

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



**ANÁLISE EXPERIMENTAL DE SINAIS OFDM
COM PRÉ-ÊNFASE**

ARTUR KRETLI COELHO

VITÓRIA
JAN/2017

ARTUR KRETLI COELHO

ANÁLISE EXPERIMENTAL DE SINAIS OFDM COM PRÉ-ÊNFASE

Parte manuscrita do Projeto de Graduação do aluno Artur Kretli Coelho, apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

VITÓRIA
JAN/2018

ARTUR KRETLI COELHO

ANÁLISE EXPERIMENTAL DE SINAIS OFDM COM PRÉ-ÊNFASE

COMISSÃO EXAMINADORA:

Jair A. Lima Silva

Prof. Dr. Jair Adriano Silva
Orientador

Helder Rocha

Prof. Dr. Hélder Roberto de Oliveira Rocha
Examinador

Esequiel da Veiga Pereira

Prof. Dr. Esequiel da Veiga Pereira
Examinador

VITÓRIA
JAN/2017

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a minha família, pelo amor, pelo carinho e pelo suporte dado quando mais precisei, a vocês dedico todo meu esforço.

À Roberta, minha namorada, que me auxiliou diversas vezes na escrita deste texto e sempre me animava para continuar progredindo.

Agradeço também, aos meus colegas de curso que me ajudaram quando precisei, principalmente ao Wesley Costa com quem compartilhei boas tardes escrevendo os códigos para o Osciloscópio usado neste PG.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Jair Adriano Lima Silva, pelo suporte e por ter me ajudado durante todas as etapas deste projeto, muito obrigado por acreditar em mim.

Por fim, agradeço a toda equipe do LabTel e do NIDA que me auxiliaram com apoio e estrutura necessária para que fosse possível fazer as análises e os testes.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Conexão em cascata de um canal dispersivo e um equalizador para transmissão sem distorções.....	10
Figura 2 - Efeito de um equalizador sobre um canal	11
Figura 3 - Efeito de um canal sobre um sinal transmitido	11
Figura 4 - Conexão em cascata pré-equalizador e um canal dispersivo.	12
Figura 5 – Sinal com pré-ênfase sendo transmitido de forma a mitigar os efeitos do canal na recepção	12
Figura 6 – Exemplo de sinal OFDM sem pré-ênfase	12
Figura 7 – Exemplo de sinal OFDM com pré-ênfase	13
Figura 8 - Efeitos do multipercurso sobre sistema uniportadora.....	14
Figura 9 - Símbolo OFDM com subportadoras sobrepostas espectralmente	14
Figura 10 - Combate a interferência intersimbólica com o aumento da duração do símbolo	15
Figura 11 - Transmissão OFDM.....	16
Figura 12 - Recepção OFDM	16
Figura 13 - Diagrama de constelação ilustrativo.	19
Figura 14 - Esquemático do experimento.....	20
Figura 15 - Diagrama de fluxo do código de transmissão	22
Figura 16 – Diagrama de fluxo do código de recepção	23
Figura 17 - Diagrama de fluxo do código de varredura do espectro.	24
Figura 18 - Resposta em frequência do canal com 490 amostras.....	25
Figura 19 - Resposta em frequência do canal com 49 amostras.....	25
Figura 20 - Resposta em frequência do canal e seu modelo matemático	26
Figura 21 - Simulação do efeito do pré-equalizador	27
Figura 22 – Espectro do sinal OFDM sem pré-ênfase enviado	29
Figura 23 – Espectro do sinal OFDM com pré-ênfase enviado.....	29
Figura 24 – Espectro do sinal OFDM sem pré-ênfase recebido.....	30
Figura 25 - Espectro do sinal OFDM com pré-ênfase recebido.	30
Figura 26 – Sinais sincronizados.	32
Figura 27 - Primeiras 1800 amostras dos sinais no tempo.	32
Figura 28 - Efeito da equalização na fase do sinal recebido.....	33
Figura 29 - Processo de equalização.....	34
Figura 30 – QPSK sem equalização e sem pré-ênfase; EVM médio de 35,13%	35

Figura 31 – QPSK com equalização e sem pré-ênfase; EVM médio de 6,42%.....	35
Figura 32 – QPSK com equalização e com pré-ênfase; EVM médio de 6,17%	35
Figura 33 – 16QAM sem equalização e sem pré-ênfase; EVM médio de 43,94%	36
Figura 34 – 16QAM com equalização e sem pré-ênfase; EVM médio de 6,24%.....	36
Figura 35 – 16QAM com equalização e com pré-ênfase; EVM médio de 5,79%	36
Figura 36 – QPSK com equalização e pré-ênfase num canal com $B_w=20\text{MHz}$	37
Figura 37 – Curvas de EVM x %Ruído para QPSK e 16QAM	38

LISTA TABELAS

Tabela 1 - Características do Osciloscópio.....	20
Tabela 2 – Características do AFG	21
Tabela 3 – Parâmetros principais estipulados.....	21
Tabela 4 - Parâmetros do Sinal OFDM	28
Tabela 5 - Valores de EVM requeridos pelo LTE para alguns tipos de modulação	38

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

VLC	Visible Light Communications
4G	Quarta Geração da Telefonia
5G	Quinta Geração da Telefonia
BBU	Unidade de Processamento Banda-Base
BER	<i>Bit Error Rate</i>
DBS	<i>Dual-mode Base Station</i>
EVM	<i>Error Vector Magnitude</i>
Fi-Wi	<i>Fiber Wireless</i>
GSM	<i>Global System for Mobile Communications</i>
GTMT	<i>Global Technology, Media and Telecom</i>
IM/DD	<i>Intensity Modulation/ Direct Detection</i>
IMT	<i>International Mobile Telecommunications</i>
ITU	<i>International Telecommunication Union</i>
LTE	<i>Long Term Evolution</i>
MZI	<i>Mach-Zehnder Interferometer</i>
MZM	<i>Mach-Zehnder Modulator</i>
RAPs	<i>Remote Access Point</i>
RF	<i>Radio Frequency</i>
RAUs	<i>Remote Antenna Unit</i>
RoF	<i>Radio over Fiber</i>
RRU	<i>Outdoor Remote Radio Unit</i>
W-CDMA	<i>Wideband Code Division Multiple Access</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	8
1.1	Objetivo Geral	8
1.2	Objetivos Específicos	9
2	EMBASAMENTO TEÓRICO	9
2.1	Equalizadores	9
2.2	A Técnica de Transmissão OFDM	13
2.2.1	Introdução e Concepção básica	13
2.2.2	Descrição de um transceptor OFDM.....	15
2.2.3	Fontes de Degradação de Desempenho da Técnica OFDM.....	17
2.3	A Métrica de Avaliação de Desempenho EVM	18
3	MÉTODOLOGIA E ETAPAS DO DESENVOLVIMENTO	19
3.1	Etapa 1 - Levantamento das características do Osciloscópio MDO 3012 Tektronix..	20
3.2	Etapa 2 – A Transcepção Através do Osciloscópio MDO 3012	21
3.3	Etapa 3 - Caracterização o canal de transmissão por onde é enviado o sinal.....	23
3.4	Etapa 4 – Determinação do modelo de pré-equalização a partir das características da resposta em frequência do canal.....	26
3.5	Etapa 5 - Parametrização do sistema OFDM a ser utilizado na análise experimental a partir das características das ferramentas e do canal utilizado.	27
3.6	Etapa 6 - Geração do sinal com o efeito pré-ênfase.	28
3.7	Etapa 7 - Processamento dos sinais recebidos e o levantamento das curvas e gráficos de desempenho.	31
3.7.1	Reamostragem e Sincronismo	31
3.7.2	Recepção do sinal OFDM e Equalização	33
4	ANÁLISE DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS	34
5	CONCLUSÃO	39
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	40
7	ANEXO I.....	41
7.1	CÓDIGO DE TRANSMISSÃO	41
7.2	CÓDIGO DE RECEPÇÃO	43
7.3	CÓDIGO DE CONVERSÃO VETOR PARA ASCII	44

1 INTRODUÇÃO

Uma tecnologia que vem emergindo rapidamente como uma solução atraente para a suplementação da transmissão de dados via rádio frequência é a Comunicação via luz visível, também conhecida pela sigla em inglês VLC (*Visible Light Communication*). A VLC é possibilitada a partir de uma propriedade chave dos diodos emissores de luz (LEDs em inglês *Light Emitting Diodes*), que permite a modulação em amplitude e em frequências suficientemente altas, para atingir taxas de transmissão significantes, ao mesmo tempo em que sua propriedade fundamental de iluminação não é afetada (JOVICIC et al, 2013). Entretanto, não basta adicionar uma fonte de sinal a um LED para que se tenha um sistema VLC funcional com alta capacidade de transmissão. Os LEDs brancos, mais utilizados nos *setups* VLC, devido ao seu baixo custo e baixa complexidade, possuem uma largura de banda estreita (Li et al, 2014). Para que a transmissão de dados via VLC atinja as altas taxas desejadas são necessárias algumas alterações na resposta em frequência dos sinais enviados.

Com o interesse de mitigar os efeitos da atenuação dos sinais através de canais com uma pequena largura de banda utiliza-se a técnica de pré-ênfase (Li et al, 2011). Para tanto, recorre-se a teoria de equalizadores a fim de projetar as distorções necessárias nos sinais transmitidos.

De acordo com Haykin e Van Veen (2001) equalizadores são um conjunto de filtros que amplificam ou atenuam certas faixas de frequência controlando a resposta em frequência de um determinado sinal a ser transmitido por um canal de transmissão específico. Os pré-equalizadores, são utilizados quando se tem o conhecimento prévio do comportamento da resposta em frequência de um canal. Dessa forma, equalizam a fim de amplificar as faixas de frequência atenuadas possibilitando, por exemplo, a ampliação da largura de banda.

1.1 Objetivo Geral

O objetivo deste trabalho é desenvolver um experimento onde se observe o efeito de um pré-equalizador de canal sobre o desempenho da transmissão de um sinal OFDM por um canal contendo um cabo coaxial de apenas um metro, ou conforme a literatura, um *back-to-back*.

1.2 Objetivos Específicos

A fim de alcançar o objetivo geral deste projeto, algumas atividades específicas foram listadas como etapas necessárias ao desenvolvimento do mesmo. Estas etapas estão listadas a seguir:

- Levantamento das características do Osciloscópio MDO 3012 Tektronix.
- Desenvolvimento do código em linguagem técnica MatLab para controle de envio e recepção dos sinais através do MDO 3012.
- Caracterização do canal de transmissão por onde é enviado o sinal.
- Determinação do modelo de pré-equalização a partir das características da resposta em frequência do canal.
- Parametrização do sistema OFDM a ser utilizado na análise experimental a partir das características das ferramentas e do canal utilizado.
- Geração e recepção dos sinais com pré-ênfase.
- Levantamento das curvas e gráficos de desempenho para avaliação do desempenho experimental.

Este trabalho encontra-se organizado da seguinte forma. No capítulo 2 é apresentado o embasamento teórico, no capítulo 3 aborda-se a metodologia e o desenvolvimento do projeto, no capítulo 4 faz-se a análise dos resultados obtidos, no capítulo 5 têm-se algumas conclusões sobre o projeto e no capítulo 6 são apresentadas as referências bibliográficas.

2 EMBASAMENTO TEÓRICO

2.1 Equalizadores

Um equalizador é uma ferramenta utilizada para compensar as distorções de módulo e fase geradas por um canal sobre a transmissão de um sinal de dados. De acordo com Haykin e Van Veen (2001), um equalizador deve ser projetado de tal maneira que, dentro da faixa de frequência de interesse, as repostas em módulo e em fase globais dessa conexão (canal +

equalizador) aproximam-se de uma condição para transmissão sem distorções dentro dos limites prescritos.

Considere, por exemplo, um canal de comunicação com resposta em frequência H_c e um equalizador com resposta em frequência H_{eq} . A resposta em frequência global desta combinação é $H_c H_{eq}$.

Suponha agora um sinal transmitido X e um sinal recebido Y , conforme a Figura 1, de tal forma que,

$$X H_c H_{eq} = Y \quad (1)$$

Para que a transmissão seja ideal, e os dados recebidos sejam iguais aos dados transmitidos, ou seja,

$$Y = X \quad (2)$$

Resolvendo a equação (1) o produto $H_c H_{eq}$ tem que ser 1, de forma que a condição (2) se verifique. De forma que $H_{eq} = k/H_c$, onde k é uma constante idealmente igual a 1, conforme a Figura 2.

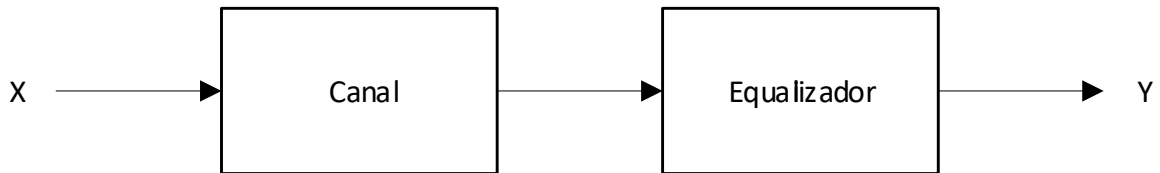


Figura 1 - Conexão em cascata de um canal dispersivo e um equalizador para transmissão sem distorções

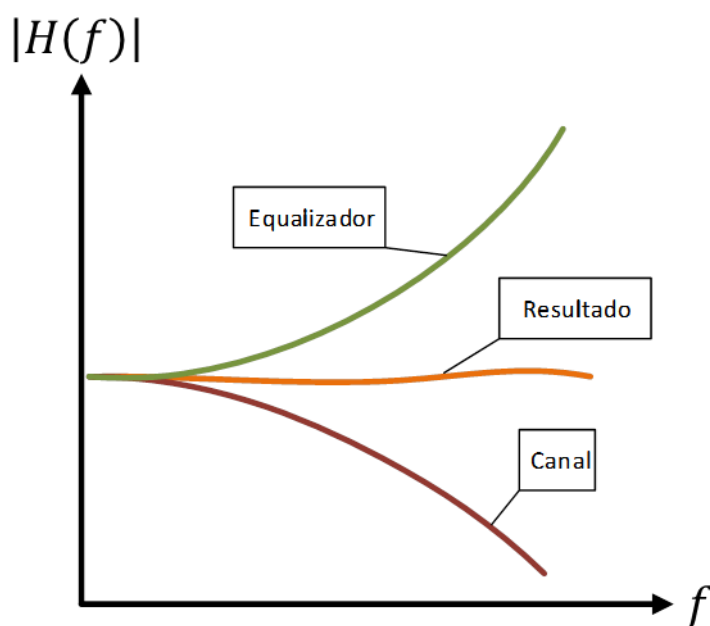


Figura 2 - Efeito de um equalizador sobre um canal

A Figura 3 ilustra como um canal afeta um dado sinal transmitido na recepção do mesmo.

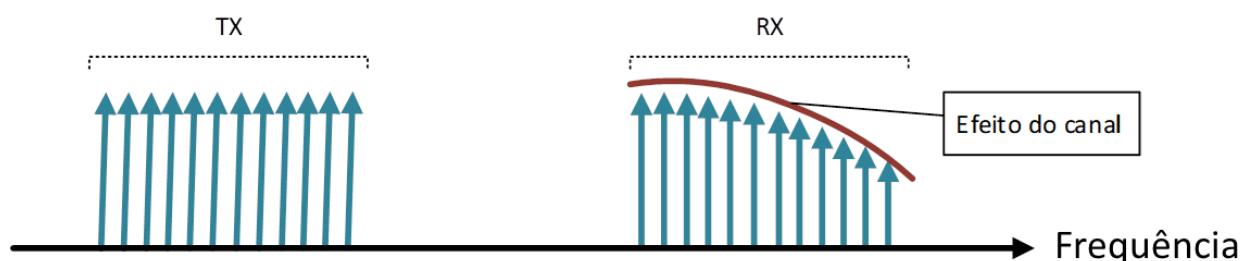


Figura 3 - Efeito de um canal sobre um sinal transmitido

Um pré-equalizador, assim como um equalizador, tem como intuito compensar os efeitos do canal sobre o sinal. Entretanto, um pré-ênfase, como também são chamados, atuam principalmente sobre as atenuações na amplitude causadas pelo canal. Estes, ao contrário dos equalizadores tradicionais, atuam antes da transmissão do sinal através do canal como mostrado na Figura 4, de forma a antecipar seus efeitos e obter na recepção um sinal de mais fácil tratamento como pode ser visto na Figura 5. Entretanto não dispensam a utilização de equalização na recepção. As Figuras 6 e 7 mostram exemplos de sinais OFDM sem e com pré-ênfase, respectivamente. É importante ressaltar que para obter a Figura 7, foi necessário fazer a convolução do sinal da Figura 6 com a resposta em frequência do pré-equalizador, mostrada em verde, na Figura 2.

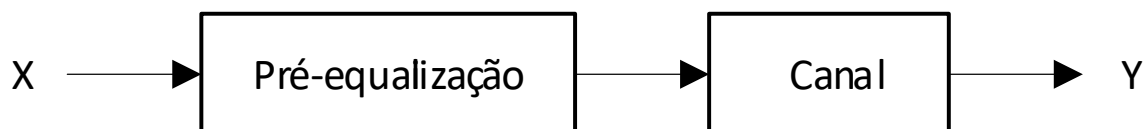


Figura 4 - Conexão em cascata pré-equalizador e um canal dispersivo.

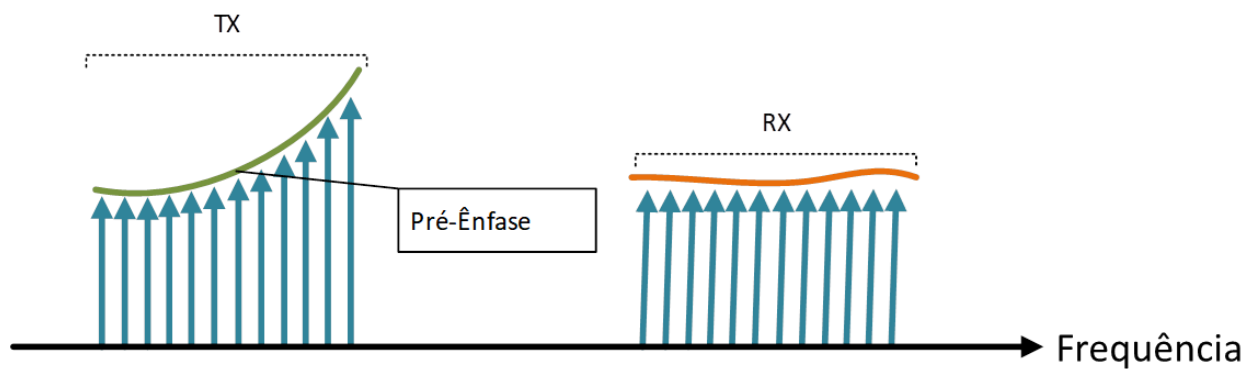


Figura 5 – Sinal com pré-ênfase sendo transmitido de forma a mitigar os efeitos do canal na recepção

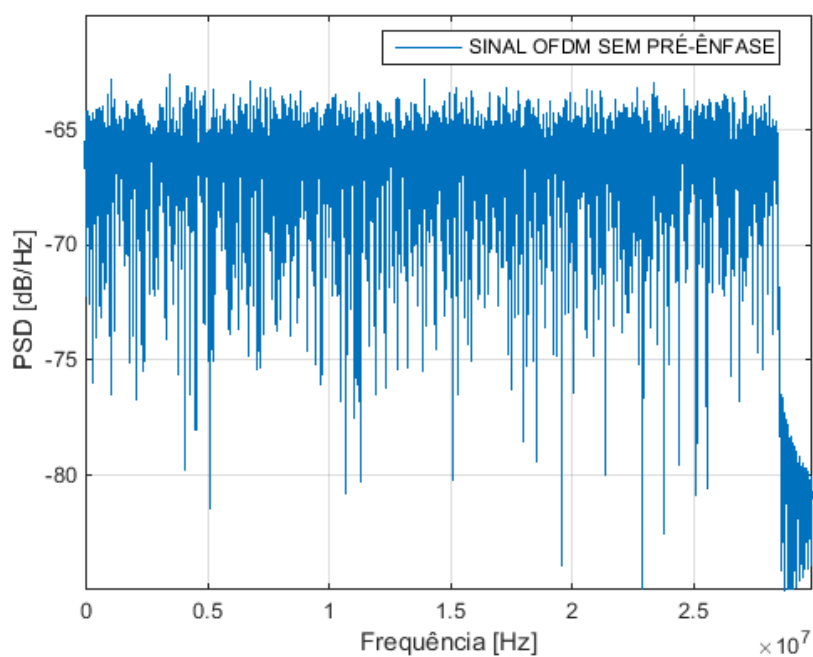


Figura 6 – Exemplo de sinal OFDM sem pré-ênfase

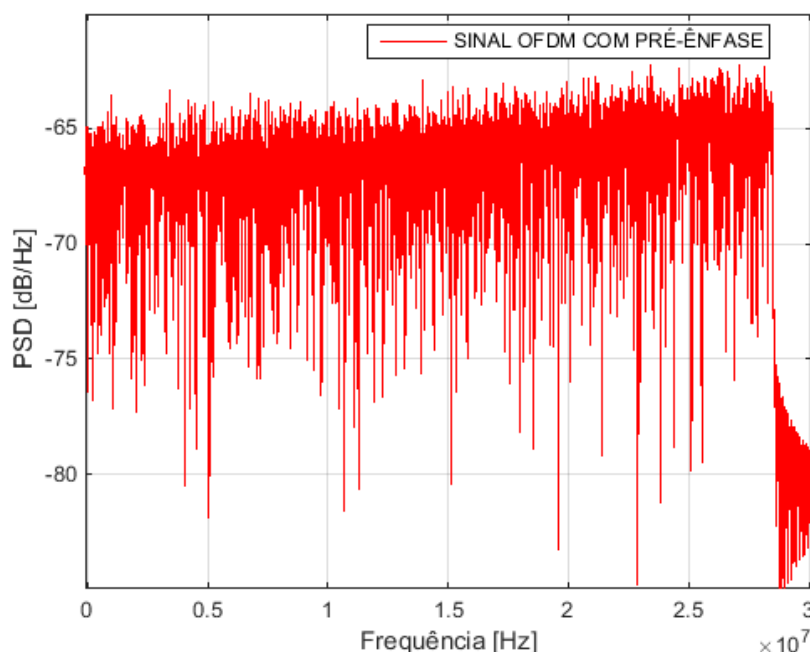


Figura 7 – Exemplo de sinal OFDM com pré-ênfase

2.2 A Técnica de Transmissão OFDM

2.2.1 Introdução e Concepção básica

A Multiplexação por divisão de frequências ortogonais OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) é utilizada como padrão de transmissão das tecnologias DAB (*Digital Audio Broadcasting*), DVB (*Digital Video Broadcasting*), W-LAN (*Wireless Local Area Network*), IEEE 802.16 (WiMAX), sistema de telefonia móvel LTE (*Long Term Evolution*), Sistema Brasileiro de Televisão Digital (SBTVD), entre outros (SILVA; SEGATTO, 2009). Essa modulação é preconizada como solução efetiva no combate interferência intersimbólica (SILVA; SEGATTO, 2009). Suas principais vantagens são a tolerância ao espalhamento por multipercurso mostrado na Figura 8, eficiência espectral, combate à interferência intercanal (ICI em inglês *inter-channel interference*) e simplicidade na equalização.

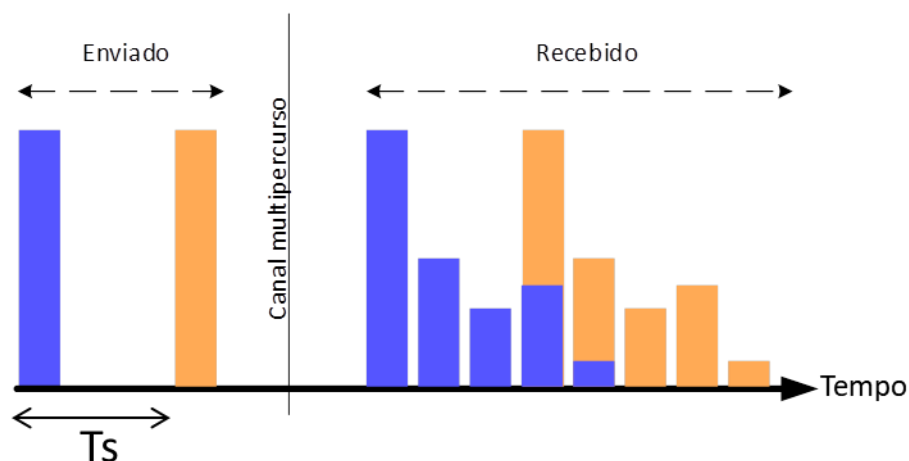


Figura 8 - Efeitos do multipercursos sobre sistema uniportadora

Segundo Pinto e Albuquerque (2002), em um sistema convencional de transmissão, os símbolos são enviados em sequência através de uma única portadora (modulada na taxa de símbolos da fonte de informação), cujo espectro ocupa toda a faixa de frequências disponível. A técnica OFDM possui como princípio básico a transmissão paralela de dados em várias subportadoras com modulação QAM ou PSK, que são ortogonais e espectralmente sobrepostas como mostrado na Figura 9 (PINTO; ALBUQUERQUE, 2002).

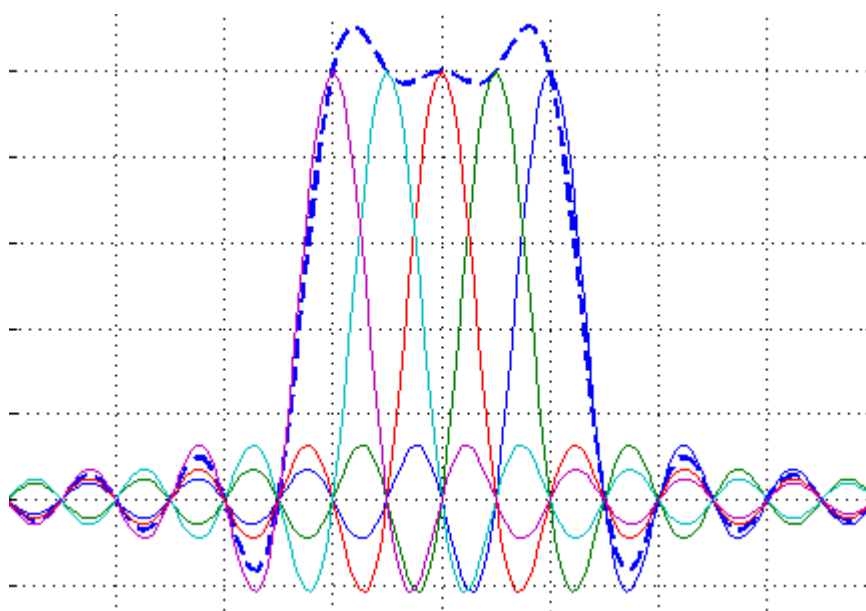


Figura 9 - Símbolo OFDM com subportadoras sobrepostas espectralmente

Para isso, a técnica divide o espectro de frequências do canal de transmissão em N_s subcanais, de tal forma que a duração T_s de um símbolo OFDM a ser transmitido seja

muito maior do que o retardo ou atraso de propagação do canal τ_{max} , minimizando assim os efeitos da interferência entre símbolos subsequentes, ISI (*Inter-symbol interference*) de forma eficiente (SILVA; SEGATTO, ANO) conforme a Figura 10.

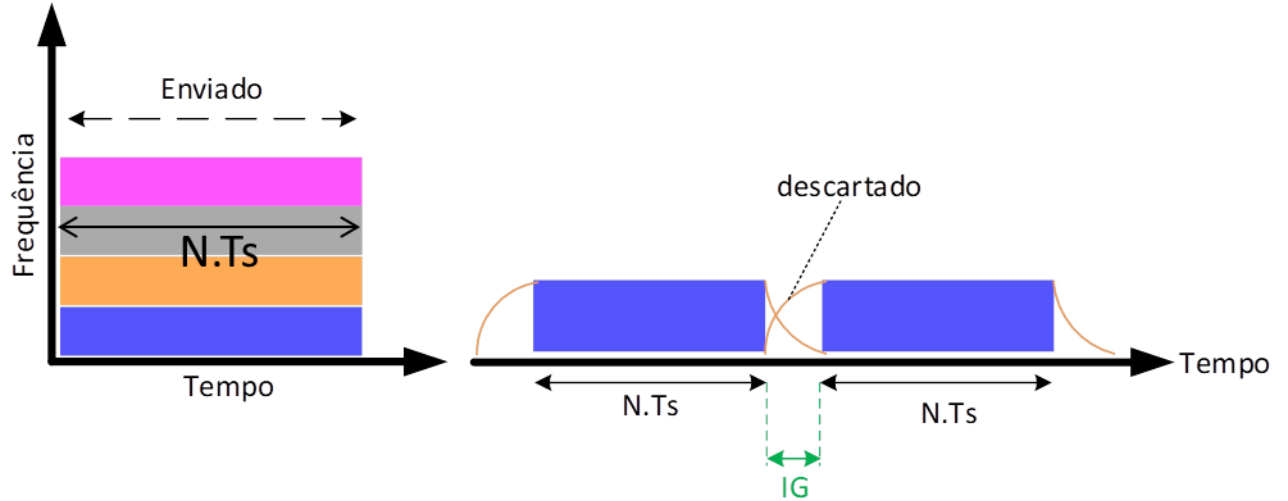


Figura 10 - Combate a interferência intersimbólica com o aumento da duração do símbolo

Os processos de modulação e demodulação desta técnica podem ser executados de forma simples utilizando-se, respectivamente, algoritmos IFFT (Inverse Fast Fourier Transform) e FFT (Fast Fourier Transform).

Para eliminar os efeitos da interferência entre subcanais, aplica-se uma extensão cíclica no símbolo em um intervalo de guarda, o qual simplifica o processo de equalização do canal.

2.2.2 Descrição de um transceptor OFDM

O processo de geração de um sinal OFDM é ilustrado na Figura 11. A sequência de dados digitais de entrada é dividida em N_s subsequências através de um conversor serial paralelo de m bits, sendo cada uma mapeada em um subsímbolo complexo $X = X_I + j X_Q$ em uma constelação de $M = 2^m$ níveis (SILVA; SEGATTO, 2009). Para que o símbolo OFDM tenha apenas coeficientes reais é aplicada uma simetria hermitiana sobre o sinal $X_k = [0, X_0, X_1, \dots, X_{Na-1}, 0, X_{Na-1}^*, \dots, X_1^*, X_0^*]^T$, onde $*$ representa o complexo conjugado. Dessa forma, o sinal é então transformado em um conjunto com $L = 2N_s + 2$ subsímbolos e são adicionados N_z zeros de forma que a quantidade de amostras na entrada do bloco da IFFT (*inverse fast Fourier transform*) seja uma potência de base 2, sendo $N_{fft} = N_z + L$.

Em seguida, efetua-se a multiplexação e/ou a modulação digital com IFFT e obtém-se uma sequência $x_n = [x_0, x_1, x_2, \dots, x_{N_{fft}-1}]$ de amostras no tempo. Insere-se, então, um prefixo cíclico CP, que transforma a sequência em $x_{cp} = [x_{N_{fft}-G}, \dots, x_{N_{fft}-1}, x_0, x_1, x_2, \dots, x_{N_{fft}-1}]$, onde G é o número de amostras do intervalo de guarda, o sinal é convertido de paralelo para série passa pelo conversor digital-analógico e então, é enviado pelo canal.

A Figura 12 ilustra os blocos básicos que constituem o receptor OFDM. Estes blocos são responsáveis por processos como a remoção do prefixo cíclico, a demodulação via FFT (*fast Fourier transform*), a remoção do *Zero Padding*, remoção da Simetria Hermitiana, equalização dos símbolos, demapeamento e a conversão paralelo-série. Além disso, há os estágios de reamostragem, sincronismo e equalização que serão tratados mais a fundo nos itens 3.7.1 e 3.7.2 deste texto.

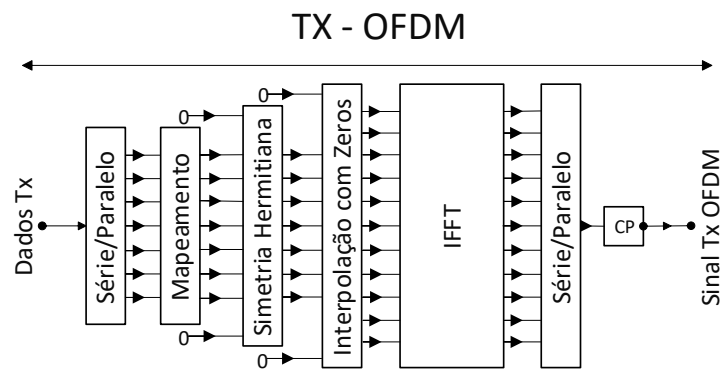


Figura 11 - Transmissão OFDM

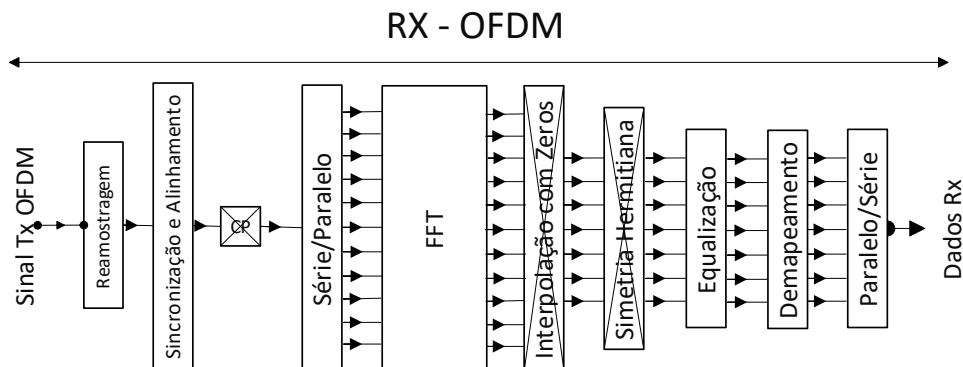


Figura 12 - Recepção OFDM

2.2.3 Fontes de Degradação de Desempenho da Técnica OFDM

De acordo com Pinto e Albuquerque (2002), em um receptor OFDM, as subportadoras serão ortogonais somente se a frequência da portadora do sinal recebido coincidir com a frequência do oscilador local. Ressalta-se que, qualquer descasamento entre estas subportadoras provoca ICI (PINTO; ALBUQUERQUE, 2002).

Pinto e Albuquerque (2002) destacam, ainda, a existência de três problemas em transmissão OFDM. O primeiro deles, o ruído de fase, ocorre quando um oscilador prático não produz uma portadora numa frequência exata, mas ao invés disso, é produzida uma portadora modulada em fase por um sinal aleatório (tremor de fase). Como resultado, a frequência que é a derivada temporal da fase, nunca será perfeitamente constante, podendo causar ICI na recepção.

Um segundo problema, relacionado a este fato, deve-se ao desvio de frequência associado à imprecisão na frequência de trabalho de um oscilador. O valor de frequência de um oscilador é, em geral, especificado com uma determinada margem de erro. Este erro pode causar uma diferença significativa entre as frequências dos osciladores do transmissor e do receptor, implicando também em ICI na recepção do sinal.

Importante ressaltar que, nos sistemas de portadora única, o ruído de fase e os desvios de frequência não são problemas significativos. Isto explica o fato de a sensibilidade ao ruído de fase, e o desvio de frequência, serem frequentemente mencionados como desvantagens dos sistemas OFDM em relação aos sistemas de portadora única. Todavia, embora os sistemas OFDM sejam mais suscetíveis ao ruído de fase e ao desvio de frequência que os sistemas de portadora única, estas degradações podem ser mantidas em níveis admissíveis.

Por fim, uma terceira fonte de degradação de sistemas OFDM, citado por Pinto e Albuquerque (2002), refere-se ao erro de temporização do símbolo, que causa maiores danos na recepção do sinal em sistemas de portadora única. Os autores explicam que, para uma determinada taxa de transmissão, os símbolos de um sistema de portadora única são, em geral, de duração muito menor que os símbolos do sistema OFDM que utilize a mesma banda, estando, portanto, mais sujeitos aos efeitos da maior ou menor precisão dos circuitos de extração de sincronismo de símbolo na recepção. Além disso, assim como também citado por Silva e Segatto (2009), a inclusão do intervalo de guarda no sistema OFDM aumenta ainda mais sua imunidade aos erros de temporização de símbolo.

2.3 A Métrica de Avaliação de Desempenho EVM

Para compreender o funcionamento da medida vetor magnitude do erro EVM (*Error Vector Magnitude*), considera-se o plano (In phase) versus Q (Quadrature), conforme a Figura 8, onde é apresentado o vetor de referência X_k , relativo a um dos possíveis símbolos transmitidos de coordenadas (X_I, X_Q) , o vetor medido Y_k , que ilustra um símbolo recebido de coordenadas (Y_I, Y_Q) , e o vetor de erro $D_k = Y_k - X_k$, o qual representa a distância Euclidiana entre tais sinais. Onde cada ponto do plano IQ é um dos 2^m possíveis símbolos gerados pela combinação de m bits. Qualquer desvio provocado por ruído e/ou distorção, inerentes aos sistemas de telecomunicações, nestes símbolos cria uma distância escalar entre os fasores, cujo erro de magnitude $E_k = |Y_k| - |X_k|$ e o erro de fase $\phi_k = \angle(Y_k) - \angle(X_k)$ são perfeitamente mensuráveis pela métrica EVM.

A medida EVM pode ser definida como o valor RMS (*root-mean-square*) da diferença entre um conjunto de símbolos medidos e um conjunto de símbolos transmitidos, matematicamente expresso pela relação,

$$EVM = \left[\frac{\frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} |Y_k - X_k|^2}{\frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} |X_k|^2} \right]^{\frac{1}{2}}$$

Onde N representa a quantidade de símbolos transmitidos/recebidos, $X_k = X_I + jX_Q$ e $Y_k = Y_I + jY_Q$ os símbolos complexos ideais e medidos, respectivamente. Entretanto, é comum encontrar na literatura a definição matemática da EVM conforme,

$$EVM = \sqrt{\frac{\frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} |D_k|^2}{X_{max}^2}}$$

Sendo $|D_k|^2 = |Y_k - X_k|^2$ o vetor erro de sinal, e X_{max} o ponto da constelação de maior amplitude. Esta última forma possui a vantagem de facilitar a implementação computacional da métrica.

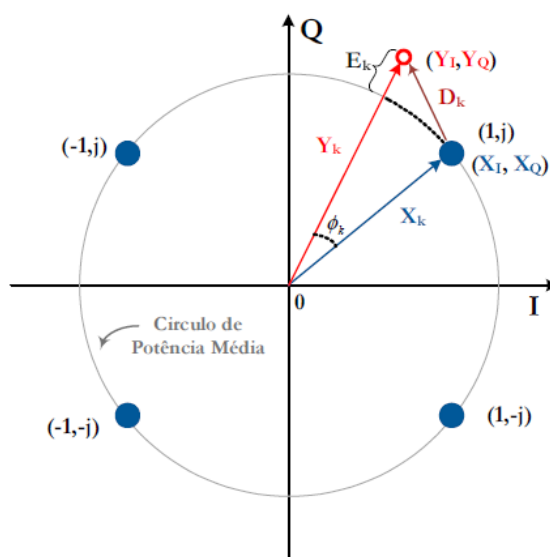


Figura 13 - Diagrama de constelação ilustrativo.

3 MÉTODOLOGIA E ETAPAS DO DESENVOLVIMENTO

Este experimento consiste na geração de um código para envio de sinais OFDM a partir do *software* MatLab conforme Figura 14. O sinal OFDM gerado é normalizado, convertido para ASCII e enviado a um osciloscópio modelo MDO 3012 da Tektronix com gerador de funções arbitrárias integrado (AFG), que converte o sinal digital em analógico e o transmite por um cabo coaxial de 1 metro (*back-to-back*). O sinal analógico é então recebido em uma entrada analógica do osciloscópio, onde é novamente digitalizado e mostrado em seu *display*. A partir do *display* o sinal digital recebido é enviado ao MatLab onde é feita a reamostragem, a sincronização, a remoção do prefixo cíclico, a remoção da simetria hermitiana e o demapeamento do sinal, além do levantamento de gráficos, diagramas de constelação e medidas de desempenho como a métrica EVM (*Error Vector Magnitude*).

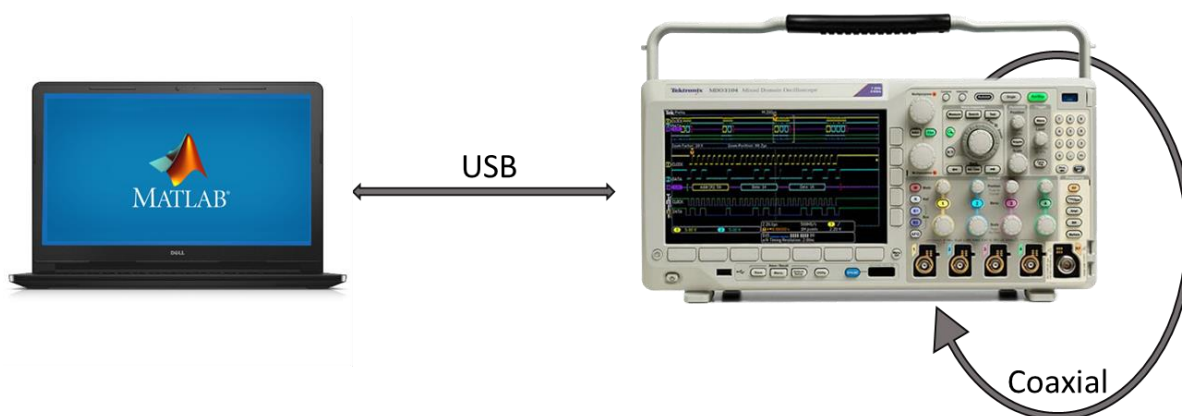


Figura 14 - Esquemático do experimento

3.1 Etapa 1 - Levantamento das características do Osciloscópio MDO 3012 Tektronix.

A fim de determinar as especificações do sistema OFDM a ser gerado, a largura de banda ocupada pelo sinal, a amplitude e alguns outros parâmetros, foi necessário conhecer algumas características do equipamento a ser utilizado. Na Tabela 1 estão listadas as características de acordo com os manuais do fabricante.

Largura de Banda	100 MHz
Entradas Analógicas	2
Entradas Digitais	16
Taxa de Amostragem	Até 2,5 GA/s
Comprimento de Registro	Até 10M pontos
Saídas de AFG	1

Tabela 1 - Características do Osciloscópio

Além das características do osciloscópio, foram levantadas características inerentes ao gerador de funções arbitrárias (AFG) do MDO 3012 que foram listadas na Tabela 2.

Formas de onda pré-definidas	Seno, Quadrada, Pulso, Rampa/Triangular, entre outras.
Frequência máxima da forma de onda gerada	50 MHz (Seno) 25 MHz (Todas as outras)
Quantidade limite de pontos de uma forma de onda gerada	131072 pontos
Impedância de saída do AFG	50 Ohms (nativo) Alta impedância (opcional)
Amplitude máxima do sinal gerado	2.5 Vpp (50 Ohms) 5 Vpp (Alta impedância)

Tabela 2 – Características do AFG

3.2 Etapa 2 – A Transcepção Através do Osciloscópio MDO 3012

Para transmissão e recepção dos sinais a partir do MDO 3012 foi elaborado um código no MatLab com auxílio do manual de programação do dispositivo. Este código é capaz de transmitir e receber qualquer uma das formas de ondas geradas desde que estas respeitassem as limitações definidas pelas características do dispositivo.

Alguns parâmetros foram definidos de forma que a transmissão e aquisição dos dados ocorressem sem maiores problemas. Estes parâmetros estão listados na Tabela 3.

Tensão pico a pico (Vpp)	2 V, de -1V a 1V
Impedância de saída do AFG (Zout)	50 Ω (Ohms)
Impedância da entrada do Canal 1 (Zin)	50 Ω (Ohms)
Número de amostras recebidas pelo display	10 k (amostras)
Período mínimo do sinal gerado	40 ns

Tabela 3 – Parâmetros principais estipulados

Os diagramas de fluxo mostrados nas Figuras 9 e 10, a seguir, ilustram o funcionamento dos códigos de transmissão e recepção, respectivamente.

Os códigos de transmissão e recepção encontram-se na íntegra no Anexo I.

Transmissão

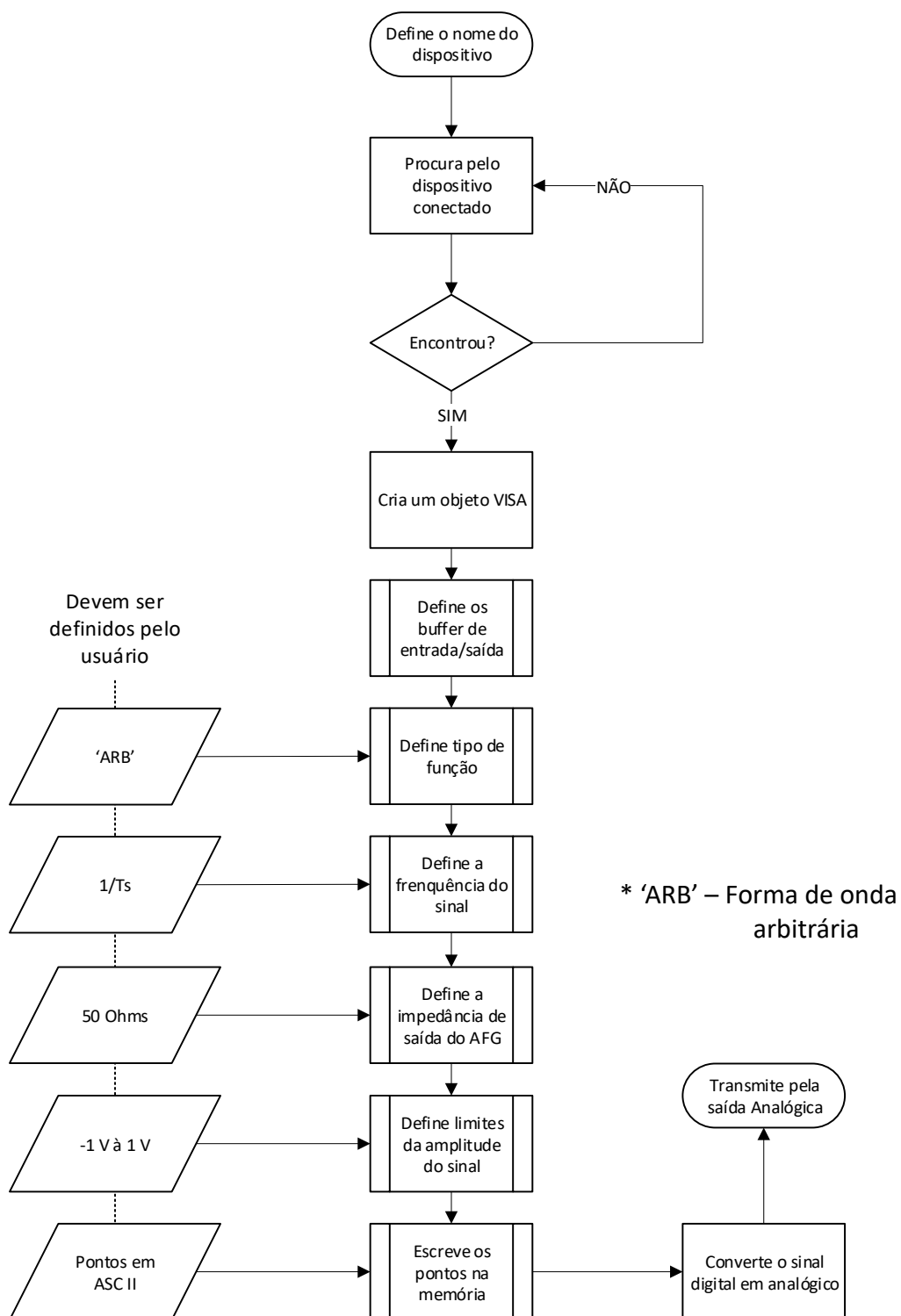


Figura 15 - Diagrama de fluxo do código de transmissão

Recepção

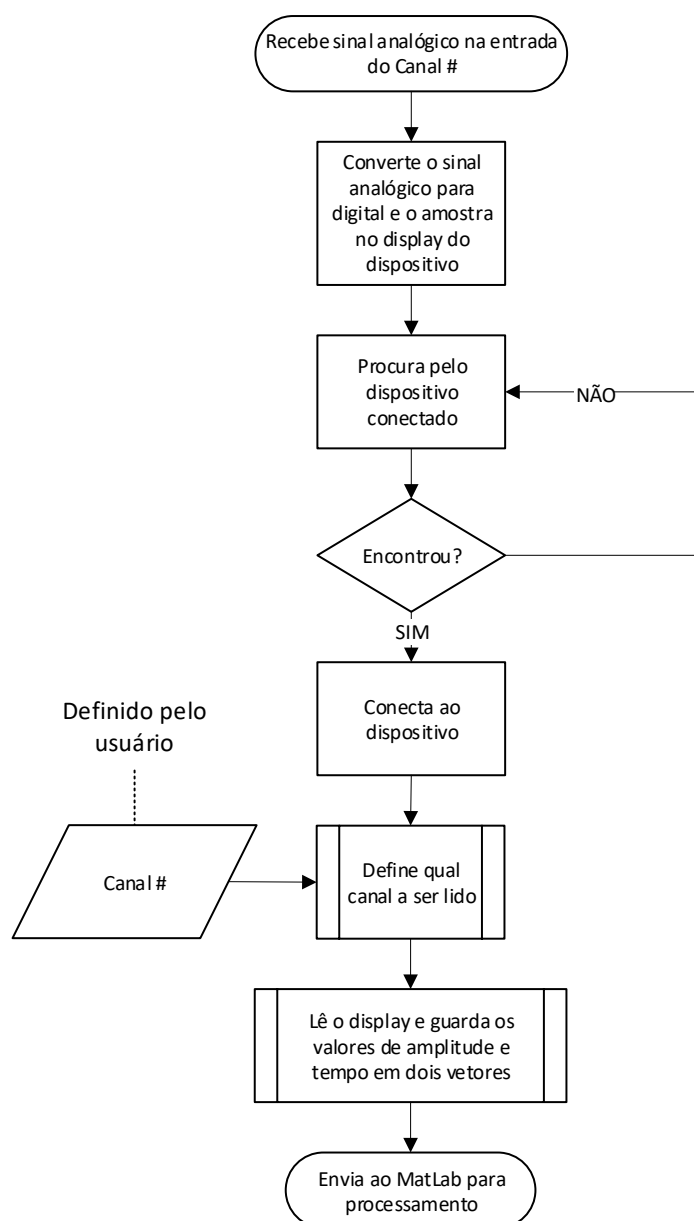


Figura 16 – Diagrama de fluxo do código de recepção

3.3 Etapa 3 - Caracterização o canal de transmissão por onde é enviado o sinal.

Para se desenvolver um pré-equalizador, é necessário conhecer os efeitos da resposta em frequência do canal sobre o sinal antes de enviá-lo, para que, a partir do modelo matemático do canal, seja possível adicionar ganhos nas faixas de frequências atenuadas e anular o efeito do canal na recepção.

Para determinar o modelo matemático do canal deste experimento, foi desenvolvido um código de varredura do espectro de frequência. A Figura 11, a seguir, mostra o funcionamento do código.

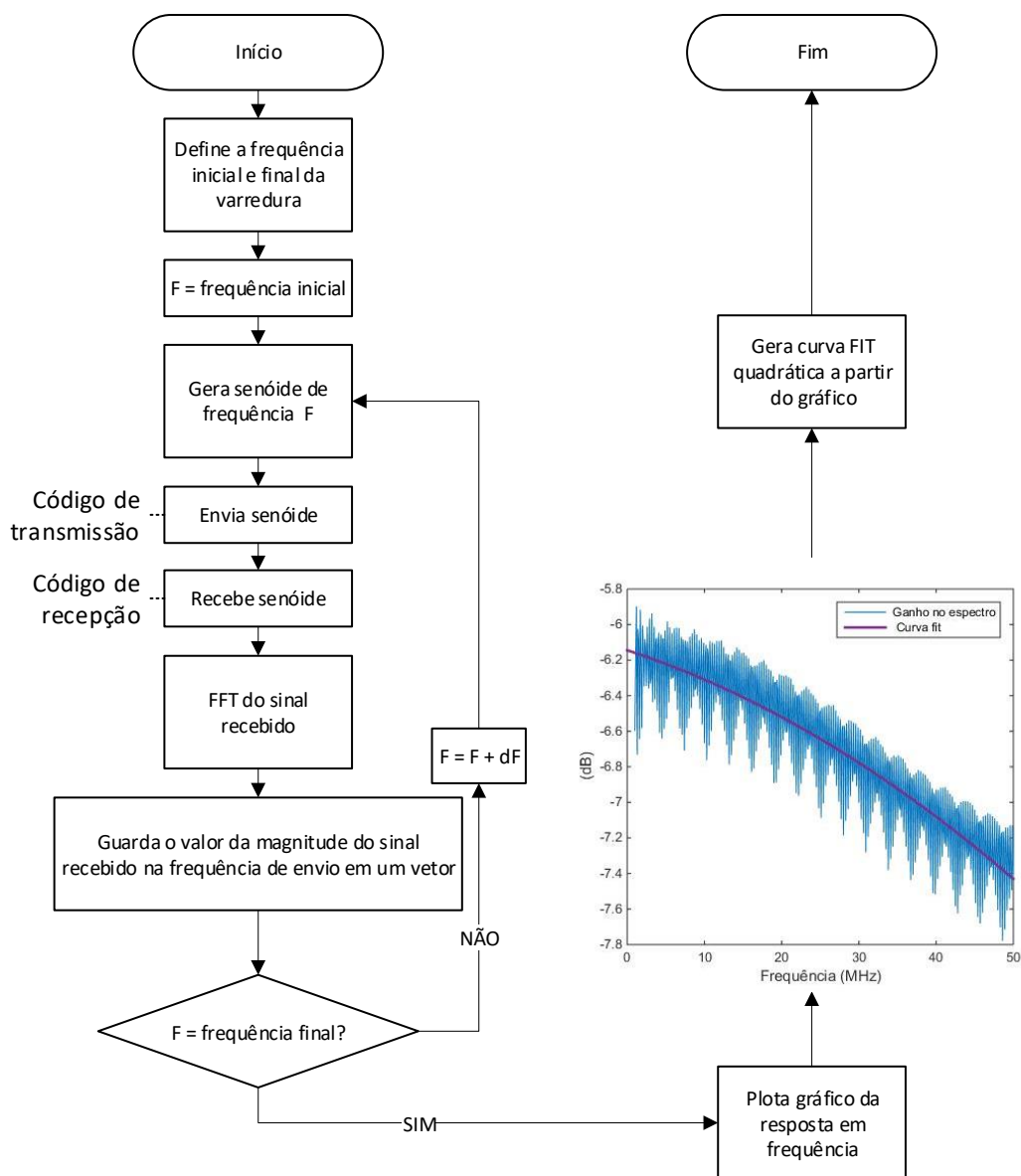


Figura 17 - Diagrama de fluxo do código de varredura do espectro.

Utilizando-se desta rotina criada, foram plotados alguns gráficos onde se variou a quantidade de intervalos iguais de 1 MHz para 49 amostras e 100 kHz para 490, entre as frequências inicial de 1 MHz e final de 50 MHz. O intuito era determinar se a variação da quantidade de pontos dos gráficos produziria uma variação brusca na equação que modela a

resposta em frequência do canal, obtida a partir de uma aproximação por uma curva fit quadrática.

As Figuras 12 e 13 mostram os gráficos obtidos com 490 e 49 pontos de medição, respectivamente.

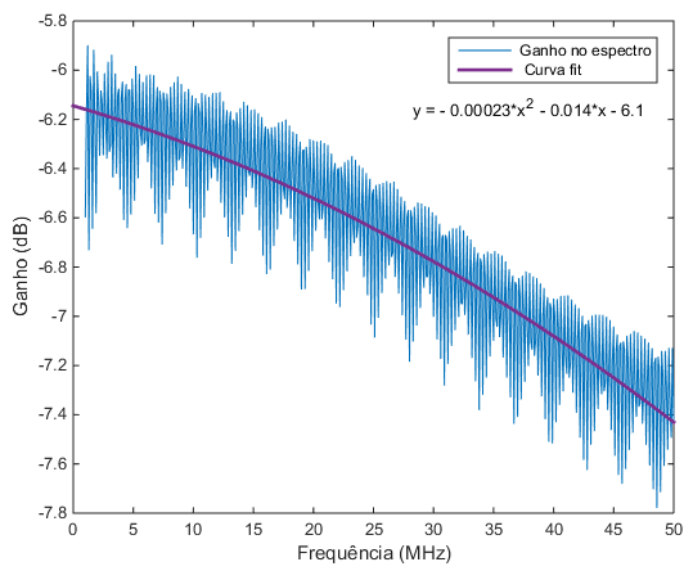


Figura 18 - Resposta em frequência do canal com 490 amostras

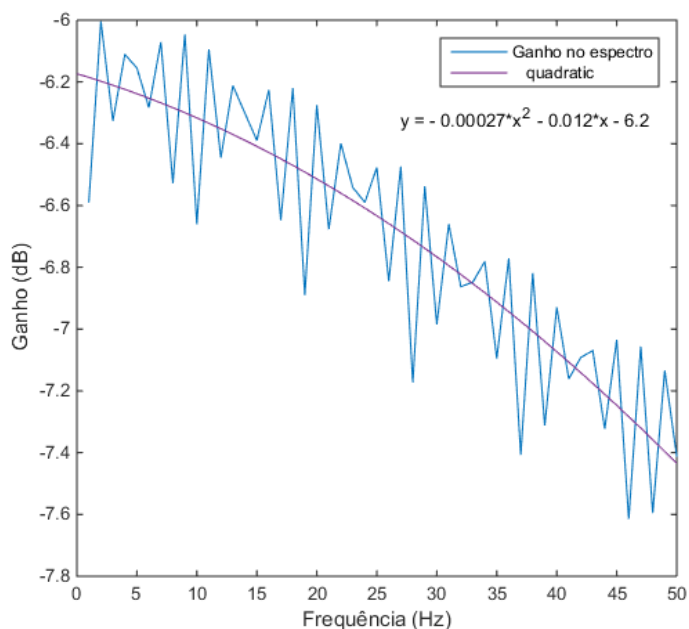


Figura 19 - Resposta em frequência do canal com 49 amostras.

Nota-se, a partir das equações mostradas em cada figura, que, apesar da diferença na quantidade de pontos que compõem as curvas, o modelo não sofre mudança significativa com a diminuição ou aumento desta quantidade.

3.4 Etapa 4 – Determinação do modelo de pré-equalização a partir das características da resposta em frequência do canal.

Para simular o efeito da pré-equalização sobre o sinal, foi plotado o gráfico de Amplitude x Frequência, conforme a Figura 14. Em seguida, tomou-se a equação da curva *fit* quadrática que modela a resposta em frequência do canal como a função $H_c(f)$ e fez-se $H_{eq}(f) = 1/H_c$, sendo, H_{eq} a função que modela o pré-equalizador.

Os modelos obtidos foram:

$$H_c(f) = -4.4603^{-17} f^2 - 2.7706^{-9} f + 0.95921$$

$$H_{eq}(f) = 1,0656^{-16} f^2 + 1,7676^{-9} f + 1,0486$$

É importante ressaltar que, a priori, não foram levados em consideração os efeitos do canal sobre a fase. O pré-equalizador, de fato, apenas insere ganhos na amplitude do sinal. Os efeitos de qualquer ruído de fase devem ser tratados na recepção por um equalizador específico.

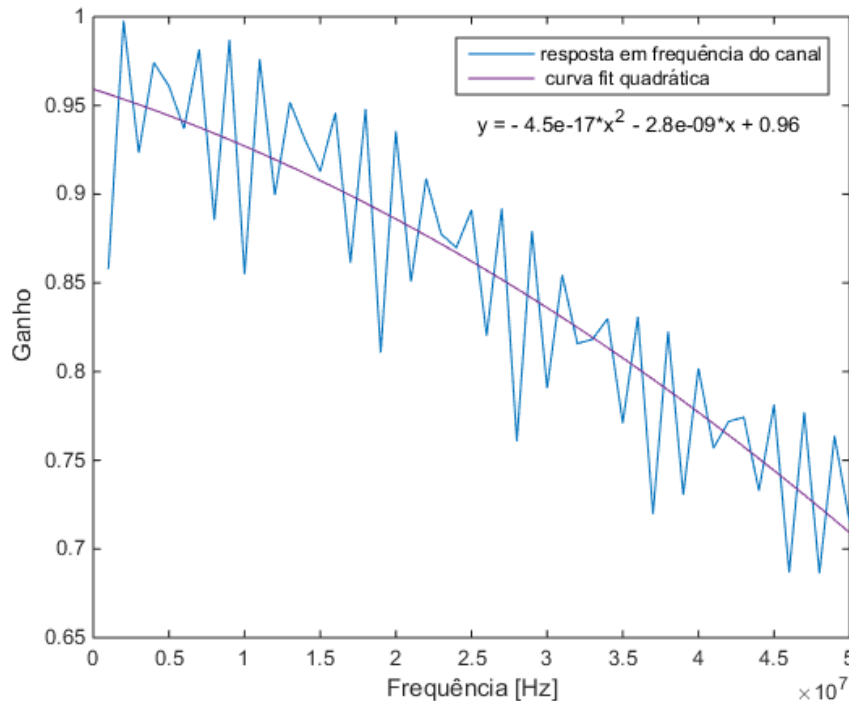


Figura 20 - Resposta em frequência do canal e seu modelo matemático

Por fim, plotou-se um gráfico, vide Figura 15, com as curvas dos modelos matemáticos do canal, do pré-equalizador e a convolução entre eles.

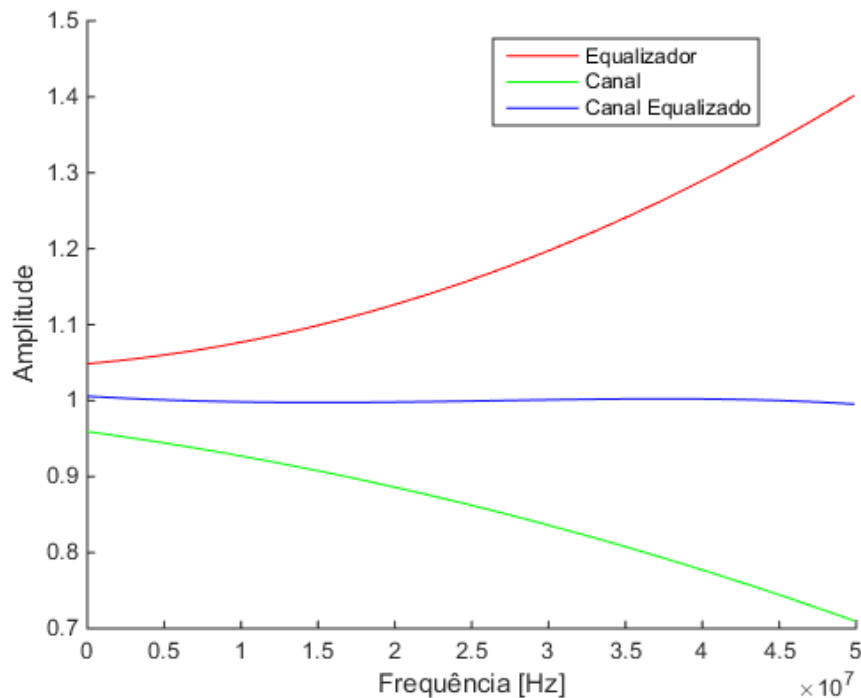


Figura 21 - Simulação do efeito do pré-equalizador

3.5 Etapa 5 - Parametrização do sistema OFDM a ser utilizado na análise experimental a partir das características das ferramentas e do canal utilizado.

A forma de onda proposta é um sinal OFDM devido à eficiência espectral deste tipo de modulação e por ser o padrão atual da maioria das tecnologias *wireless*.

As especificações do sinal foram baseadas no padrão LTE onde o cada subportadora ocupa 15 kHz e um símbolo possui uma duração $T_s = 66,7 \mu s$. A fim de observar com clareza o efeito de atenuação do canal, sem passar dos 50 MHz caracterizados, a quantidade de subportadoras N_s escolhida foi de 1900, totalizando uma banda ocupada pelo sinal Bw_s de 28,5 MHz, que explicita claramente a atenuação do canal como pode ser observado na Figura 24. Para esta quantidade de subportadoras uma IFFT/FFT de 2048 amostras seria suficiente. Todavia, como a transmissão é feita em banda base há ainda a introdução de simetria hermitiana no processo que dobra a quantidade de pontos da IFFT/FFT, por isto, é necessário que $N_{ifft} = N_{fft} = 4096$. Além disso, é adicionado um CP com $N_{cp} = 256$ amostras, totalizando 4352 amostras.

O Mapeamento do sinal foi feito em QPSK e 16-QAM para comparação e análises de desempenho.

A Tabela 4 lista os parâmetros definidos.

T_s	66,7 μs
N_s	1900
Bw_s	28,5 MHz
N_{fft}	4096
N_{cp}	256
N_{total}	4352
M	4 (PSK)
	16 (QAM)

Tabela 4 - Parâmetros do Sinal OFDM

3.6 Etapa 6 - Geração do sinal com o efeito pré-ênfase.

Nesta etapa, é desenvolvido um código que executa a convolução do sinal gerado com a função que modela o funcionamento do pré-equalizador H_{eq} . Para tanto, inicialmente, o sinal gerado que se encontra no domínio do tempo transformado via FFT para o domínio da frequência dessa forma a convolução passa a ser apenas uma multiplicação simples dos vetores de sinal e pré-equalização ponto a ponto. Em seguida, para gerar o vetor de pré-equalização, cria-se um vetor frequência de 0 a 50 MHz com a mesma quantidade de amostras do vetor do sinal na frequência e multiplica-se cada ponto por H_{eq} , este vetor é então espelhado para frequências negativas dado que a função que gera o sinal na frequência produz um espectro bilateral.

Por fim, após a multiplicação dos dois vetores obtém-se o sinal pré-equalizado na frequência, que, em seguida, é transformado para o domínio do tempo via IFFT. Antes de ser transmitido o vetor que contém o sinal ainda é normalizado e convertido para ASCII.

A Figura 16 e a Figura 17 mostram o espectro dos sinais gerados sem e com pré-equalização respectivamente antes da transmissão.

A Figura 18 e a Figura 19 mostram o espectro dos sinais recebidos sem e com pré-equalização respectivamente.

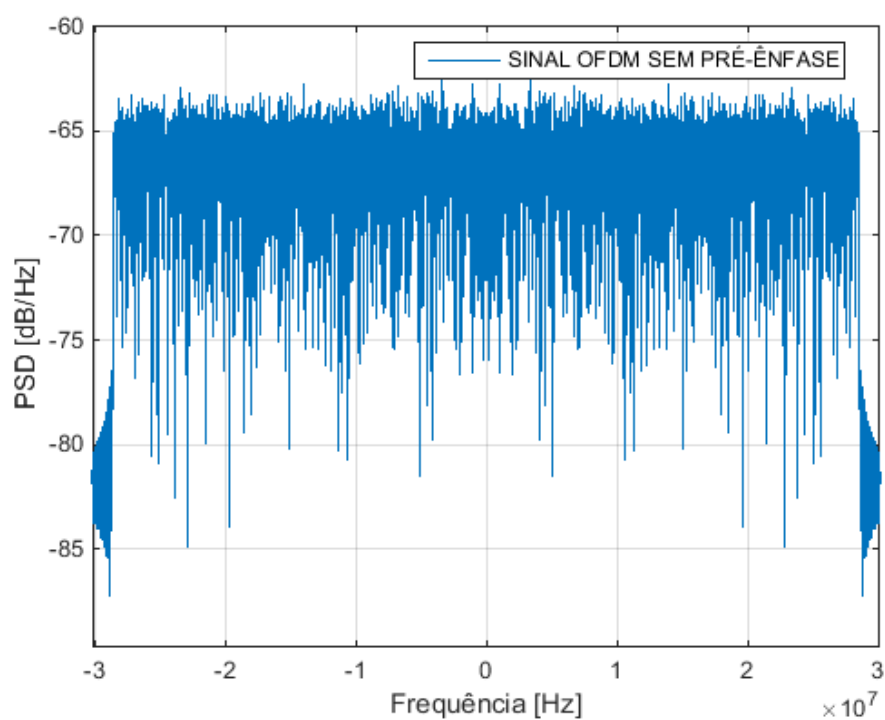


Figura 22 – Espectro do sinal OFDM sem pré-ênfase enviado

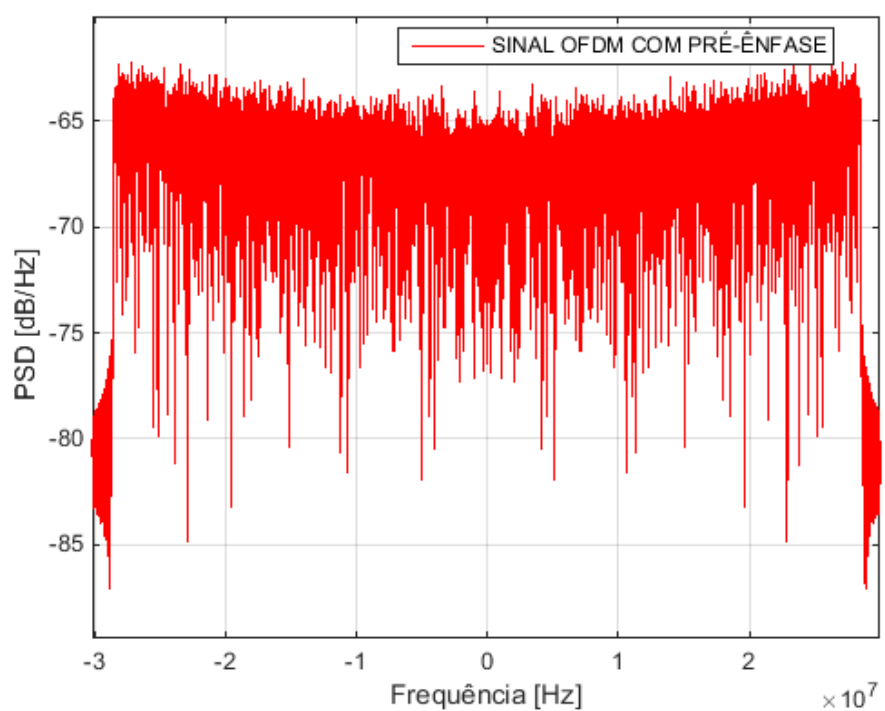


Figura 23 – Espectro do sinal OFDM com pré-ênfase enviado.

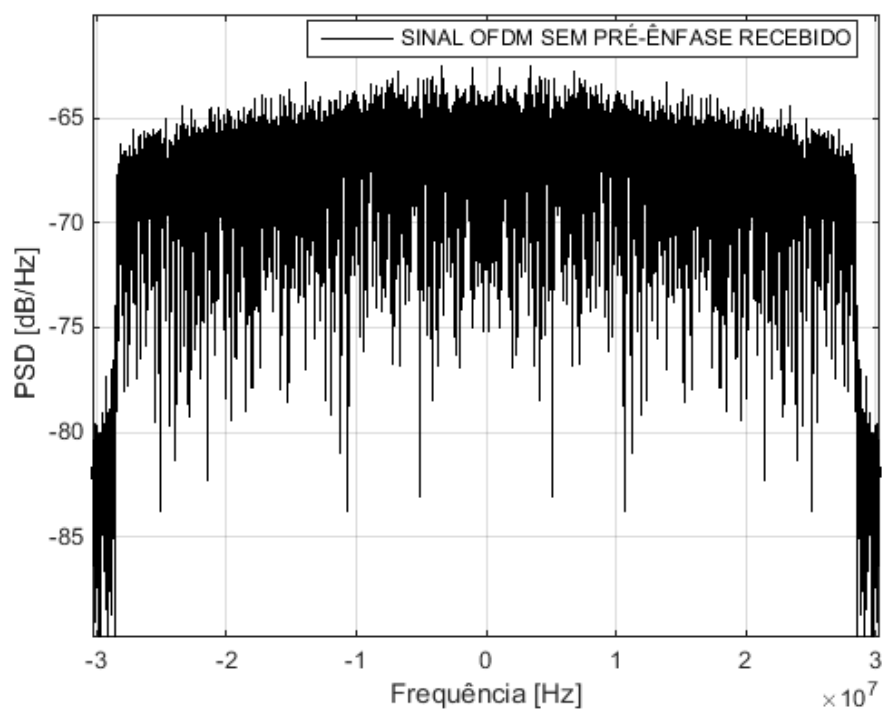


Figura 24 – Espectro do sinal OFDM sem pré-ênfase recebido.

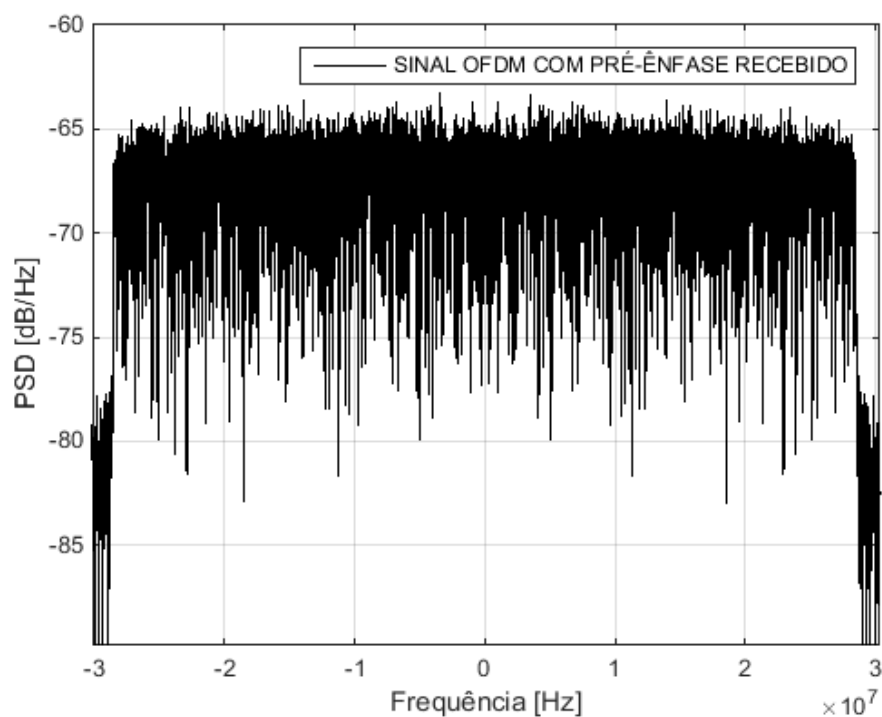


Figura 25 - Espectro do sinal OFDM com pré-ênfase recebido.

3.7 Etapa 7 - Processamento dos sinais recebidos e o levantamento das curvas e gráficos de desempenho.

O processamento do sinal foi a parte mais onerosa deste experimento e foi dividida em duas partes, a primeira explana o código de reamostragem e sincronismo e a segunda explica as etapas da recepção OFDM e equalização.

3.7.1 Reamostragem e Sincronismo

O sinal recebido através do display do osciloscópio MDO 3012 é um vetor com dez mil amostras referentes a um período total de 100µs, dessa forma é necessário fazer um *downsampling* do sinal para que possamos sincronizá-lo e recebe-lo.

Para fazer o *downsampling*, primeiramente calcula-se a razão entre as taxas de amostragem do sinal enviado ao AFG e do sinal recebido do osciloscópio. A primeira é calculada pela seguinte expressão:

$$Fa_{AFG} = N_t / T_s = 4352 / 66,667e^{-6}$$

A segunda, do sinal recebido do osciloscópio, é calculada como,

$$Fa_{MDO} = \frac{1}{t_2 - t_1}$$

Onde t_2 é o tempo da segunda amostra do sinal recebido e t_1 é o tempo da primeira amostra.

Utilizando-se da função *resample* do MatLab o sinal recebido com dez mil amostras sofre o *downsampling* de razão Fa_{AFG}/Fa_{MDO} e passa a ter 6528 amostras.

O sinal recebido reamostrado é, então, alinhado com o sinal enviado utilizando-se da função *alignsignals* que faz o alinhamento dos sinais e informa a partir de qual amostra os sinais estão completamente alinhados, para isso ela atrasa um dos sinais de D amostras colocando D zeros no vetor atrasado. Se o vetor atrasado é o recebido, todos os D zeros são então retirados e as seguintes 4352 amostras deste vetor são guardadas. Caso o vetor atrasado seja o enviado então se guarda as 4352 amostras do vetor recebido, seguintes ao valor de D .

Por fim, utiliza-se a função *correl* que executa uma correlação cruzada para ajustar a posição dos vetores enviado/recebido, ambos com 4352 amostras.

A Figura 18 mostra o zoom do sinal recebido sincronizado com sinal enviado.

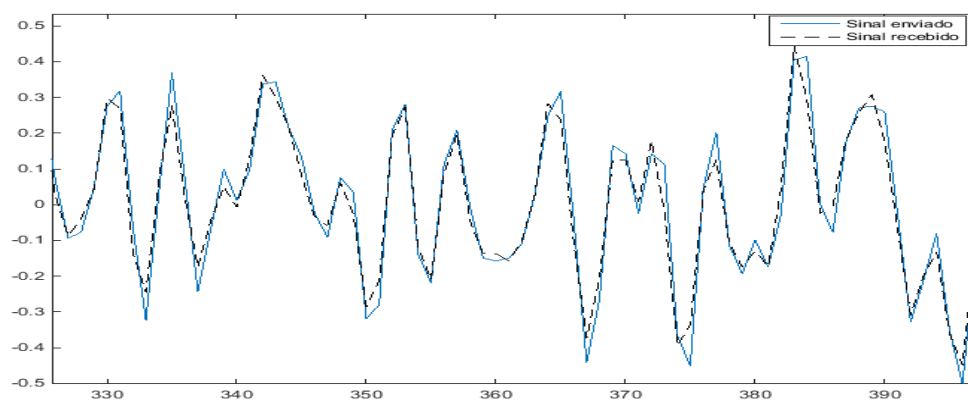


Figura 26 – Sinais sincronizados.

A Figura 21 mostra as primeiras 1800 amostras dos sinais enviado, recebido reamostrado e os sinais alinhados, respectivamente.

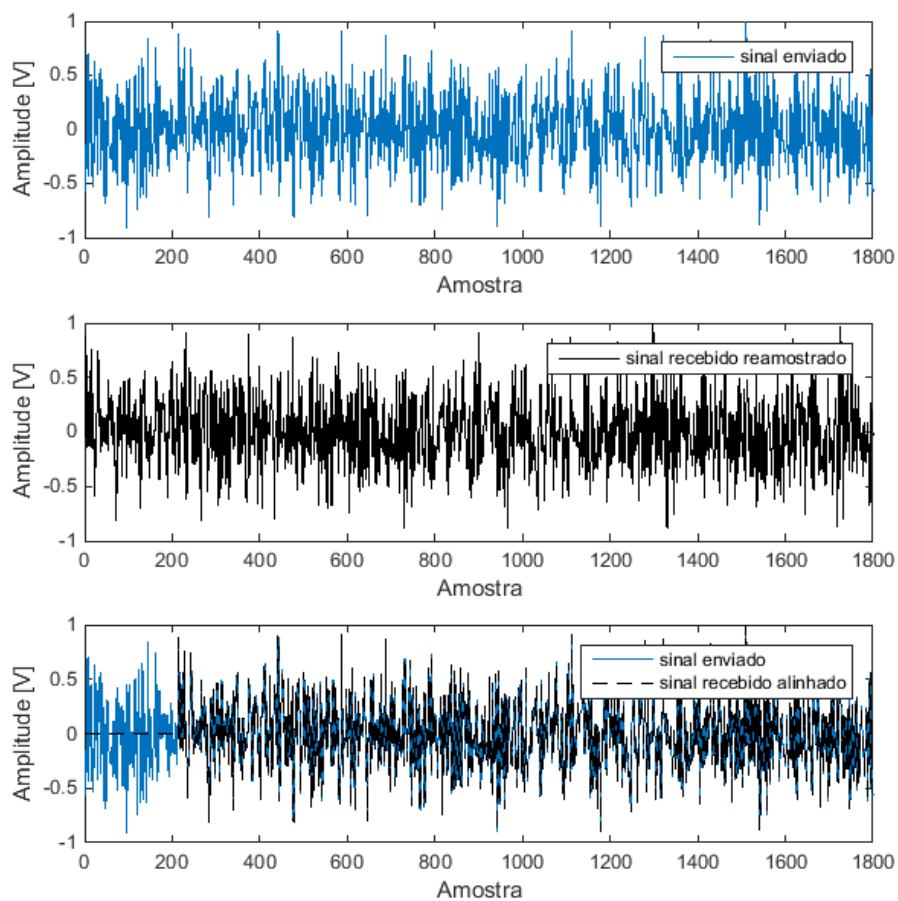


Figura 27 - Primeiras 1800 amostras dos sinais no tempo.

3.7.2 Recepção do sinal OFDM e Equalização

Após a reamostragem e a sincronização do sinal é feita a recepção do sinal OFDM conforme o método ilustrado anteriormente na Figura 7. Remove-se o prefixo cíclico, remove-se a simetria hermitiana, equalizam-se os símbolos, tem-se o demapeamento do sinal, a transformação paralelo-série e obtém-se finalmente o sinal com 1900 amostras.

A equalização dos símbolos recebidos foi feita conforme ilustrado na Figura 29. Inicialmente foram escolhidas 100 subportadoras piloto igualmente espaçadas entre as 1900 subportadoras enviadas. Entretanto, percebeu-se que diminuindo a quantidade de subportadoras piloto para 10 não afetava o desempenho da equalização, de forma que se padronizou 10 subportadoras piloto para todo o experimento. Neste caso, escolhe-se uma a cada 190 subportadoras começando pela de índice 190, a segunda sendo a de índice 280 e assim por diante. Divide-se, então, cada subportadora piloto recebida pela sua correspondente enviada, o resultado desta divisão é o desvio de amplitude e fase de cada símbolo. Cada valor deste é armazenado em um vetor de equalização na posição correspondente ao seu índice e nas posições anteriores até imediatamente antes do índice 0 ou da subportadora piloto anterior. Por exemplo, o desvio de amplitude e fase da primeira subportadora piloto, de índice 190, é utilizado para todas as subportadoras anteriores a ela de 1 à 189, o desvio da segunda subportadora piloto, de índice 280, é utilizado para todas as subportadoras de 191 à 279 e assim sucessivamente até que gera-se um vetor de equalização de 1900 posições com os desvios de amplitude e fase das 10 subportadoras piloto. O vetor do sinal recebido é, então, dividido pelo vetor de equalização gerado. O efeito da equalização na fase pode ser visto na Figura 28.

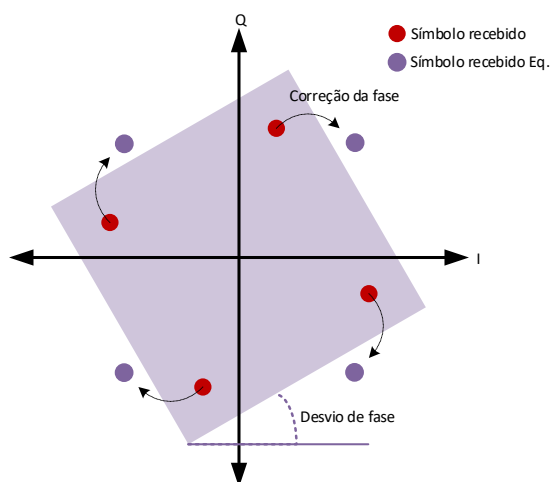


Figura 28 - Efeito da equalização na fase do sinal recebido

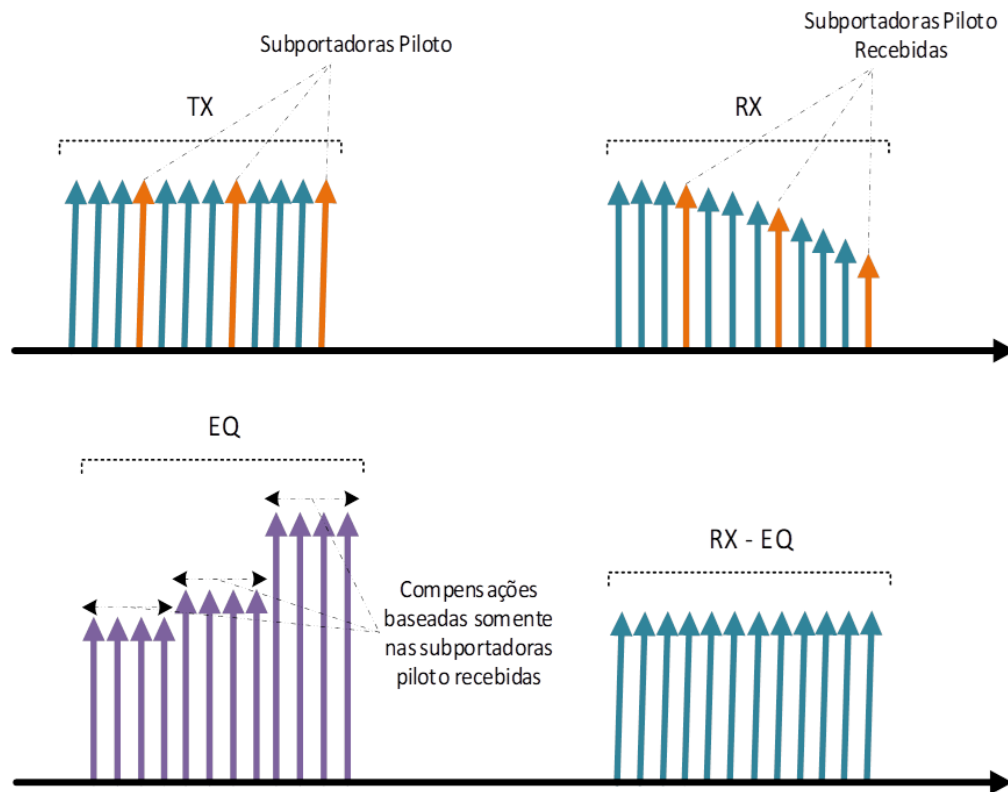


Figura 29 - Processo de equalização

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Foram levantados os diagramas de constelação e a medida EVM em percentual para as transmissões com mapeamento QPSK e 16-QAM nas seguintes configurações:

- i. Sem equalização e sem pré-ênfase;
- ii. Com equalização e sem pré-ênfase;
- iii. Com equalização e com pré-ênfase.

Para tanto, cada diagrama de constelação é populado por 30 iterações do sinal. Além disso, cada diagrama consta com a média entre os valores EVM de todas as iterações.

$$EVMm = 1/30 \sum_{k=1}^{30} EVM_k$$

As Figuras 30, 31 e 32 mostram os diagramas obtidos para o mapeamento Q-PSK.

As Figuras 33, 34 e 35 mostram os diagramas obtidos para o mapeamento 16-QAM.

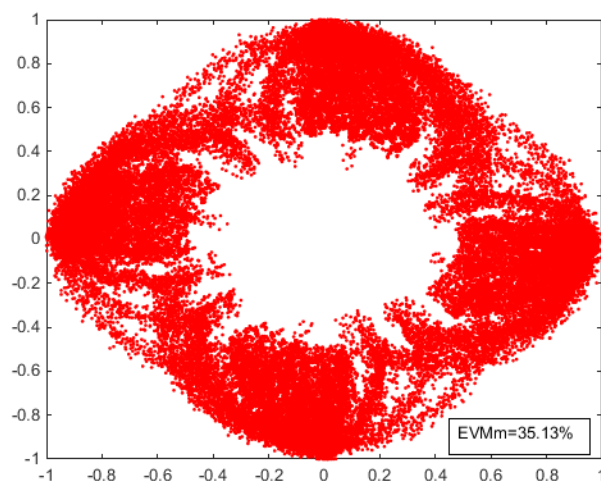


Figura 30 – QPSK sem equalização e sem pré-ênfase; EVM médio de 35,13%

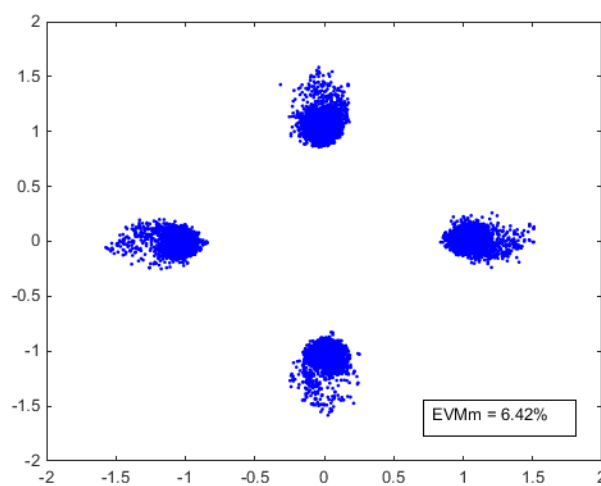


Figura 31 – QPSK com equalização e sem pré-ênfase; EVM médio de 6,42%

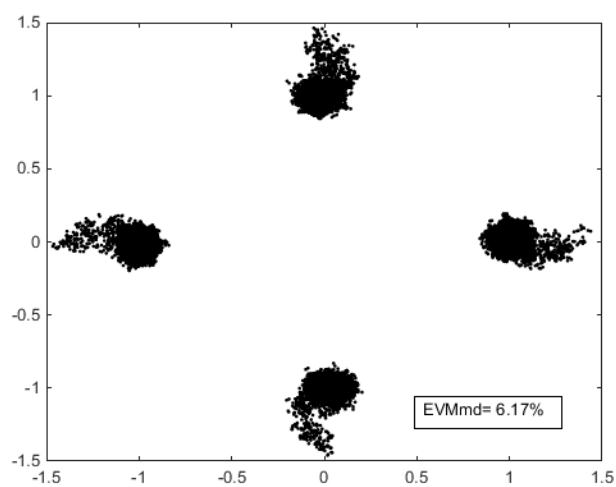


Figura 32 – QPSK com equalização e com pré-ênfase; EVM médio de 6,17%

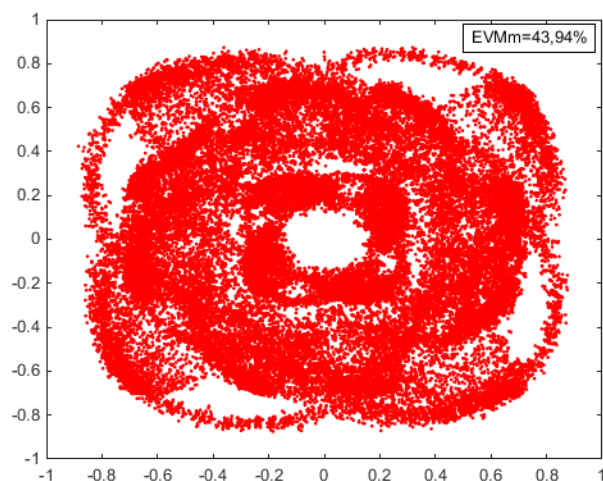


Figura 33 – 16QAM sem equalização e sem pré-ênfase; EVM médio de 43,94%

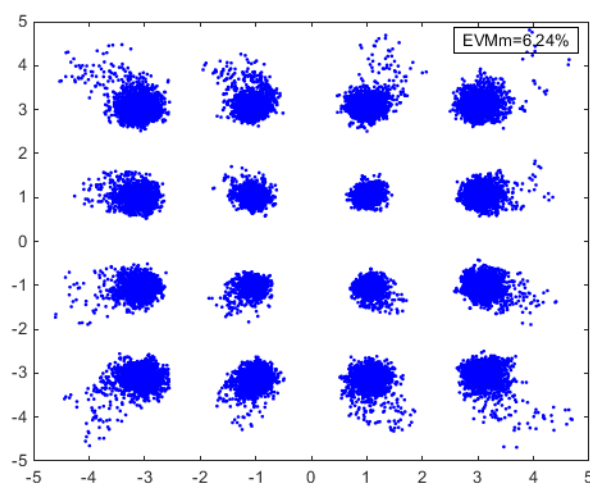


Figura 34 – 16QAM com equalização e sem pré-ênfase; EVM médio de 6,24%

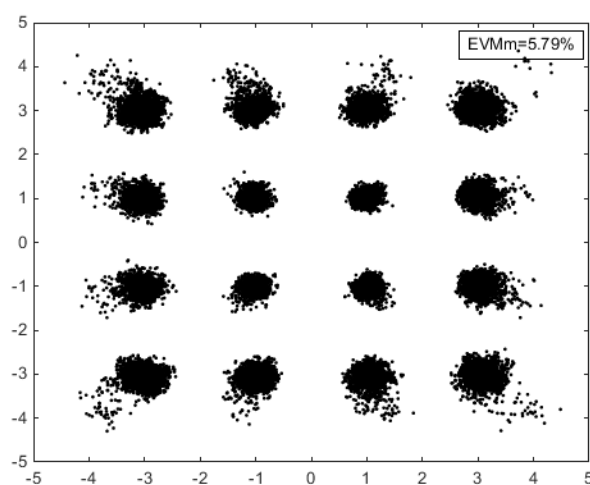


Figura 35 – 16QAM com equalização e com pré-ênfase; EVM médio de 5,79%

A partir das figuras observa-se que a transcepção dos sinais sem qualquer tipo de equalização sofre desvios significativos de fase e amplitude, dificultando o demapeamento dos símbolos e gerando erros na recepção.

Com a introdução da equalização na recepção do sinal nota-se uma melhora expressiva no aspecto das constelações geradas e no EVM, mostrando que as correções nos desvios de fase e amplitude são primordiais para a transmissão de sinais OFDM de forma efetiva.

Com a introdução do pré-equalizador a constelação dos sinais melhora de forma quase imperceptível e seu EVM sofre uma melhora irrisória.

Nota-se a partir dos diagramas de constelação que mesmo após a equalização existem distorções nos símbolos recebidos, isso se deve as distorções nos símbolos transmitidos pelas subportadoras de frequências mais altas. O efeito não é visto quando reduzimos a banda do canal para 20Mhz, a Figura 36 mostra o diagrama de constelação obtido quando o canal filtra os sinais de frequências mais altas.

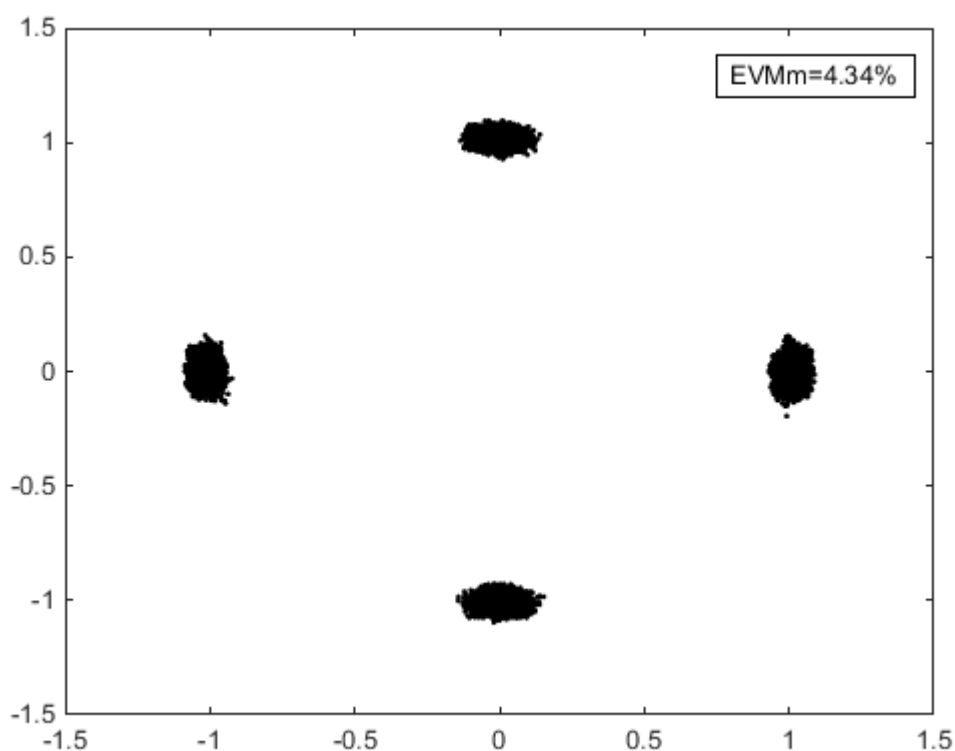


Figura 36 – QPSK com equalização e pré-ênfase num canal com Bw=20MHz.

Além disso, foram levantadas as curvas de EVM(%) por %Ruído para QPSK e 16QAM variando-se o percentual de ruído na saída do AFG que podem ser vistas na Figura 37. Onde %Ruído é dado pelo valor da amplitude do ruído inserido [V] dividido pela amplitude máxima do sinal [V] multiplicado por 100.

É importante ressaltar que esta curva foi gerada na configuração com equalização e com pré-ênfase nos dois tipos de modulação. Os tracejados são os EVM requeridos máximos para uma transmissão razoável no padrão LTE de acordo com a tabela 5.

Tipo de Modulação	EVM(%) requerido
QPSK	17.5%
16QAM	12.5%

Tabela 5 - Valores de EVM requeridos pelo LTE para alguns tipos de modulação

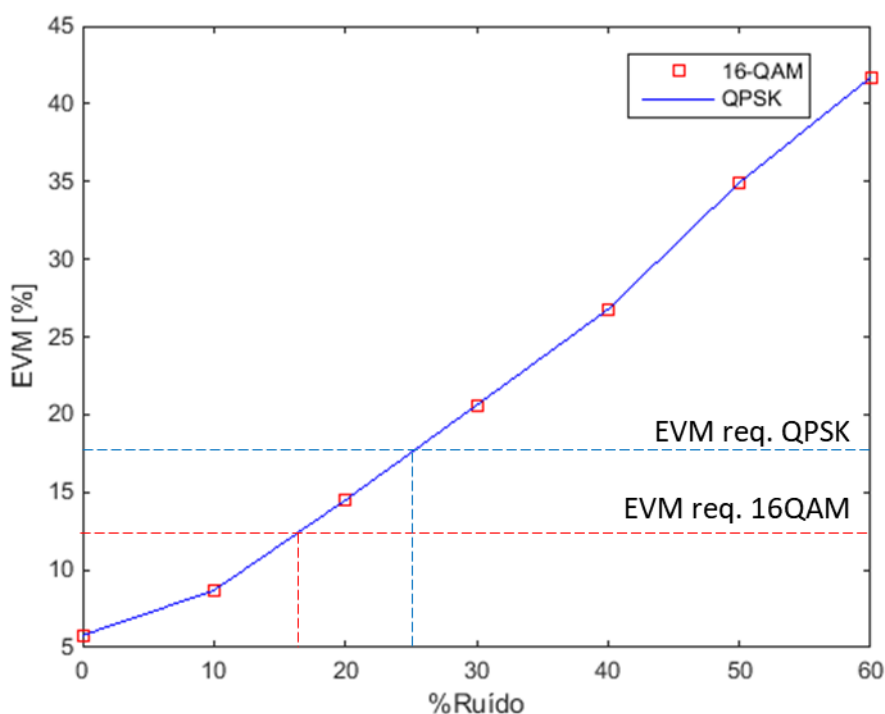


Figura 37 – Curvas de EVM x %Ruído para QPSK e 16QAM

Observou-se que não há diferença notável entre o comportamento das curvas dos dois tipos de modulação. O que faz sentido, devido ao fato de que o aumento na amplitude do ruído faz o EVM aumentar na mesma proporção para os dois casos. Apesar disso, é

importante ressaltar que um mesmo nível de EVM (e.g. 10%) pode não ser satisfatório para dois tipos de modulação diferentes.

Modulações com um nível de modulação (M) maior, como 16QAM quando comparado com QPSK, sofrem mais com valores de EVM mais altos que as modulações com níveis mais baixos pelo fato de possuírem uma distância euclidiana entre os símbolos menor, estando, assim, mais suscetíveis a erros de demapeamento quando há desvios de fase e amplitude.

5 CONCLUSÃO

A VLC é um tipo de comunicação que vem emergindo como solução de baixo custo, baixa complexidade e altas taxas para as transmissões de dados *wireless* do futuro. Entretanto, devido à pequena largura de banda dos canais de transmissão via modulação de LEDs faz-se necessário a utilização de pré-equalizadores a fim aumentar a largura de banda de transmissão de dados e se obter as altas taxas esperadas. Aliado a isto, com o intuito de obter uma alta eficiência espectral e mitigar os efeitos de uma transmissão multipercurso utiliza-se da técnica OFDM para a modulação dos sinais.

Neste trabalho desenvolveu-se um *setup* que simula e faz a transcepção de sinais OFDM pré-equalizados através de um canal, para que dessa forma, fosse possível observar os efeitos da pré-ênfase sobre os sinais transmitidos.

Para tanto foi realizada a comunicação entre o MatLab e o Osciloscópio por via de comunicação serial.

A partir dos resultados obtidos foi possível observar que a técnica de pré-ênfase de sinais é factível e produz melhoras nos sinais transmitidos por canais com distorções conhecidas.

A pré-ênfase apesar de distorcer o sinal transmitido não produziu desvantagens durante o demapeamento dos sinais e obteve melhoras significativas no espectro do sinal recebido.

Trabalhos futuros para melhorar a sincronização do sinal recebido a fim de obter melhoras nos desvios de fase obtidos podem ser realizados. Além disso, a utilização da técnica de pré-ênfase num *setup* VLC funcional pode trazer novas luzes as análises.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

_____.Tektronix. **MDO 3000 Series Mixed Domain Oscilloscopes User Manual**, 2016.

_____.Tektronix. **MDO4000C, MDO4000B, MDO4000, MSO4000B, DPO4000B and MDO3000 Series Oscilloscopes - Programmer Manual**, 2014.

HAYKIN, Simon; VAN VEEN, Barry. **Sinais e Sistemas**. Tradução de José Carlos Barbosa dos Santos. 1º. ed. Porto Alegre: Editora Bookman, 2001, 668 f.

JOVICIC, Aleksandar; LI, Junyi; RICHARDSON, Tom. Visible Light Communication: Opportunities, Challenges and the Path to Market. **IEEE Communications Magazine**, v. 51, n. 12, p. 26-32, Dez. 2013.

LI, Fan; YU, Jianjun; XIAO, Jiangnan; CAO, Zizheng ; CHEN, Lin. Reduction of frequency fading and imperfect frequency response with pre-emphasis technique in OFDM-ROF systems. **Optics Communications**, v. 284, n. 19, p. 4699-4705, Set. 2011.

LI, Honglei; CHEN, Xiongbín; GUO, Junqing; CHEN, Hongda. A 550 Mbit/s real-time visible light communication system based on phosphorescent white light LED for practical high-speed low-complexity application. **Optic Express**, v. 22, n. 22, p. 27203-13, Nov. 2014.

PINTO, Ernesto Leite; ALBUQUERQUE, Claudio Penedo. A técnica de transmissão OFDM. **Telecomunicações**, v. 05, n. 01, p. 01-10, Jun. 2002.

SILVA, Jair A. L.; SEGATTO, Marcelo Eduardo Vieira. Avaliação de efeitos Não Lineares em Sistemas OFDM pela Figura de Mérito EVM. **Anais do Simpósio Brasileiro de Telecomunicações**, 2009, Santa Catarina: Blumenau, 2009.

7 ANEXO I

Para o funcionamento destes códigos é necessário que haja instalado previamente, no computador, a versão mais recente do *software* TekVisa, que é um driver VISA (*Virtual Instrument Software Architecture*) específico para instrumentos da Tektronix.

Além disso, o driver do dispositivo, no formato .mdd, deve estar disponível no diretório “C:\Program Files\MATLAB\R\$versão\$\toolbox\instrument\instrument\drivers” do MatLab. Como o driver específico do MDO3012 não existe, foi utilizado o driver do dispositivo DPO4034, que utiliza o mesmo manual de programação, e funcionou sem nenhum transtorno.

Ressalta-se que, a conexão com o dispositivo deve ser feita via USB na parte traseira do dispositivo conforme os manuais do dispositivo.

O sinal enviado deve estar no formato ASCII e dentro de uma variável ‘c’, também é necessário definir a frequência igual a $1/T_s$ como uma variável ‘Df’.

É importante lembrar que, o AFG deve estar ligado, assim como o canal escolhido para recepção. Para ter certeza de que estejam ligados, basta olhar no dispositivo se os botões “AFG” e “1” ou o número do canal escolhido estão iluminados, se não, basta pressioná-los para ligá-los.

7.1 CÓDIGO DE TRANSMISSÃO

```
%% Envia sinal
visa_vendor = 'TEK';
visa_address = 'USB::0x0699::0x0408::C024759::INSTR';
% Find a VISA-TCPIP object.
dpo = instrfind('Type', 'visa-usb', 'RsrcName', visa_address, 'Tag', '');

% Create the VISA-USB object if it does not exist
```

```

% otherwise use the object that was found.
if isempty(dpo)
    dpo = visa(visa_vendor, visa_address);
else
    fclose(dpo);
    dpo = dpo(1)
end

set(dpo, 'InputBufferSize', 1048576);
% Configure instrument object, dpo
set(dpo, 'OutputBufferSize', 1048576);
% Connect to instrument object, dpo.
fprintf('Opening dpo object...\n');
fopen(dpo);
%Query Idendity string and report
msg = query(dpo, '*IDN?');
% fprintf([[msg] ['\n']]);
fprintf(msg);
fwrite(dpo, '*CLS');
% Start RUN DPO.
% fwrite(dpo,'ACQuire:STATE RUN')
% Selec DPO Channel.
DPO_CH = int2str(1);
fwrite(dpo,['SELECT:CH' DPO_CH ' ON']);
% Write the waveform.
fwrite(dpo,['AFG:FUNcTion ' 'ARB']);
fwrite(dpo,['AFG:FREQuency ' num2str(Df)]);
fwrite(dpo,['AFG:ARB:EMEM:POINTS ' c '']);
fprintf(dpo, 'Curve?');
fprintf('Sinal Enviado!\n\n');
close(dpo)
delete(dpo)

```

7.2 CÓDIGO DE RECEPÇÃO

```
%% RECEPÇÃO
% Create a VISA-USB object.
dpo = instrfind('Type', 'visa-usb', 'RsrcName', 'USB::0x0699::0x0408::C024759::INSTR',
'Tag', '');
% Create the VISA-USB object if it does not exist otherwise use the object that was found.
if isempty(dpo)
    dpo = visa('TEK','USB::0x0699::0x0408::C024759::INSTR');
else
    fclose(dpo);
    dpo = dpo(1);
end
% Create a device object.
deviceObj = icdevice('DPO4034.mdd', dpo);
% Connect device object to hardware.
connect(deviceObj);
% Execute device object function(s).
groupObj = get(deviceObj, 'Waveform');
groupObj = groupObj(1);
[c_rx,k] = invoke(groupObj, 'readwaveform', 'channel1');
% Disconnect device object from hardware.
disconnect(deviceObj);
clear groupObj;
delete(deviceObj);
clear deviceObj;
fclose(dpo);
delete(dpo);
clear dpo;
fprintf('Sinal Recebido!\n\n');
```

7.3 CÓDIGO DE CONVERSÃO VETOR PARA ASCII

```
function [ c ] = vet2asc( x )  
maxt=length(x);  
c=num2str(x(1));  
for i = 2:maxt  
    d=x(i);  
    f = num2str(d);  
    c=[c ' ' f];  
end  
end
```