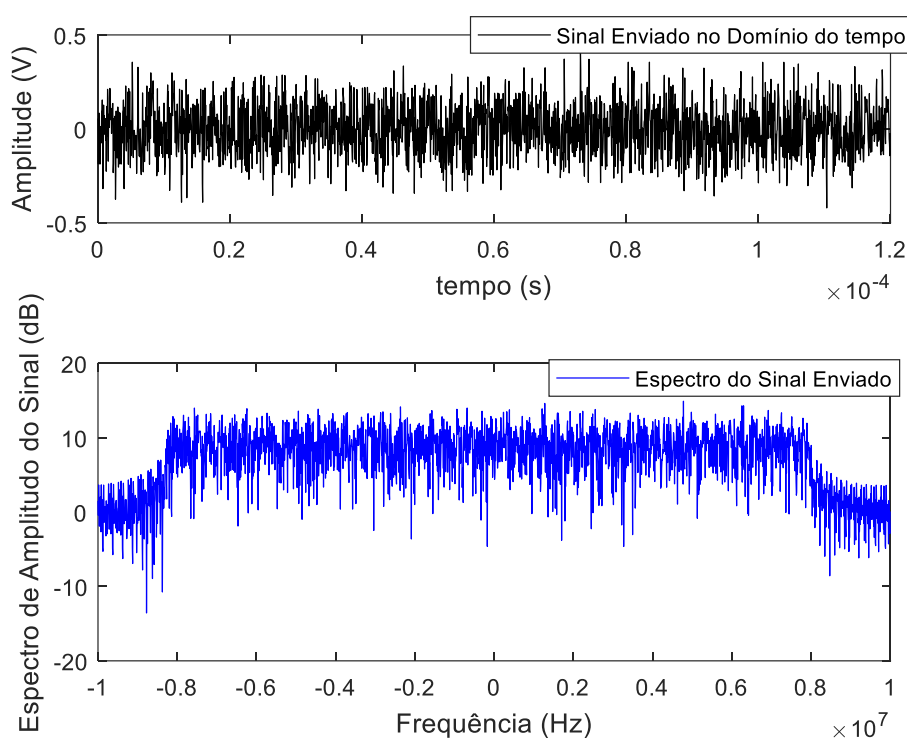
A métrica também pode ser representada na escala decibéis e pode ser determinada de acordo com a Equação 18.

$$\text{EVM (dB)} = 20\log_{10}(\text{EVM}_{\text{RMS}}) \quad (18)$$

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

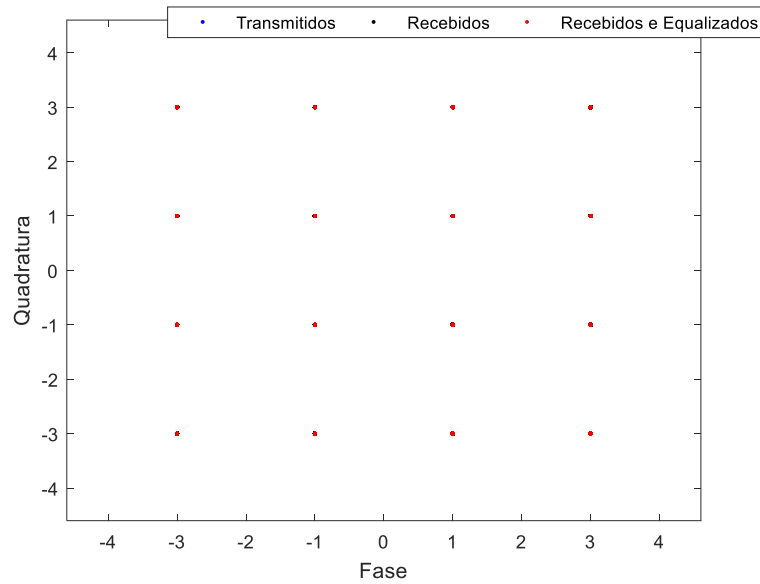
Para a geração dos sinais OFDM foi tomado como padrão de projeto a parametrização do sistema Wi-Fi mostrado na Tabela 1. Foram utilizadas 48 subportadoras de sinais e as demais nulas, e um bloco IFFT/FFT de 64 entradas e saídas. Na Figura 11 é ilustrado o sinal no domínio do tempo e no domínio da frequência.

Figura 11 – Sinal OFDM simulado em banda-base. O sinal transmitido no domínio no tempo e o espectro do sinal em banda-base (largura de banda de aproximadamente 16 MHz).



O erro obtido, em *back-to-back*, no MATLAB, com 1000 *frames* foi zero, desta forma a BER foi nula e a EVM do sinal gerado foi de -310.6014 dB (2.9507e-14%) que denota um sistema de comunicação ideal, os símbolos recebidos são extremamente similares aos transmitidos, validando assim o *script* do sinal OFDM gerado. A Figura 12 mostra o Diagrama de Constelação do sinal OFDM gerado com canal sem ruídos.

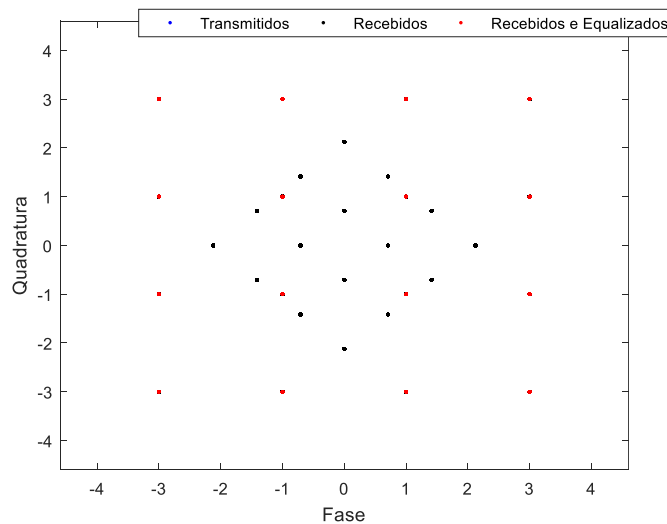
Figura 12 – Constelação gerada a partir dos símbolos transmitidos e recebidos a partir da simulação. O EVM calculado foi de -310.6014 dB (2.9507e-14%), ou seja, ideal.



Para simular a presença de não-linearidades no canal de comunicação foi convoluído o sinal gerado com $h = 0,5e^{-i45^\circ} = 0.3536 + 0.3536i$, com o objetivo de atenuar o sinal em metade de sua amplitude e atrasar o sinal em 45° . Como pode ser verificado na Figura 13, a constelação em preto é o efeito do canal gerado, o que ocasiona em perda de informação.

De forma a corrigir tal efeito, foi adicionado um equalizado de um *tap* que se mostrou eficaz, já que a taxa de erro de bits foi reduzida, em relação à ausência de equalização. O EVM computado com equalização foi de -310.5877 dB (2.9554.10⁻¹⁴ %).

Figura 13 – Constelação dos símbolos transmitidos, recebidos e recebidos e equalizados.



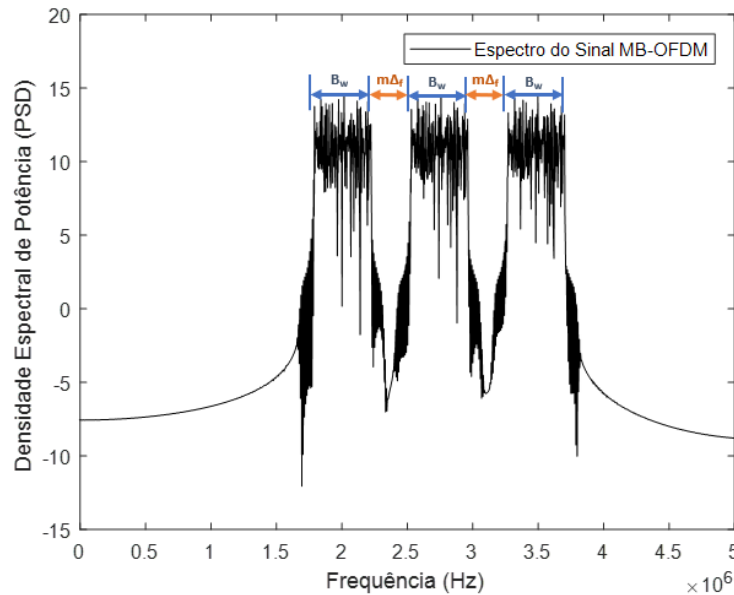
O equalizador utiliza os m símbolos, que seriam os m primeiros frames recebidos, como símbolos de treinamento. E para os demais símbolos recebidos esta etapa realiza o inverso do efeito não desejado do canal, como mostrado na Equação 19.

$$S_{k,eq} = \frac{S_{k,recebido}}{H_k \angle \phi_k} \quad (19)$$

Onde $S_{k,recebido}$ é o símbolo complexo após a retirada dos zeros na recepção no sistema OFDM; $H_k \angle \phi_k$ é o efeito do canal no sinal e $S_{k,eq}$ é o símbolo equalizado.

Com o sinal OFDM criado, o próximo passo foi a geração do sinal MB-OFDM. Para tanto, foi gerado um único sinal de multiportadoras que foi modulado para banda-passante em três frequências centrais distintas. A Figura 14 ilustra o espectro do sinal *multiband*.

Figura 14 – Espectro do sinal MB-OFDM gerado



Para determinar o distanciamento entre as bandas OFDM do *multiband* adotou-se que esta deveria ser $m\Delta_f$, ou seja, um múltiplo da distância entre as subportadoras. Portanto ao definir a frequência central da primeira banda e considerando a constante do espaçamento entre elas (m) temos que as outras frequências das portadoras (para banda passante) serão

$$f_{c2} = f_{c1} + B_w + m\Delta_f \quad (20)$$

e

$$f_{c3} = f_{c1} + 2B_w + 2m\Delta_f \quad (21)$$

De forma genérica a frequência central da banda OFDM pode ser definida como:

$$f_{cN} = f_{c1} + (N - 1)B_w + (N - 1)m\Delta_f \quad (22)$$

Nas simulações os filtros passa-faixa utilizados na recepção são ideais pois apresentam 0dB de ganho e 0° de atraso de fase. A frequência mínima de corte para cada banda pode ser determinada com o sendo

$$f_{min,corte} = f_{c_k} - \frac{B_k + m\Delta_f}{2} \quad (23)$$

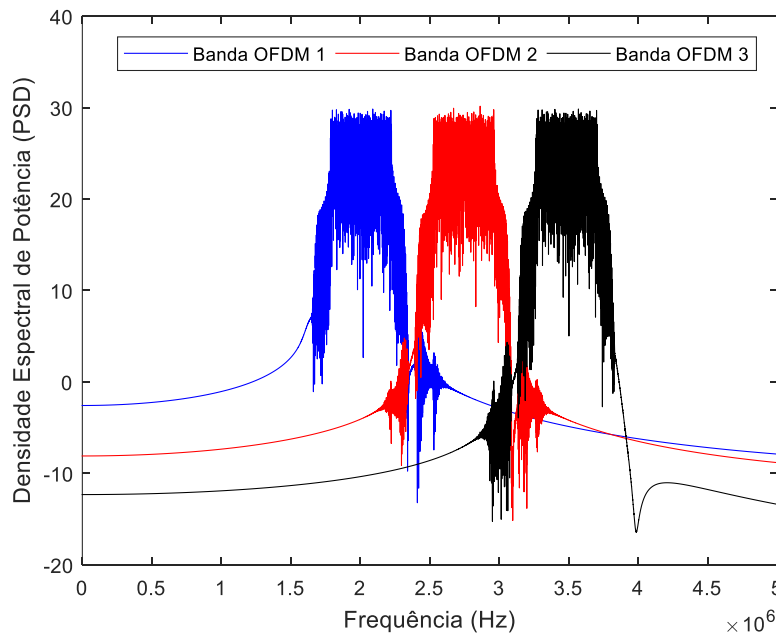
e a frequência máxima de corte como

$$f_{max,corte} = f_{c_k} + \frac{B_k + m\Delta_f}{2} \quad (24)$$

Sendo que o índice k indica a banda a ser filtrada.

Considerando um sistema MB-OFDM, com $m=30$, $\Delta_f=30$ e cada banda usando modulação 16QAM, ao aplicar, na recepção, os filtros gerados a partir das Equações 18 e 19 para extrair cada banda, temos os espectros mostrados na Figura 15. O EVM após a filtragem aumenta para -50 dB em média. Este aumento, em relação à única banda OFDM simulada em e mostrada na Figura 11 é devido à não recuperação perfeita do sinal OFDM após a filtragem e do *downsampling* realizado pelo demodulador para banda-base.

Figura 15 – Espectro do sinal MB-OFDM na recepção após a filtragem com Butterworth de ordem 10, ganho 0 dB e desvio de fase 0.



Ao adicionar ruído ao sinal criado, espera-se que o para relações SNR baixas ocorra mais erros e que a magnitude do vetor erro seja considerável e com o incremento de SNR a EVM

diminua e a BER seja irrisória. As Figuras 16 a 21 apresentam as curvas de BER e EVM, respectivamente de acordo com a quantidade M símbolos que são mapeados. Os pontos que não existem nas curvas simuladas indicam que não ocorreram erro para tal valor de SNR.

Nas simulações realizadas os valores de BER são menores que o teórico, mostrando-se, assim, melhores. Isto se dá devido à presença de filtros na recepção do sistema MB-OFDM, diminuindo o efeito do ruído nas bandas OFDM. Observa-se também que as bandas possuem os valores de BER muito próximos.

Figura 16 – BER em função do SNR para o sistema MB-OFDM com modulação 4QAM

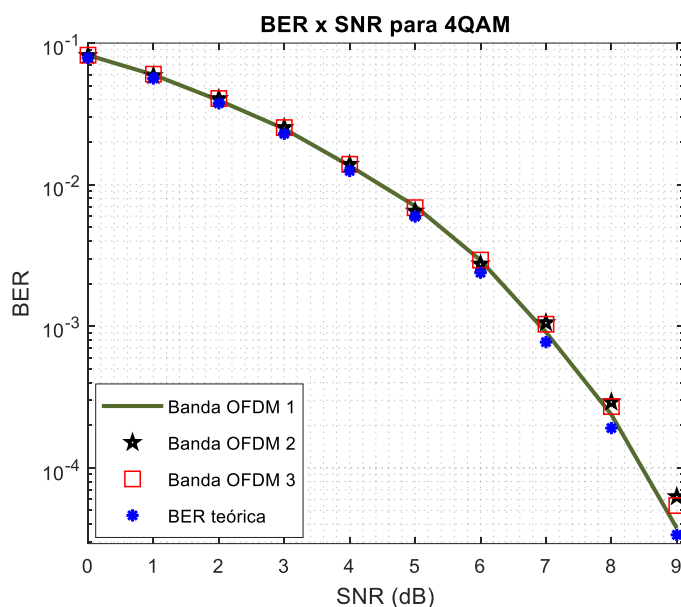


Figura 17 – BER em função do SNR para o sistema MB-OFDM com modulação 16QAM

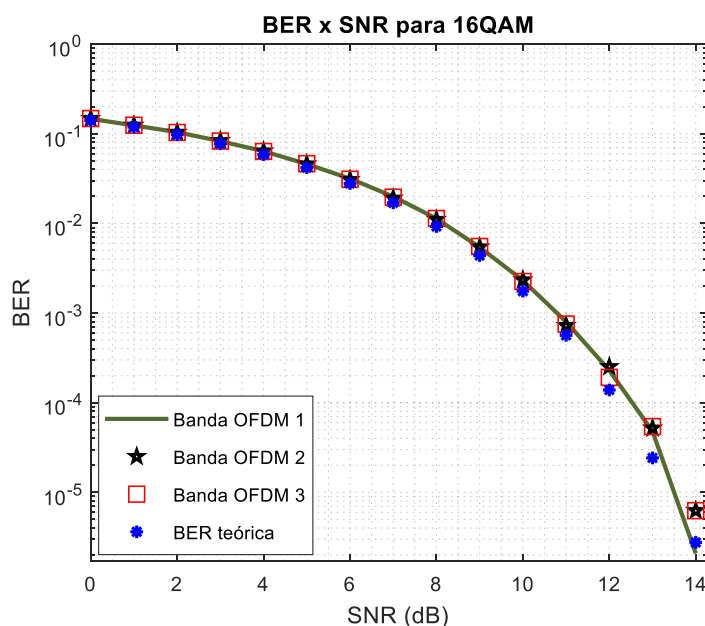


Figura 18 – BER em função do SNR para o sistema MB-OFDM com modulação 64QAM

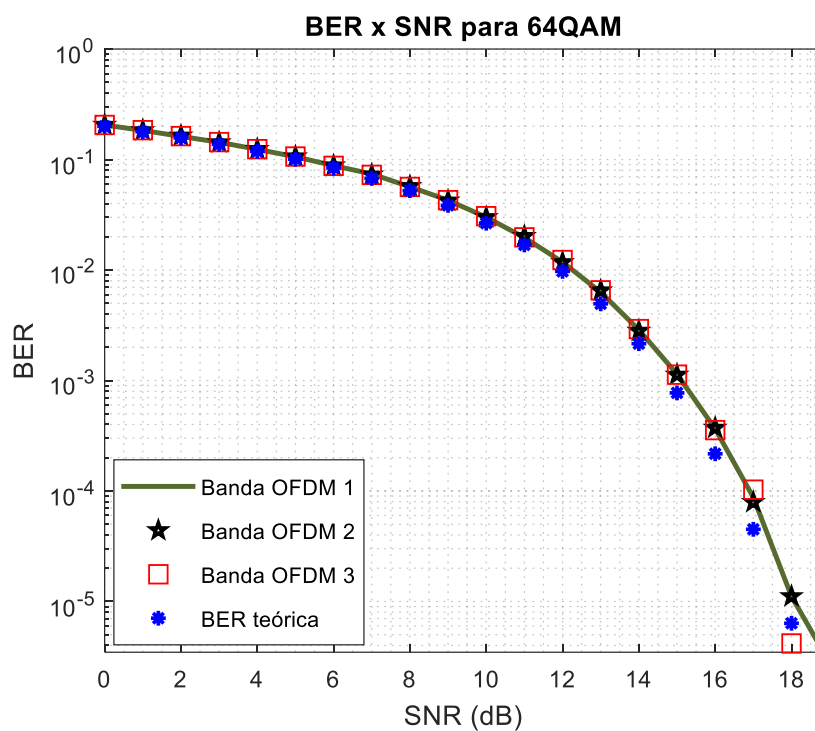


Figura 19 – BER em função do SNR para o sistema MB-OFDM com modulação 128QAM

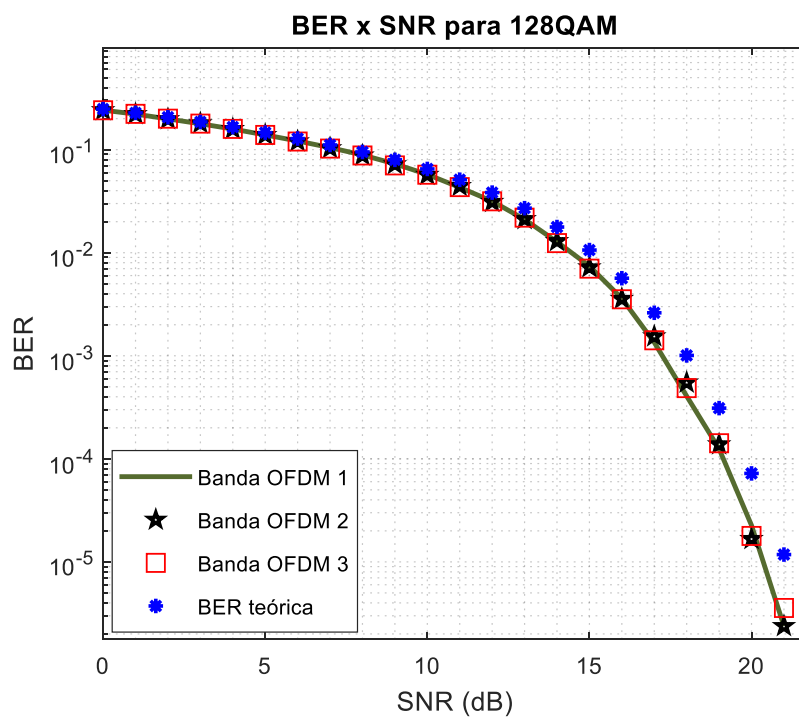
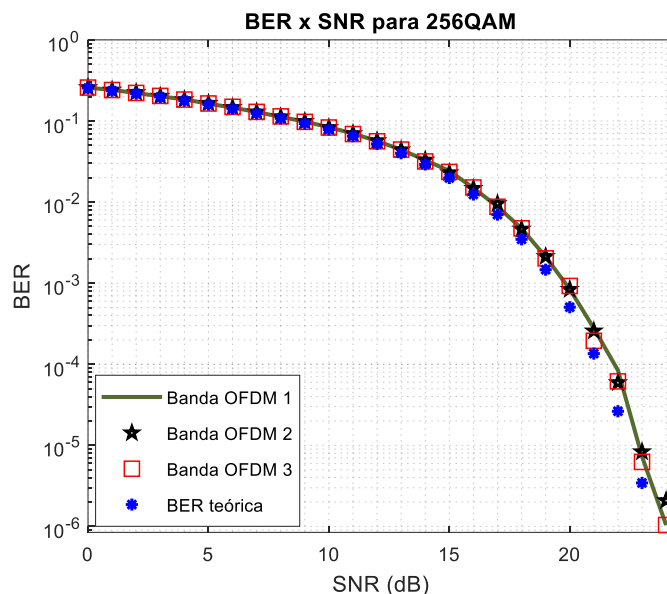


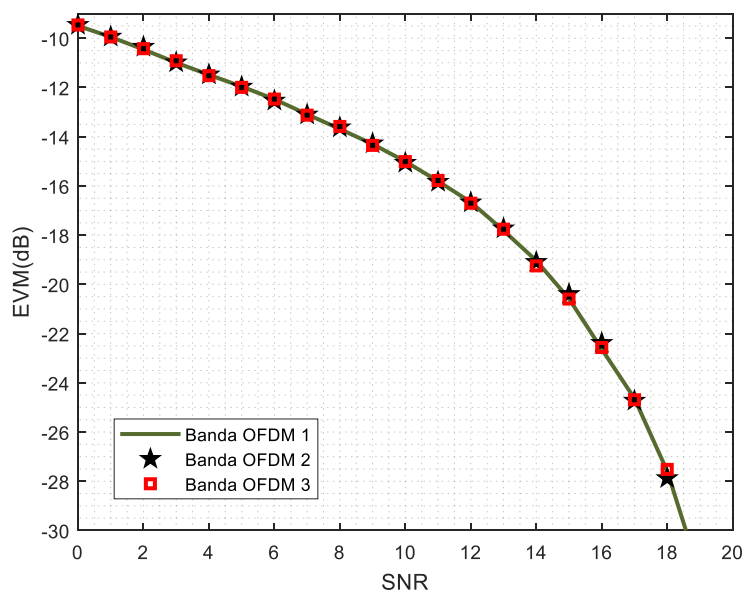
Figura 20 – BER em função do SNR para o sistema MB-OFDM com modulação 256QAM



Com maiores distâncias euclidianas (distância entre os símbolos transmitidos no diagrama de constelação, ou seja, menores valores de M) entre os símbolos no diagrama de constelação menor a probabilidade de erro de símbolos e, desta forma, menores são os valores de BER e isto pode ser verificado a partir da Figura 21.

Nas simulações não foram obtidas variações consideráveis entre a EVM entre as bandas MB-OFDM. Como pode ser verificado o previsto anteriormente é verídico, tanto a EVM (Figura 21) quanto a BER decrescem com o aumento do SNR.

Figura 21 – EVM em função do SNR para o sistema MB-OFDM para 4QAM



5 ANÁLISE DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Conforme destacado na metodologia, foram feitos os experimentos *back-to-back* com o MDO3012 utilizando suas funções de osciloscópio e AFG. Com o objetivo de obter menores erros de medição possíveis o equipamento foi configurado com o máximo de impedância de entrada (osciloscópio) e saída (AFG), buscando desta forma maior casamento de impedâncias.

É válido destacar que nos testes não foram seguidos padrões adotados para sistemas OFDM, pois o equipamento utilizado possui uma grande limitação de máxima frequência que um sinal pode ser gerado, já que a máxima componente de frequência que pode ser gerada na função sinal arbitrário do AFG é de 25 MHz (TEKTRONIX, 2014). Não obstante, na recepção o máximo de pontos recebidos, independentemente na taxa de amostragem, é de 10.000 amostras.

A configuração do AFG impõe que os sinais, ao serem enviados, devem ser normalizados, divididos pelo máximo valor que o sinal atinge, e após na recepção, as amostras devem ser desnormalizadas, ou seja, multiplicadas pelo número que foi dividida na normalização. Esta conclusão foi tirada a partir de várias tentativas e testes.

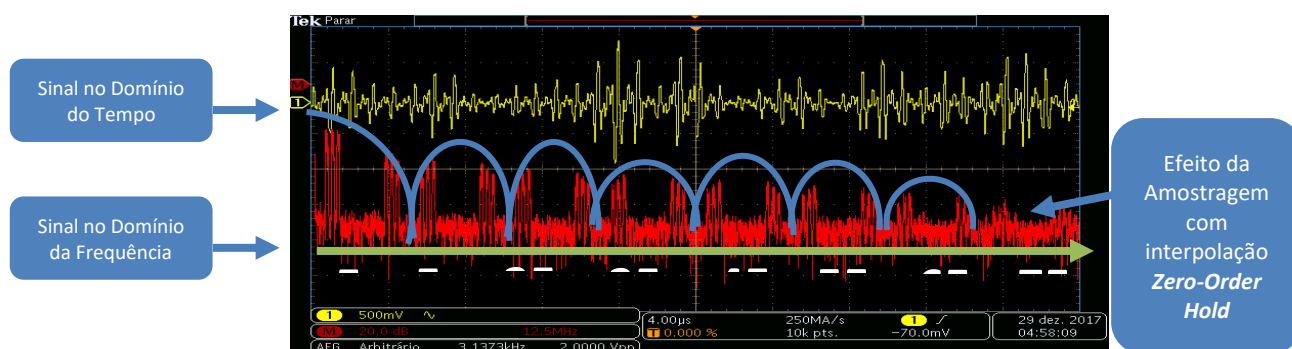
A escolha de somente três bandas OFDM para a técnica MB-OFDM está no fato de desejar verificar as interferências que podem ocorrer entre as bandas e também providas do canal. O valor foi limitado a três, pois, como a taxa de amostragem deve ser superior ao dobro da máxima frequência do sinal, pelo teorema de Nyquist, ao aumentar a quantidade de bandas, aumentar-se-ia, por conseguinte, a máxima frequência do sinal atingida. Em decorrência disso, a taxa de amostragem seria aumentada. A consequência disto está na aquisição de pontos do osciloscópio que é limitada a 10.000 e quanto maior a máxima frequência do sinal (que ocorria com a inserção de maiores unidades de bandas), maior seria a quantidade de pontos a serem enviados para o AFG (limitado a 131.072 pontos, conforme descrito no manual do programador da Tektronix (2012)). Com o aumento da taxa de amostragem do sinal transmitido ao AFG, no osciloscópio também deveria ser ajustada a taxa de amostragem de forma a obter o sinal que fora enviado. O problema ocorre com o valor fixo de amostras recebidas, que impede a recuperação completa do sinal com vários frames.

Nos experimentos, a taxa de amostragem foi determinada como 3 a 4 vezes a máxima frequência do sinal gerado. E para a recuperação do sinal via osciloscópio a taxa de amostragem deveria ser maior daquela do sinal enviado ao AFG. Para todos os testes adotou-se 25 MS/s e a portadora da primeira banda sendo de 2 MHz.

O código de comunicação foi desenvolvido baseando-se no manual do programador disponibilizado pela Tektronix, a fabricante do osciloscópio (TEKTRONIX, 2012).

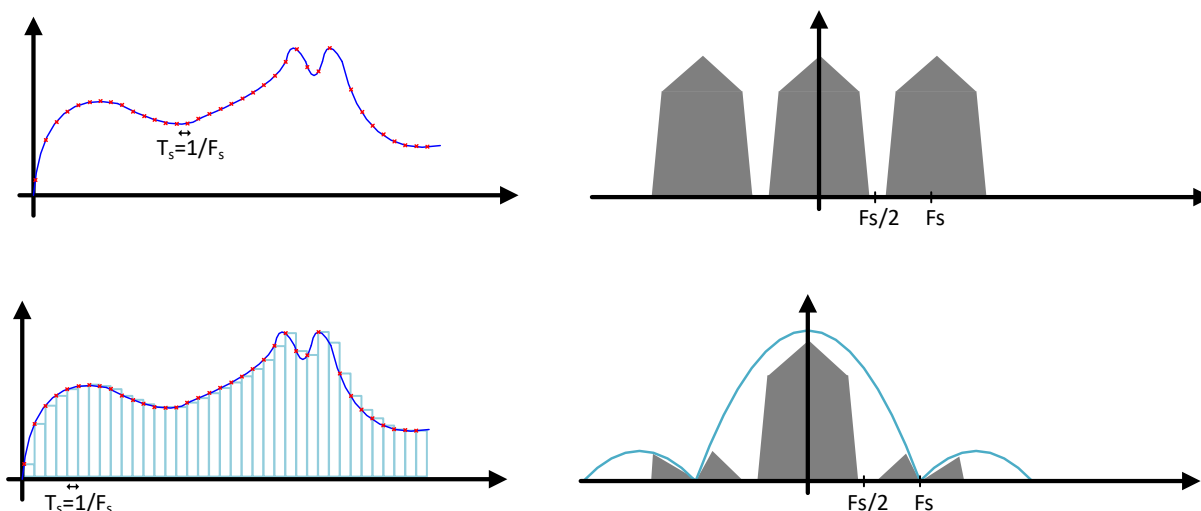
Ao enviar o sinal MB-OFDM foi verificado que na frequência várias cópias do sinal estavam repetidas e atenuadas, como pode ser percebido na Figura 22, que mostra uma impressão da tela do equipamento.

Figura 22 – Sinal no domínio do tempo (amarelo) e espectro do sinal (vermelho) gerado pelo osciloscópio. Nele é possível ver várias cópias atenuadas do espectro do sinal.



Podemos atribuir essa constatação ao fato dos sinais digitais (ou os pontos enviados via MATLAB), quando enviados para o AFG (gerador arbitrário de sinais), obrigatoriamente devem passar por um DAC (conversor analógico digital) e, considerando que de acordo com Tektronix (2013), o AFG vai aplicar um ZOH (*zero-order hold*), uma convolução no tempo de um trem de impulsos com um sinal quadrado com intervalo de T_s (período de amostragem), no domínio da frequência, haverá uma característica passa-baixa (produto com uma sinc), como ilustra a Figura 23.

Figura 23 – Zero-Order Hold aplicado no conversor digital analógico. No domínio da frequência o espectro do sinal é multiplicado por uma função sinc.



Fonte: Tektronix (2013)

A partir da Figura 23 é possível verificar que existe uma atenuação no espectro do sinal e espera-se que isso faça com que as bandas do MB-OFDM que estejam centradas em frequências maiores sofram mais com esta atenuação, e por consequência a informação não seja transmitida fielmente.

Cada teste foi realizado transmitindo e recebendo 50 vezes sinais MB-OFDM no setup B2B. Cada sinal enviado possuía 3 *frames* de dados com IFFT/FFT de tamanho 64 e 48 subportadoras de dados.

Inicialmente, para a aquisição dos dados, a grande dificuldade foi na sincronização do sinal recebido do AFG, já que possuía taxa de amostragem superior ao sinal enviado. A solução para este problema foi a reamostragem do sinal recebido, realizando um *downsampling* do mesmo à frequência daquele transmitido e estimar o atraso, que seria a posição em que o sinal transmitido se encontra naquele recebido e reamostrado. Esta estimativa foi realizada pela função *alignsignals*, disponível no MATLAB, que faz a correlação entre os sinais recebidos e reamostrado e aquele transmitido, retornando o atraso em que a segunda se encontra na primeira. A Figura 24 ilustra os passos descritos.

A partir de um *zoom* da Figura 24(c) é possível verificar que o alinhamento é satisfatório e que o sinal recebido (já desnormalizado) apresenta algumas distorções em relação ao transmitido, conforme ilustrado na Figura 25.

Figura 24 – Sincronização do sinal recebido; (a) representa o sinal enviado, (b) os 10 mil pontos adquiridos através do osciloscópio e (c) mostra a sincronização realizada.

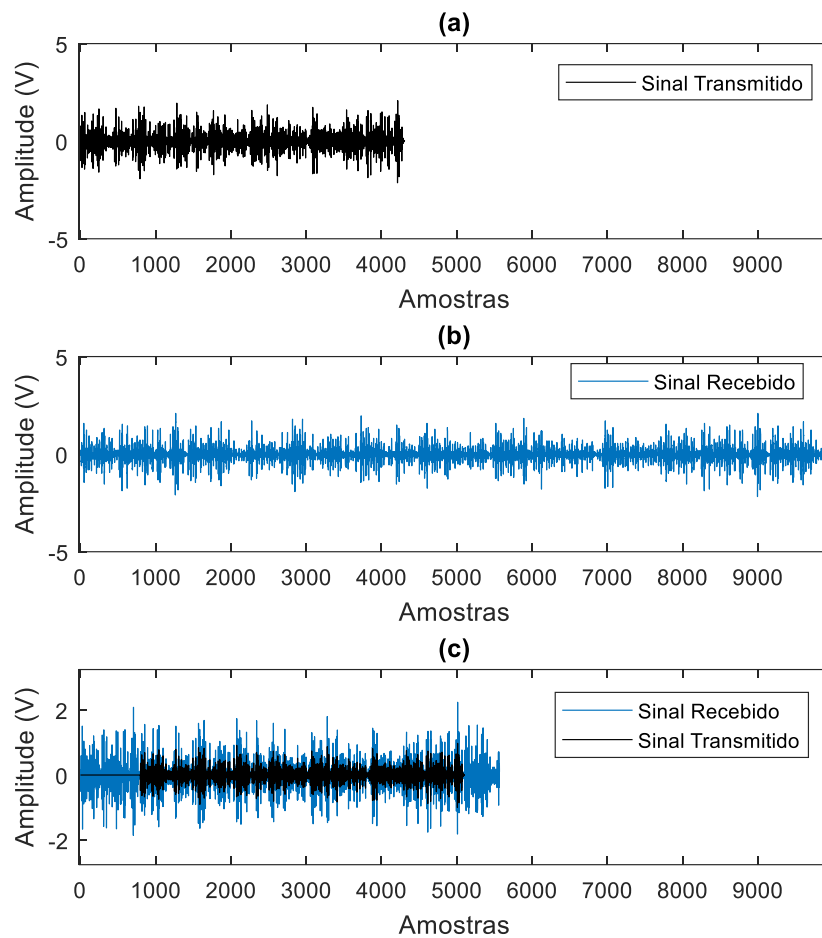
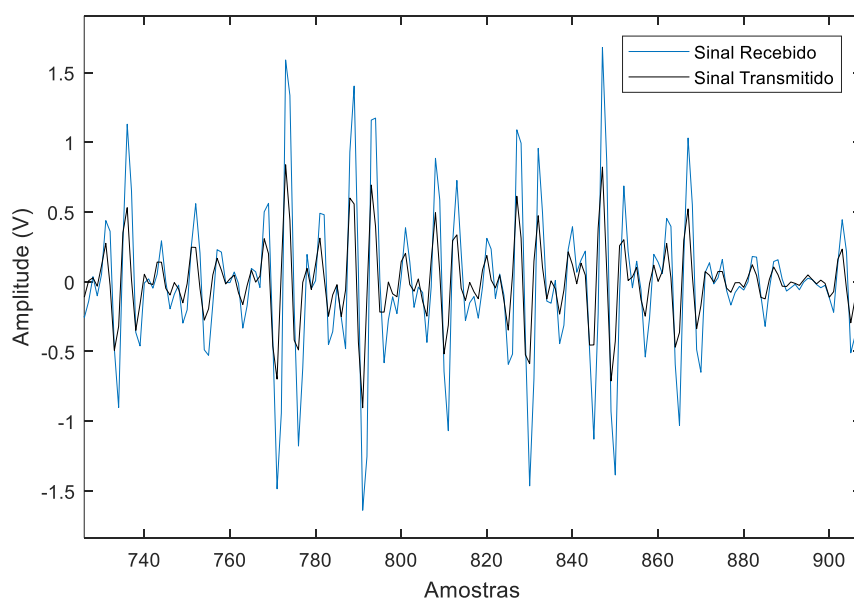
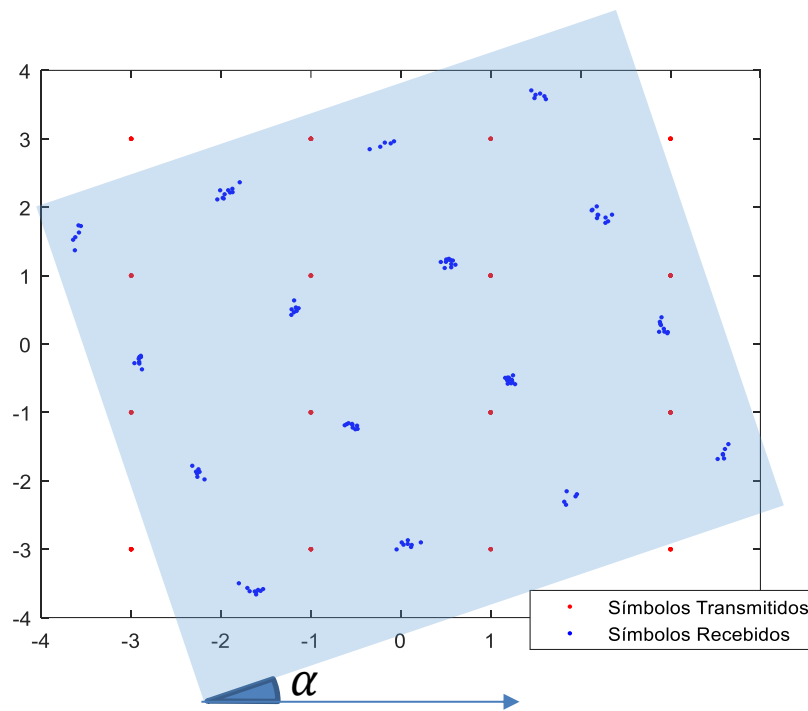


Figura 25 – Alinhamento entre o sinal transmitido e recebido



O teste do alinhamento foi realizado com um sistema MB-OFDM com 3 bandas, cada banda com $N_{FFT}=64$, 16QAM, $\Delta_F=10\text{kHz}$ e $m=30$ e o diagrama de constelação é mostrado na Figura 26. Embora o alinhamento esteja o mais próximo possível, a estimativa do *delay* não é perfeita, proporcionando certos desvios e por consequência o sistema apresenta erros de fase.

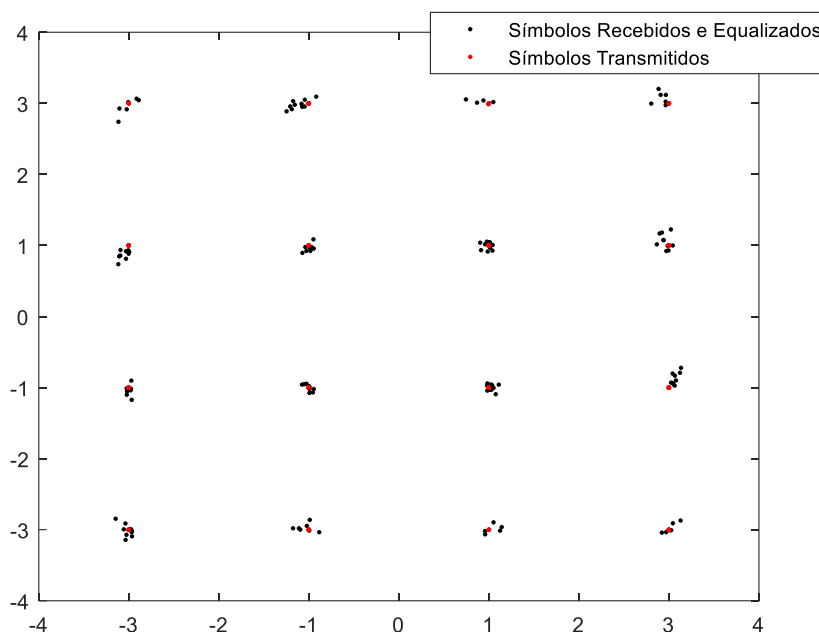
Figura 26 – Diagrama de constelação dos símbolos recebidos (azul) e dos símbolos transmitidos (vermelho) da banda OFDM 1. Os símbolos recebidos se encontram com atraso de fase e ocasiona em erros na recepção.



Desta forma, foi elaborado um equalizador de um *tap* de forma a mitigar tal efeito. Este equalizador busca corrigir os erros de fase e de magnitude do sinal recebido. A abordagem realizada foi feita considerando a imutabilidade do canal e desenvolvida da seguinte forma: o primeiro *frame* de dados enviado é utilizado como piloto para a equalização de amplitude. A cada três *frames* os pesos do equalizador de fase são atualizados. Desta forma temos o diagrama de constelação mostrado na Figura 26 para os símbolos mostrados na Figura 27 equalizados e os símbolos recebidos.

Com a equalização o sistema mostrou-se sem erros e com EVM de -30 dB em média para a parametrização citada.

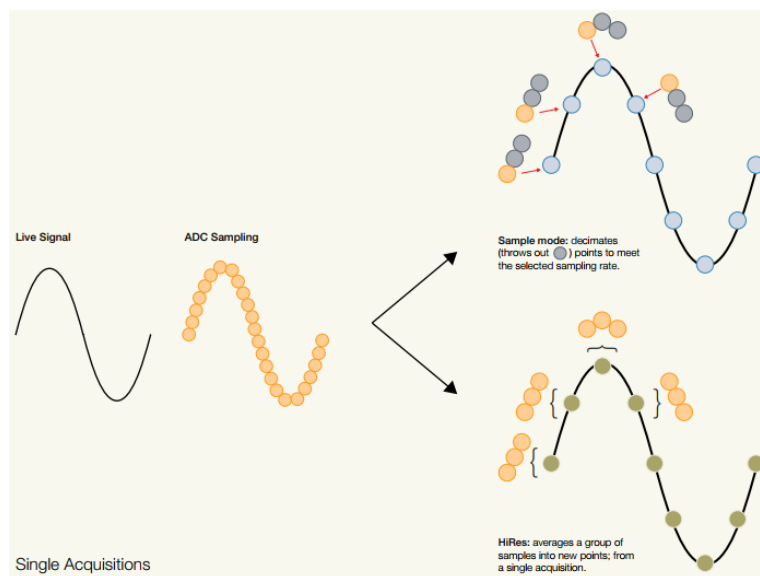
Figura 27 – Diagrama de constelação para símbolos recebidos e equalizados (sem distorção em fase) e os símbolos transmitidos da Banda OFDM 1.



Outra configuração de grande importância realizada foi habilitar o modo HiRes (Alta Resolução) do osciloscópio. De acordo com TEKTRONIX (2013), o HiRes é um modo de aquisição que executa seu ADC (conversor analógico digital) na taxa máxima de amostragem, realiza a filtragem do sinal e executa o algoritmo chamado *boxcar* que mede várias amostras sequenciais e realiza a média entre elas, como mostra a Figura 28.

Este número de amostragens é definido de acordo com a taxa de amostragem selecionada pelo usuário. Consonante com a Tabela 2, disponibilizada pela Tektronix, o número de pontos de amostra de ADC introduzidos no processo de filtro / média é a proporção das amostras de ADC totais disponíveis na taxa de amostragem máxima para o número de amostras solicitadas pelo usuário para a forma de onda exibida.

Figura 28 – Aquisições realizadas pelos osciloscópios digitais: Modo Amostra (*Sample Mode*) em que os dados são adquiridos em máxima taxa de amostragem e decimados para a taxa de amostragem configurada no osciloscópio e o Modo HiRes (*High Resolution*) em que os sinais são filtrados e utilizando o algoritmo *boxcar* são decimados.



Fonte: Tektronix, 2013.

Tabela 2: Resolução vertical aprimorada devido ao HiRes em um osciloscópio de 5 GS / s

Sample Rate	Averages	Bits of Resolution	-3 dB Bandwidth
5 GS/s	1	8.0	2.2 GHz
2.5 GS/s	2	8.5	1.1 GHz
1 GS/s	5	9.2	440 MHz
500 MS/s	10	9.7	220 MHz
250 MS/s	20	10.2	110 MHz
100 MS/s	50	10.8	44 MHz
50 MS/s	100	11.3	22 MHz
25 MS/s	200	11.8	11 MHz
10 MS/s	500	12.5	4.4 MHz
5 MS/s	1,000	13.0	2.2 MHz
2.5 MS/s	2,000	13.5	1.1 MHz
1 MS/s	5,000	14.1	440 kHz
500 kS/s	10,000	14.6	220 kHz
250 kS/s	20,000	>15	110 kHz
100 kS/s	50,000	>15	44 kHz
50 kS/s	100,000	>15	22 kHz
25 kS/s	200,000	>15	11 kHz
10 kS/s	500,000	>15	4.4 kHz
5 kS/s	1,000,000	>15	2.2 kHz
2.5 kS/s	2,000,000	>15	1.1 kHz
1 kS/s	5,000,000	>15	440 Hz

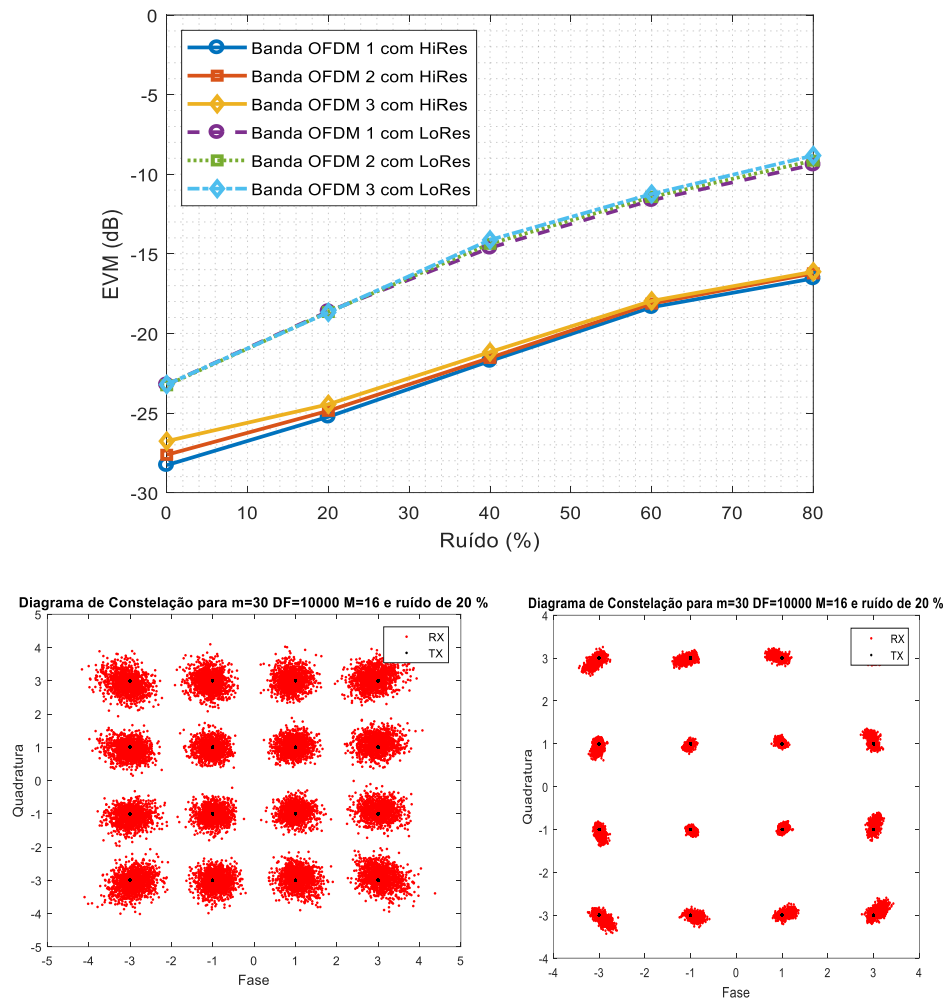
Fonte: Tektronix, 2013.

Considerando que todos os testes realizados no osciloscópio foram configurados com a taxa de amostragem de 25 MS/s, então o ADC do equipamento filtra os sinais em 5 GS/s. Este filtro possui característica passa-baixa com -3 dB em 11 MHz, o que representa uma desvantagem do modo de aquisição (o filtro passa-baixa age como um filtro de um polo, com largura de banda de -3dB na taxa de amostragem mostrada dividida por aproximadamente 2,27). Após a filtragem que então é realizada a média de 200 amostras por vez.

O usuário do Osciloscópio não tem muito controle do modo HiRes, já que todas as configurações são determinadas pelo fabricante; a única liberdade está na decisão de sua utilização e na escolha da taxa de amostragem que alterará as configurações pré-estabelecidas (Tabela 2). Este método apresenta como vantagem a necessidade de pouco poder de processamento (TELEDYNE LECROY, 2011).

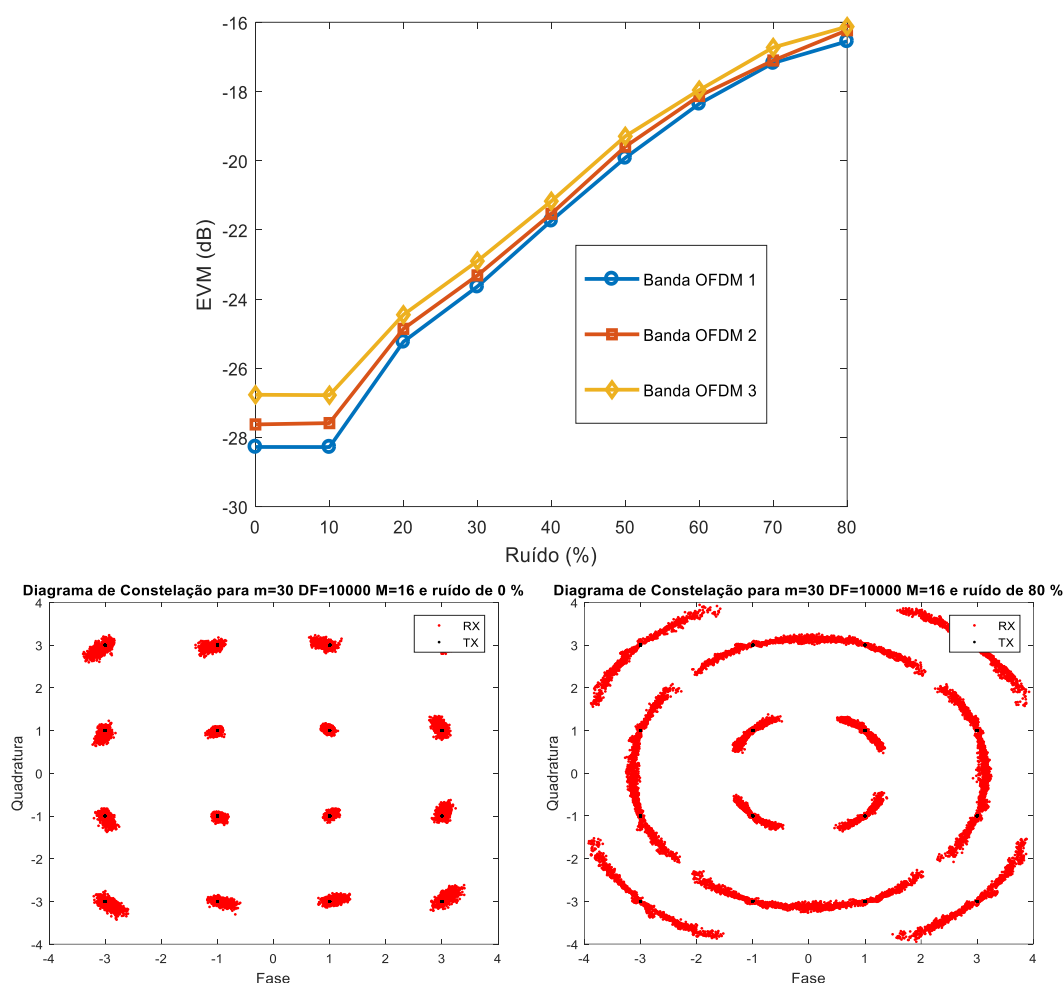
De forma a comparar os modos de aquisição HiRes e LoRes (baixa resolução ou modo amostra) foram utilizados os sinais MB-OFDM com 3 bandas. A Figura 29 mostra o EVM para o aumento do ruído adicionado pelo AFG. Este ruído é caracterizado como porcentagem da amplitude do sinal enviado, sem mais informações do fabricante, portanto a porcentagem é feita tomando como base 1 V, que é a amplitude do sinal no tempo. Percebe-se que o EVM é menor quando se utiliza o modo HiRes, que pode ser devido à filtragem (frequência de corte = 11 MHz) anterior ao *downsampling*. Esta característica também reflete na taxa de erro de bits que é considerável a partir de 20% de ruído adicionado enquanto que para o modo HiRes os erros começam a ocorrer ruído igual a 60%.

Figura 29 – EVM medido em função do ruído adicionado pelo AFG e do modo de aquisição da onda, modo amostra (baixa resolução de 8 bits) e HiRes com (11 bits) e os diagramas de constelação para o ruído do AFG setado para 20% para o modo Amostra (à esquerda) e HiRes (à direita).



Tendo em vista que o modo de aquisição HiRes apresenta-se mais eficiente do que o modo comum de amostras, aquele foi utilizado como padrão para os demais experimentos. Realizando mais testes com intervalos de ruído de 10%, temos a Figura 30. Até 10% de ruído adicionado nenhuma mudança é vista no diagrama de constelação a partir deste valor a distância dos símbolos da localização ideal são aumentadas causando diversos erros em todas as três bandas. A terceira banda OFDM mostra-se mais sensível à adição de ruídos. Como exemplo, em 50% de ruído inserido no sinal pelo AFG a banda 1 não apresenta erros enquanto que a segunda apresenta BER de $2,32 \cdot 10^{-4}$ e a terceira $3,84 \cdot 10^{-4}$. É verificado a partir do diagrama de constelação para ruído de 80% que os erros decorrem da falta de alinhamento do sinal recebido e por isso o erro de fase é mais visualizado.

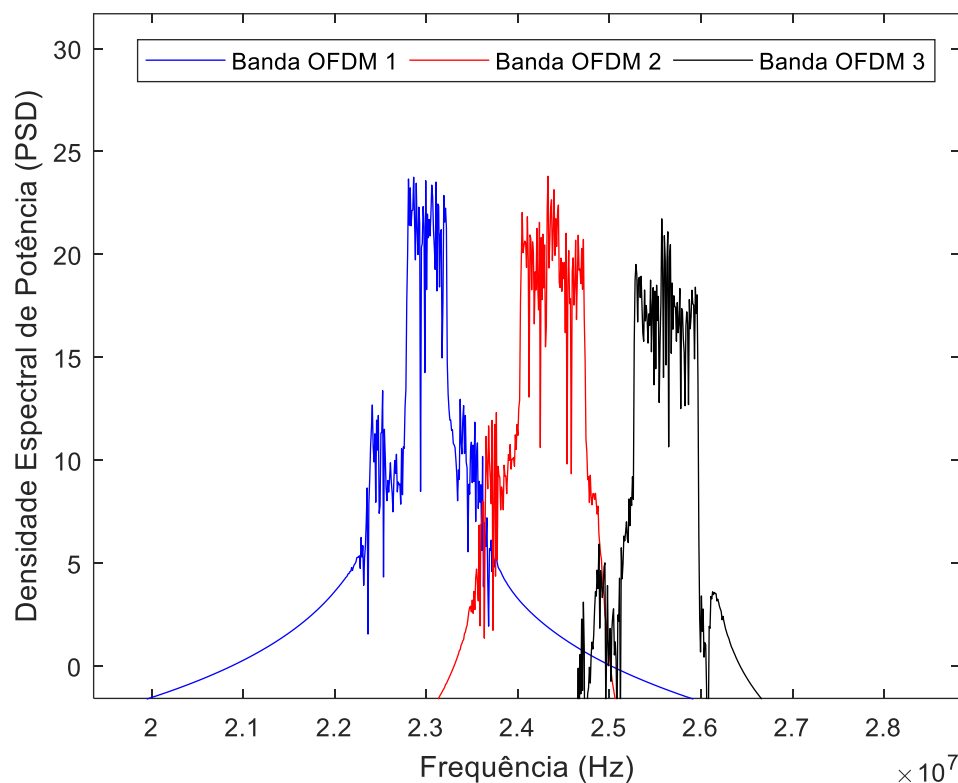
Figura 30 – EVM medido em função do ruído adicionado pelo AFG com modo de aquisição HiRes. Verifica-se um aumento considerável nos erros com o incremento de ruído. Abaixo são mostrados os diagramas de constelação para 0% de ruído e 80% de ruído.



Embora seja esperada uma característica de filtro passa-baixa a quando as bandas OFDM ocupam faixas de frequências próximas de 25 MHz, ou seja, as portadoras modulam os sinais para estas faixas, a comunicação se mostra ineficiente, gerando erros consideráveis. A partir da Figura 31 verifica-se que a banda 3 sofre mais com a atenuação que o canal proporciona por meio de seus filtros. Na Figura 21 a frequência central da primeira portadora é de 23 MHz.

Buscou-se verificar os efeitos adicionados ao sinal com o aumento do espaçamento entre as bandas OFDM, alterando desta forma a constante m de espaçamento entre as bandas mostrado no item 2.2 deste trabalho. A interferência inter-canal (ICI) tende a ser minimizada com o aumento de m como mostram os testes realizados ilustrados pela Figura 32.

Figura 31 – Espectro do MB-OFDM para frequências próximas a 25 MHz. Nesta imagem fica clara o efeito passa-baixa do canal.



Outra análise importante é o comportamento do sistema em relação à quantidade de símbolos no mapeamento (M). Em conformidade com os experimentos desenvolvidos por Enam (2012), se verifica que quanto maior o nível M (quantidade de símbolos mapeados na constelação) de modulação digital maior a probabilidade de ocorrência de erros. Isto se deve ao fato de que como a distância Euclidiana entre os pontos é reduzida com o aumento de M , o aumento de ruído degradará mais o sinal com maior quantidade de símbolos, provocará mais erros.

Foram desenvolvidas medidas para as modulações 4, 16, 32, 64, 128 e 256 QAM. A Figura 33 mostra que o EVM tem um aumento ligeiro para 4QAM, 16QAM, 32QAM e 64QAM e possui um súbito aumento a partir de 128QAM. Até $M=64$, não foram computados erros de comunicação. A partir de $M=128$ as BER verificadas nas bandas 1, 2 e 3, respectivamente foram de $4,42 \cdot 10^{-5}$, $3,09 \cdot 10^{-4}$ e $1,50 \cdot 10^{-3}$. Para 256QAM o EVM tem uma ligeira queda, mas a BER gira em torno de 10^{-3} .

Figura 32 – EVM medido em função da constante de espaçamento entre as bandas OFDM. Abaixo são mostrados os diagramas de constelação para o espaçamento de Δ_f (à esquerda) e $60\Delta_f$ (à direita); quanto maior o espaçamento melhor é o comportamento do diagrama de constelação.

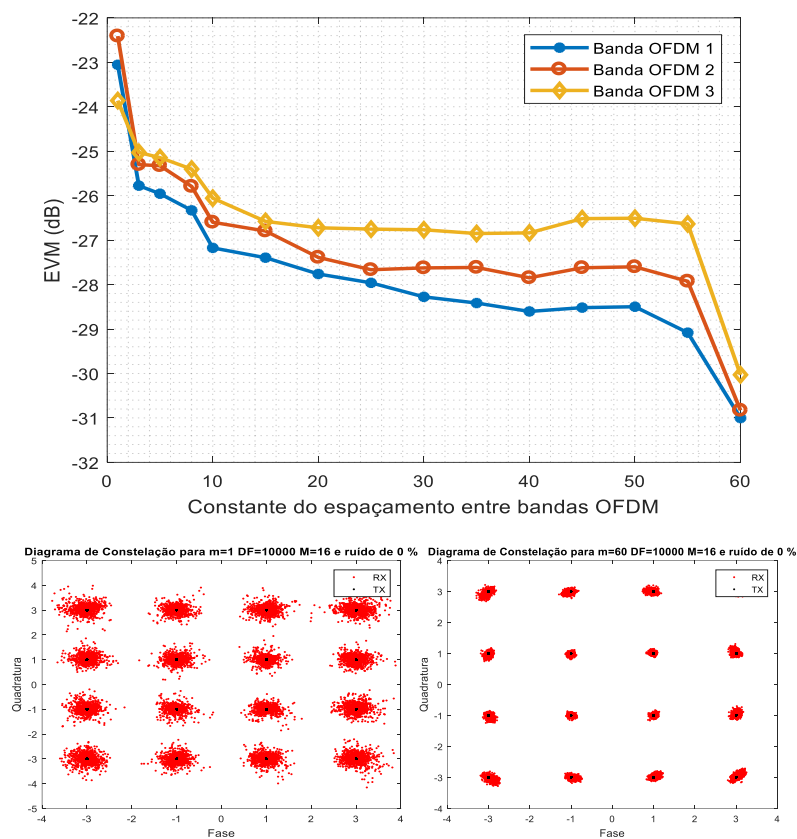
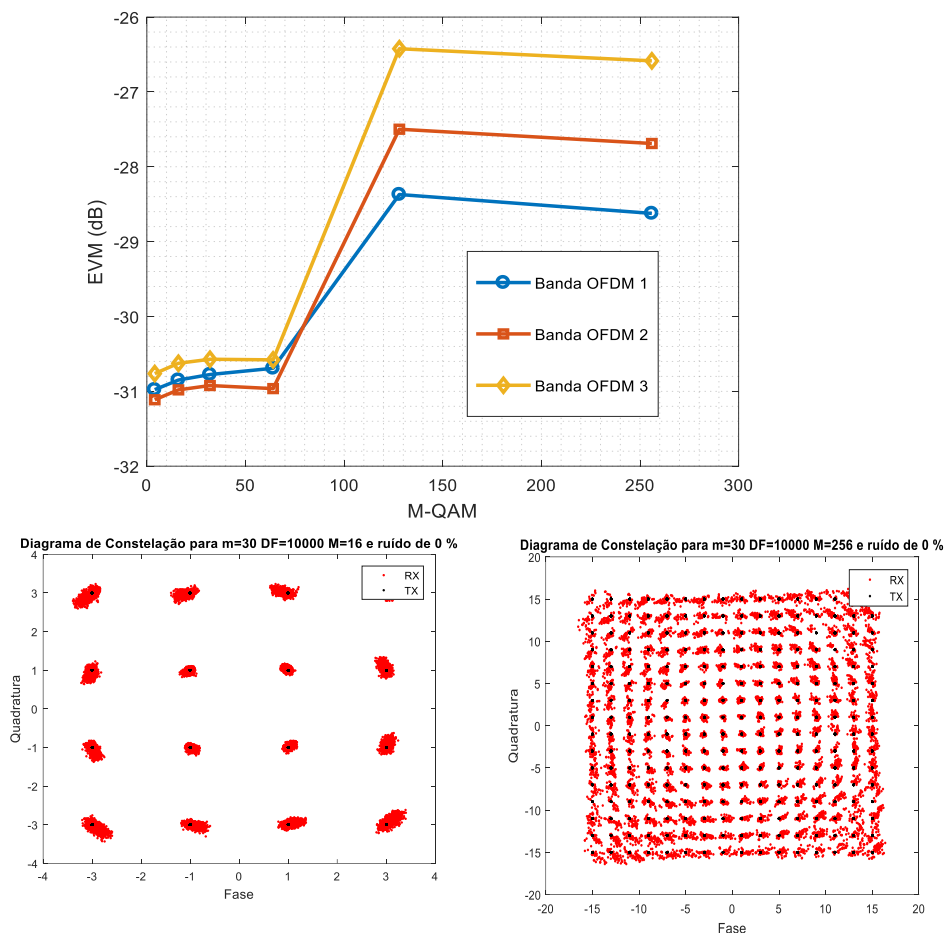
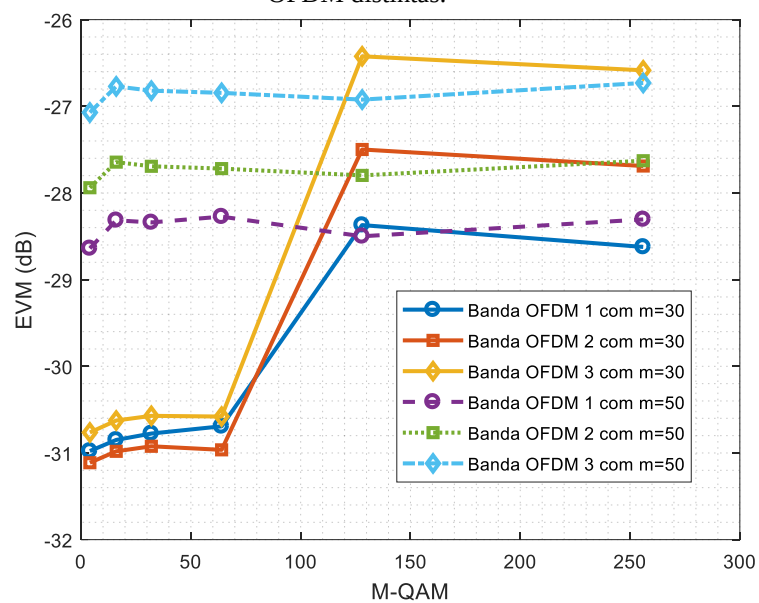


Figura 33 – EVM em função de M símbolos utilizados na modulação digital. Abaixo são mostradas as constelações para 16QAM e 256QAM; com o aumento do nível de modulação o sistema torna-se susceptível ao ruído causado pelo *setup* elétrico.



De forma a combinar a distância entre as bandas OFDM e a quantidade de símbolos utilizados (como mostrado na Figura 33) verificou-se que para M menor do que 128 e para constantes de espaçamento entre as bandas maiores, menor será o EVM mensurado e, logo, menor incidência de erros.

Figura 34 – EVM em função de M símbolos utilizados na modulação digital em duas distâncias entre bandas OFDM distintas.



6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Com a liberação de larguras de bandas mais extensas para aplicações UWB torna-se necessária a adoção de técnicas que possibilitem maior eficiência espectral com baixo custo e complexidade computacional. O MB-OFDM mostra-se um candidato em potencial para esta aplicação, já que garante a eficiência espectral desejada, com certa economia do espectro combinada com a característica de multiacesso ao meio e robustez contra multipercurso característico de sistemas OFDM.

O objetivo deste trabalho foi analisar o comportamento do sistema MB-OFDM em termos EVM e BER em relação ao espaçamento entre as bandas, inclusão de ruídos e a quantidade de símbolos de modulação digital de cada banda OFDM.

A partir da comunicação entre o osciloscópio e o MATLAB realizada com sucesso os sinais foram transmitidos para o gerador de função, recuperado pelo osciloscópio e enviado para o computador via comunicação serial.

A princípio foram gerados sinais OFDM para validação com parâmetros conhecidos por padrões com um sistema apresentando-se ideal. Os sinais foram multiplexados em frequência e simulados via MATLAB.

Com as simulações realizadas, verificou-se que os sinais gerados para MB-OFDM possuem características de desempenho (BER) equivalentes àquelas de única portadora, validando assim a sua utilização.

A partir dos testes verificou-se que o EVM tende a diminuir com o espaçamento entre as bandas OFDM e aumentar em sistemas utilizando 128QAM e 256QAM, inclusive gerando grande quantidade de erros na comunicação (i.e. alto valor da BER). Também foi notado que para o modo de aquisição HiRes, o sistema se torna menos sensível a amplitude de ruído adicionado ao sinal.

Trabalhos futuros podem ser realizados com o intuito de melhorar o alinhamento do sinal recebido do osciloscópio, aumento do espaçamento entre as bandas OFDM, bem como o aumento na quantidade de bandas e posterior análise da comunicação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

_____. TEKTRONIX. **MDO4000, MSO4000B and DPO4000B Series Oscilloscopes Programmer Manual**. Rev B. EUA, 2012.

_____. TEKTRONIX. **Mixed Domain Oscilloscopes – MDO3000 Series Datasheet**. EUA, 2014.

_____. TEKTRONIX. **High-Speed DACs**. Disponível em: <www.tek.com/dl/76W_30631_0_HR_Letter.pdf>. Acesso em: 20 de dez. de 2013.

_____. TEKTRONIX. **Tools to Boost Oscilloscope Measurement Resolution to More than 11 Bits**. Disponível em: < <http://www.actekinc.com.tw/admin/download/file/2017-04-07/58e70864cbd0a.pdf>>. Acesso em: 20 de dez. de 2013.

_____. TELEDYNE LECROY. **Differences Between ERES and HiRes**. Disponível em: < <http://teledynelecroy.com/doc/differences-between-eres-and-hires>>. Acesso em: 20 de dez. de 2013.

ANATEL, Agência nacional de Telecomunicações. **Resolução nº 680**. Disponível em: <<http://www.anatel.gov.br/legislacao/resolucoes/2017/936-resolucao-680>>. Acesso em: dez de 2017.

ARMSTRONG, Jean. OFDM for ptical communications. **Journal of lightwave technology**, v. 27, n. 3, p. 189-204, 2009.

BATRA, A et al. **Multi-band OFDM Physical Layer Proposal for IEEE 802.15 Task Group 3a**. IEEE P802.15 - Wireless Personal Area Networks. 2003.

BATRA, A., et al. **Design of a multiband OFDM system for realistic UWB channel environments**. IEEE Transactions on Microwave theory and techniques 52.9 (2004): 2123-2138. 2004.

BATRA, A., BALAKRISHNAN, J. and DABAK, A. **Multi-band OFDM: a new approach for UWB**. ISCAS'04. Proceedings of the 2004 International Symposium on (Vol. 5, pp. V-V). IEEE. 2004.

ECMA. **High Rate Ultra-Wideband PHY and MAC Standard**, ECMA International Std. ECMA-368, Dec. 2005.

ENAM, F., et al. **Performance evaluation of orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) based wireless communication system with implementation of least mean square equalization technique**. International Journal of Computer Science and Information Security. 2012.

GOLIO, et.al. **The RF and microwave handbook**. Boca Raton: CRC Press/Taylor & Francis Group, 2008.

GUPTA, P. C. **Data communications and computer networks**. Delhi: PHI Learning, 2014.

HARA, Shinsuke; PRASAD, Ramjee. **Multicarrier techniques for 4G mobile communications**. Artech House, 2003.

HU, M. et al. Parameter-adjustable piecewise exponential companding scheme for peak-to-average power ratio reduction in orthogonal frequency division multiplexing systems. **IET Communications**, v. 8, n. 4, p. 530-536, 2014.

KUMAR, S. (Ed.). **Impact of nonlinearities on fiber optic communications**. Springer Science & Business Media, 2011.

NEE, R. V., PRASAD, R. **OFDM Wireless Multimedia Communications**, Norwood, MA: Artech House, 2000.

NIKOOKAR, H.; PRASAD, R. **Introduction to ultra wideband for wireless communications**. Springer Science & Business Media, 2008.

OSAMA, O.; ABDELREHEEM, A. Modified LTE System with Low PAPR and BER. **10.1109/SIECP.2013.6550783**. IEEE, 2013

POLLET, T.; BLADEL, M. V.; MOENECLAHEY, M. BER sensitivity of OFDM systems to carrier frequency offset and Wiener phase noise. **IEEE Transactions on communications**, v. 43, n. 234, p. 191-193, 1995.

SHAFIK, R. A. et al. On the extended relationships among EVM, BER and SNR as performance metrics. **Electrical and Computer Engineering, 2006. ICECE'06. International Conference on.** IEEE, 2006. p. 408-411.

SHIEH W., DJORDJEVIC I., **OFDM for Optical Communications**, Academic Press., 2009.

WAMICHA, J.; WINBERG, S.. IEEE 802.11 OFDM Software Defined Radio beacon frame transmission. In: **AFRICON**, 2011. IEEE, 2011. p. 1-6.

WYLIE-GREEN, M. P.; RANTA, P. A.; SALOKANNEL, J. Multi-band OFDM UWB solution for IEEE 802.15. 3a WPANs. In: **Advances in Wired and Wireless Communication**, 2005 IEEE/Sarnoff Symposium on. IEEE, 2005. p. 102-105.

ZHANG, J. et al. UWB systems for wireless sensor networks. **Proceedings of the IEEE**, v. 97, n. 2, p. 313-331, 2009.

ZHAO, Chunming; BAXLEY, Robert J. Error vector magnitude analysis for OFDM systems. **Signals, Systems and Computers, 2006. ACSSC'06. Fortieth Asilomar Conference on.** IEEE, 2006. p. 1830-1834.

ANEXO A – INSTALAÇÃO DOS DRIVERS DO MDO3012 E MONTAGEM

INSTALAÇÃO DOS DRIVERS

Para o devido funcionamento da interface e de suas aplicações é necessário instalar o TekVisa.exe, que é uma implementação da Tektronix do VISA (*Virtual Instrument Software Architecture*), um protocolo padrão industrial de comunicação. O TekVISA irá promover a comunicação com o Osciloscópio que está conectado ao PC. O arquivo “TekVISA_404.exe” para instalação está disponível no DVD que este manual acompanha ou no link <http://www.tek.com/oscilloscope/tds7054-software-2>.

Além do software para comunicação VISA do Osciloscópio é necessário que no MATLAB tenha o drive deste equipamento (o MDO3012), considerando a inexistência (até a data de término da edição deste manual) utilizou-se o driver do osciloscópio DPO3014 que se mostrou eficiente. O arquivo para instalação está disponível no DVD que este manual acompanha. Para a utilização do driver será necessário colar o arquivo “DPO3014.mdd” no diretório de instalação do MATLAB a seguir:

C:\Program Files\MATLAB\R2017a\toolbox\instrument\instrument\drivers

A MONTAGEM

Para a montagem do setup elétrico representado na Figura 30 serão necessários:

- 1 PC com as devidas instalações descritas no tópico 2 deste manual e com MATLAB instalado.
- 1 osciloscópio MDO3012
- 1 cabo USB AM/BM
- Cabo coaxial BNC E1
- 1 cabo de Força MD9 para alimentação do Osciloscópio.

A montagem para a comunicação B2B, ou seja, o sinal enviado pelo PC (da aplicação MATLAB) para o AFG (*Arbitrary Function Generator*), o gerador de função integrado no MDO3012, é mostrada na tela do Osciloscópio e, se necessário, a mesma será capturada, consiste em:

- Conectar o cabo USB AM BM no PC e no MDO (AM/BM macho na traseira do equipamento).

- Conectar o cabo coaxial no BNC fêmea do AFG na traseira do MDO ao BNC fêmea do Canal 1 do Osciloscópio, configurando o B2B.
- Alimentar o osciloscópio (100-240 V_{AC}).
- Ligar o equipamento no botão POWER, no canto inferior esquerdo do MDO3012.

Figura 35 – Montagem realizada para comunicação B2B

