



David Maykon Krepsky Silva João Luis Grizinsky de Brito

# Sistemas OFDM

Data de realização do experimento: 23 de fevereiro de 2016 Série/Turma: 1000/1011 Prof. Jaime Laelson Jacob

# Sumário

$\mathbf{R}$	esumo	2
1	Introdução	3
<b>2</b>	Revisão da Teoria	4
	2.1 OFDM	. 4
	2.2 Sistemas OFDM com transformada de Fourier	. 5
3	Metodologia Experimental	7
	3.1 Materiais	. 7
	3.2 Métodos	
	3.2.1 Simulação com 16-QAM	. 7
	3.2.2 Simulação com 4-QAM	
	3.3 Comparação entre 16-QAM e 4-QAM	. 10
4	Resultados	11
	4.1 Sistema 16-QAM	. 11
	4.2 Sistema 4-QAM	. 14
	4.3 Comparação entre 16-QAM e 4-QAM	
5	Discussão e Conclusão	18

#### Resumo

Neste trabalho foram analisados os sistemas de comunicação OFDM, com modulação 16-QAM e 4-QAM, em canal AWGN. Foram observadas as constelações dos sinais, com e sem ruído, bem como a densidade espectral de potência de vários pontos do sistema e os sinais transmitidos e recuperados. Como resultado, foi obtido um gráfico comparativo entre a taxa de erro de bit para os dois esquemas de modulação, onde foi possível constar uma menor BER para o esquema com modulação 4-QAM.

### 1 Introdução

O método Orthogonal frequency-division multiplexing (OFDM) é uma técnica de modulação digital baseada no uso de múltiplas frequências de portadora [1]. Um grande número de subportadoras ortogonais, igualmente espaçadas, são utilizadas para transportar dados de forma paralela, onde cada sub-portadora constitui um canal [2]. Cada canal é modulado com um esquema de modulação convencional (tal como QAM ou PSK) com uma taxa de símbolo baixa, mantendo a taxa de transferência total como em um esquema de transmissão de portadora única, para a mesma largura de banda.

A principal vantagem do OFDM em relação a transmissão com portadora única é a capacidade de lidar com condições severas de canal [3]. Por exemplo, a atenuação de frequências altas, interferência de banda estreita e desvanecimento seletivo em frequência.

A equalização de canal também é simplificada, pois a técnica OFDM é vista como vários sinais de baixa frequência com banda estreita em vez de um único sinal de alta frequência e banda larga. A baixa taxa de transferência utiliza um intervalo de guarda (banda de guarda) entre os símbolos, de modo a eliminar a interferência entre símbolos (ISI).

Também é possível utilizar ecos e espalhamento temporal para produzir um ganho de diversidade, melhorando a relação sinal ruído (SNR).

Algumas das aplicações para OFDM são [1]:

- Televisão Digital;
- Internet DSL;
- Redes wireless;
- Redes 4G.

Assim, este trabalho explora a técnica OFDM, com modulação 16-QAM e 4-QAM.

#### 2 Revisão da Teoria

#### 2.1 OFDM

Matematicamente, uma única portadora (figura 1a) pode ser descrita pela seguinte equação:

$$s_c(t) = A_c(t)b_c e^{j|\omega_c t + \phi_c(t)|}, \tag{1}$$

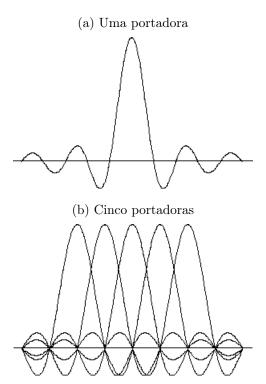
sendo  $A_c$  a amplitude,  $b_c$  é o vetor de dados,  $\omega_c$  e  $\phi_c(t)$  a frequência angular e a fase do sinal modulado, respectivamente [4].

O sinal OFDM consiste de várias portadoras, conforme mostra a figura 1b, que são descritas pela equação

$$s_{ofdm} = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} A_n(t) e^{j|\omega_n t + \phi_n(t)|},$$
(2)

onde N é o número de portadoras, ou canais e  $\omega_n = \omega_c + n\Delta\omega$ .

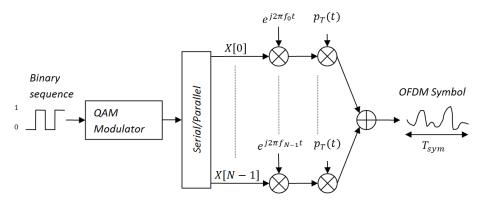
Figura 1: Espectro do sinal OFDM.



Fonte: Matic, D., Mathematical description of OFDM (2015).

É importante notar que todas as portadoras devem, obrigatoriamente, ser ortogonais, para que não haja interferência na transmissão.

Figura 2: Estrutura de um sistema de transmissão multicanal.



Fonte: Fonte: Matic, D., Mathematical description of OFDM (2015).

A figura 2 mostra a estrutura básica de um transmissor OFDM com modulação QAM, onde é possível notar a separação dos dados de entrada, que chegam de forma serial, em N subportadoras, igualmente espaçadas por  $\Delta N$ , sendo

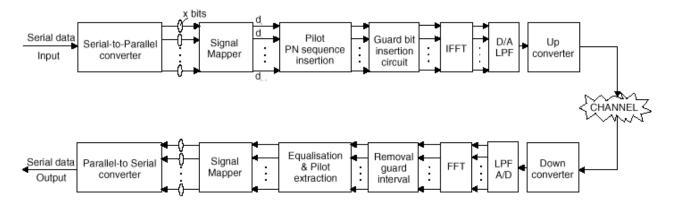
$$\Delta f = \frac{\Delta \omega}{2\pi} = \frac{1}{NT}.\tag{3}$$

#### 2.2 Sistemas OFDM com transformada de Fourier

A principal razão pela qual os sistemas OFDM demoraram a aparecer em produtos de uso civil é a dificuldade de gerar os sinais e, ainda mais difícil, receber e demodular o sinal recebido. A solução via hardware, com múltiplos moduladores e demoduladores, tornava inviável o uso da técnica, devido a grande complexidade e alto custo de implementação.

Com o avanço da tecnologia nos DSPs e FPGAs, foi possível utilizar a transformada inversa de Fourier para gerar os sinais OFDM, reduzindo drasticamente o custo de tais sistemas. De forma complementar, na recepção e demodulação, pode ser utilizada a transformada discreta de Fourier, simplificando os sistemas OFDM.

Figura 3: Estrutura de um sistema OFDM com transformada de Fourier.



Fonte: Fonte: Matic, D., Mathematical description of OFDM (2015).

No transmissor, o sinal é definido no domínio da frequência. Ele é amostrado de modo digital e é definido de tal maneira que o espectro discreto de Fourier exista somente em frequências

discretas. Cada portadora do sistema OFDM corresponde a um elemento desse espectro discreto. Dessa forma, a amplitude e fase das portadoras dependem do dado a ser transmitido. As transições dos dados são sincronizadas nas portadoras, podendo ser processadas em conjunto, símbolo por símbolo.

A figura 3 mostra um esquema OFDM com o uso da transformada de Fourier.

### 3 Metodologia Experimental

#### 3.1 Materiais

Para a realização do experimento foi utilizado o software Simulink do pacote Matlab.

#### 3.2 Métodos

O experimento foi realizado em duas simulações. De início, foi estudado o comportamento do sistema OFDM com modulação 16-QAM. Em seguida, foi analisada a modulação 4-QAM, de modo a avaliar qual o melhor esquema de modulação, de acordo com o critério da taxa de erro de bit.

As seções seguintes dão mais detalhes sobre o procedimento.

#### 3.2.1 Simulação com 16-QAM

Na primeira atividade, foi montado o circuito da figura 4. Os parâmetros de cada bloco são apresentados na figura 5.

Spectrum

Bernoull Briary

Bernoull Briary

Bernoull Briary

Bernoull Briary

Bernoull Briary

Bernoull Briary

Figura 4: Diagrama do sistema OFDM com modulação 16-QAM.

Fonte: Jacob, J. L., Universidade Estadual de Londrina (2015).

[Simulink/Model-Wide Utilities] Model Information b=4: M=2°b: Nfft=128: Nffth=Nfft/2: Nblock=Nffth+b: **Parameters** Ng =16: % Guard interval Nsym=Nfft+Ng; Tsym=0,001; Select: Rows SNRbdB=10: Indices to output: Parameters {1, 2:Nffth, Nffth:-1:2} M-ary number: M Invalid index: Clip Index Parameters Input type: Bit Parameters Probability of a zero: 0.5 Constellation ordering: Gray Number of inputs: 4 Initial seed: 61 Normalization method: Mode: Multidimensional array Sample time: Tsym/Nblock Average Power Concatenate dimension: 1 ▼ Frame-based outputs Average power (watts): 1 Number of input dimensions: 1 [Simulink/Math] Samples per frame: Nblock Phase offset (rad): 0 Index mode: One-based Complex to Real-Imag Index vector (dialog): [Nfft-Ng+1:Nfft 1:Nfft] [Comm Sources] Bernoulli Binary Bernoulli -Re Input port size: Nfft ≺<sub>Im</sub> Binary Generator [256x1] [128x1] mon [144x1] 164x11 Select 163×11 IFFT Rectangular Rows QAM (Add CP) Selector [SP/ Rectangular QAM ū Transforms] Modulator Baseband [Simulink Multiport Math Function Ma.trix /Signal Routing] [Comm/Modulation/ Selector (Conjugate) Concatenate Digital Baseband] SP/Signal [144x1] [Simulink/Math] Management/ Time Indexing = Signal power ector Scope [144x1] 041 [Simulink/Ports&Subsystems]Subsystem Subsystem [SP Sinks] In1 AWGN Out1 **Parameters** Channel HI AWGN Receive delay: 0 [Comm/ 0.007735 Channels Math Display Computation delay: 0 Mean function (Running mean) [SP/Statistics] (Channel Input Power) [144c] Output data: Port (Magnitude^2) [Simulink/Math] Parameters 4 8 1 ✓ Stop simulation Initial seed: 67 Target number of errors: 100 [Simulink/Sinks] Mode: Signal to noise ratio (Eb/No) To Workspace[Simulink/Sinks] Maximum number of symbols: 1e6 Eb/No (dB): SNRbdB-3 Display BER 0.01972 Error rate 106 Num Error 5376 Num Bits Number of bits per symbol: Nblock Error Rate Num Errors [256x1 Calculation Input signal power (watts): 1/Nfft Symbol period (s): Tsym [Comm/Modulation/ dim / Digital Baseband] SP/Transforms](Remove CP) Time complex to Rectangular QAM Real-Imag emodulator Baseband Vector Scope FFT Чm [128x1] 128x1 Select WWD Real-Imag To Rows Im J [144x1] Rectangular Frame to Complex QAM Complex to Frame Status Real-Imag Conversion [SP/Signal Manage Signal Attribure] [Simulink/Math] Multiport Matrix Selector1 Concatenate1 Parameters . arameters Parameters [Simulink/Math] M-ary number: M Number of input dimensions: 1 Select: Rows Parameters Normalization method: Index mode: One-based Indices to output: Number of inputs: 2 Average Power Index vector (dialog): [Ng+1:Nsym] {1, Nffth+1, 2:Nffth} Mode: Multidimensional array Average power (watts): 1 Input port size: Nsym Invalid index: Clip Index Concatenate dimension: 1 Phase offset (rad): 0 Constellation ordering: Gray Output type: Bit Decision type: Hard decision

Figura 5: Parâmetros do sistema 16-QAM.

Fonte: Jacob, J. L., Universidade Estadual de Londrina (2015).

#### Foram obtidos:

- 1. os espectros de 1, 2 e 3 e a constelação 1. Também a constelação 2, para  $\frac{E_b}{N_0}=20dB$  e  $\frac{E_b}{N_0}=0dB;$
- 2. gráficos nos osciloscópios Scope e Scope 1, para  $\frac{E_b}{N_0}=12dB;$
- 3. o gráfico da BERxEb/No, após do preenchimento da tabela 1.

Tabela 1: Tabela BER x Eb/No para 16-QAM.

$\frac{E_b}{N_0}$ (dB)	BER
10	3.39e-3
8	
6	
4	
2	
0	
-2	

#### 3.2.2 Simulação com 4-QAM

Na segunda atividade, foi montado o circuito da figura 6. Os parâmetros de cada bloco são os mesmos, porém, com b=2.

Restriction of Constant Part of Constant

Figura 6: Diagrama do sistema OFDM com modulação 4-QAM.

Fonte: Jacob, J. L., Universidade Estadual de Londrina (2015).

#### Foram obtidos:

- 1. a constelação 1. Também a constelação 2, para  $\frac{E_b}{N_0}=20dB$  e  $\frac{E_b}{N_0}=0dB;$
- 2. gráficos nos osciloscópios Scope e Scope 1, para  $\frac{E_b}{N_0}=12dB;$
- 3. o gráfico da BERxEb/No, após do preenchimento da tabela 2.

Tabela 2: Tabela BER x Eb/No para 4-QAM.

$\frac{E_b}{N_0}$ (dB)	BER
8	6.23e-4
6	
4	
2	
0	
-2	

### 3.3 Comparação entre 16-QAM e 4-QAM

Foi realizada uma comparação entre os resultados obtidos para modulação 16-QAM e 4-QAM através do gráfico da BERxEb/No para os dois sistemas.

### 4 Resultados

#### 4.1 Sistema 16-QAM

O primeiro gráfico obtido foi o dos espectros, conforme mostra a figura 7, onde foi possível observar o espectro do sinal antes da transformada inversa de Fourier, após a transformada de Fourier e após a prefixação.

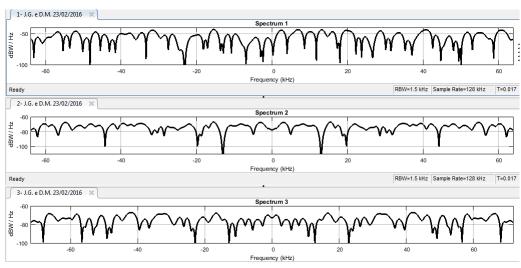


Figura 7: Espectros 1, 2 e 3.

Fonte: Autoria própria.

A constelação mostrada na figura 8 é característica dos sistemas 16-QAM, condizendo com a teoria.

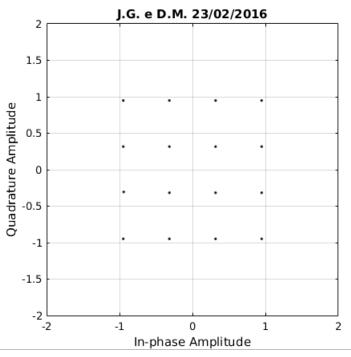
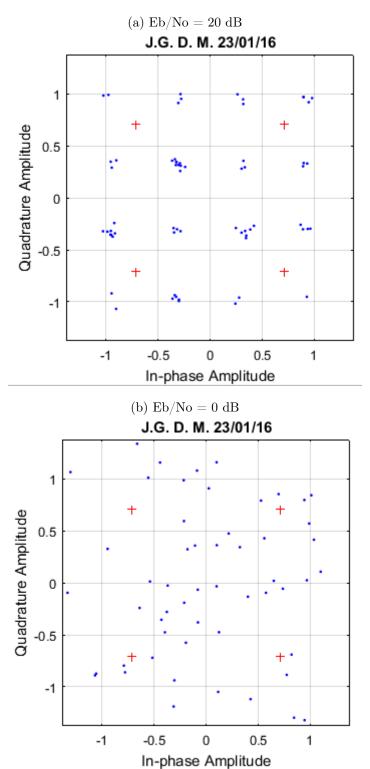


Figura 8: Constelação 1.

Fonte: Autoria própria.

Na constelação 2 (figura 9), é possível observar que, para 20 db, o sinal pode ser detectado, pois todos os pontos estão dentro da região de Voronoi. Já para 0 db, os pontos estão fora da região de Voronoi, levando a uma alta taxa de erro de bit.

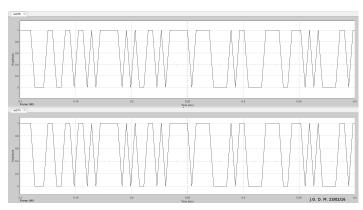
Figura 9: Constelação 2.



Fonte: Autoria própria.

Na figura 10, é possível observar que a informação é recuperada.

Figura 10: Scope e Scope 1.



Fonte: Autoria própria.

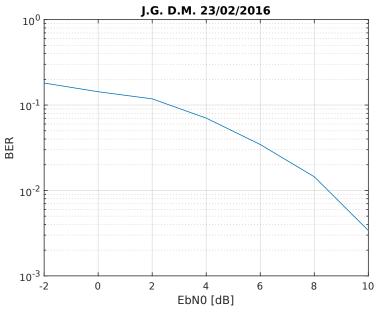
A tabela 3 mostra as taxas de erro de bit obtidas com a variação da relação sinal ruído.

Tabela 3: Tabela BER x Eb/No para 16-QAM.

$\frac{E_b}{N_0}$ (dB)	BER
10	3.3967e-3
8	1.4468e-2
6	3.4505e-2
4	7.0312e-2
2	1.1816e-1
0	1.4323e-1
-2	1.8099e-1

Os dados da tabela 3 são apresentados de forma gráfica na figura 11.

Figura 11: BERxEb/No.



### 4.2 Sistema 4-QAM

A constelação 1 (figura 12) mostra a constelação característica da modulação 4-QAM.

J.G. e D.M. 23/02/2016 2 1.5 1 Quadrature Amplitude 0.5 0 -0.5 -1 -1.5 -2 L -2 -1.5 -1 -0.5 0 0.5 1 1.5 In-phase Amplitude

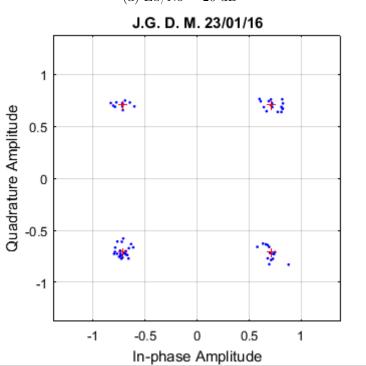
Figura 12: Constelação 1.

Fonte: Autoria própria.

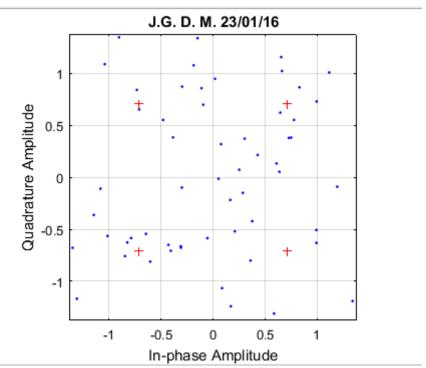
Na constelação 2 (figura 13), novamente foi constatado que, para  $\mathrm{Eb/No}=0$  dB, o sinal fica fora da região de Voronoi.

Figura 13: Constelação 2.

(a)  $\mathrm{Eb/No} = 20~\mathrm{dB}$ 



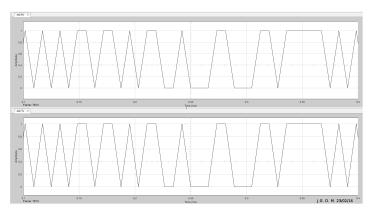
(b)  $\mathrm{Eb/No} = 0~\mathrm{dB}$ 



Fonte: Autoria própria.

 ${\bf A}$  figura 14 mostra que, para a modulação 4-QAM, a informação também é recuperada.

Figura 14: Scope e Scope 1.



Fonte: Autoria própria.

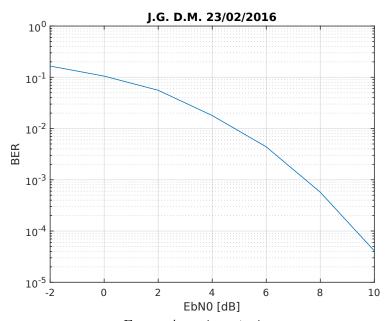
A tabela 4 mostra as taxas de erro de bit obtidas com a variação da relação sinal ruído.

Tabela 4: Tabela BER x Eb/No para 4-QAM.

$\frac{E_b}{N_0}$ (dB)	BER
8	5.7235e-4
6	4.3890e-3
4	1.7933e-2
2	5.5804e-2
0	1.0547e-1
-2	1.6562e-1

Os dados da tabela 4 são apresentados de forma gráfica na figura 15.

Figura 15: BERxEb/No.



Fonte: Autoria própria.

### 4.3 Comparação entre 16-QAM e 4-QAM

Comparando a taxa de erro de bit para os esquemas de modulação 16-QAM e 4-QAM (figura 16) é possível notar um melhor desempenho do sistema 4-QAM. Isso de deve ao fato de que o sistema 4-QAM possui uma região de Voronoi maior que o sistema 16-QAM, facilitando a detecção dos dados.

J.G. D.M. 23/02/2016

10<sup>-1</sup>
10<sup>-2</sup>
10<sup>-3</sup>
10<sup>-4</sup>
10<sup>-5</sup>
-2
0
2
4
6
8
10
EbN0 [dB]

Figura 16: BERxEb/No para 16-QAM e 4-QAM.

Fonte: Autoria própria.

# 5 Discussão e Conclusão

As simulações tiveram resultados condizentes com a teoria, comprovando as características de operação dos sistemas OFDM com modulação QAM, com o uso da transformada de Fourier.

De acordo com as simulações, os resultados obtidos mostraram que o sistema com modulação 4-QAM possuem um desempenho melhor que o sistema com modulação 16-QAM. Isso era esperado, pois o sistema com modulação 4-QAM possui uma região de Voronoi maior que a do sistema 16-QAM, possibilitando uma melhor detecção dos dados.

# Referências

- [1] J. Proakis and M. Salehi, Contemporary Communication Systems Using Matlab. New Jersey: Prentice Hall, 1997.
- [2] B. P. Lathi, *Modern Digital and Analog Communication Systems*. Philadelphia: Holt Rineard and Winston, 1989.
- [3] W. Stallings, Comunicação de dados e computação, 8th ed. New Jersey: Upper Saddle River, 2007.
- [4] M. S. de Alemcar, Sistemas de comunicações. São Paulo: Editora Érica, 2001.