



UNIVERSIDADE  
ESTADUAL DE LONDRINA



---

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

Londrina, 28 de fevereiro de 2016

---

# Sumário

<b>Resumo</b>	<b>2</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>3</b>
<b>2 Revisão da Teoria</b>	<b>4</b>
2.1 OFDM . . . . .	4
2.2 Sistemas OFDM com transformada de Fourier . . . . .	5
<b>3 Metodologia Experimental</b>	<b>7</b>
3.1 Materiais . . . . .	7
3.2 Métodos . . . . .	7
3.2.1 Simulação com 16-QAM . . . . .	7
3.2.2 Simulação com 4-QAM . . . . .	9
3.3 Comparação entre 16-QAM e 4-QAM . . . . .	10
<b>4 Resultados</b>	<b>11</b>
4.1 Sistema 16-QAM . . . . .	11
4.2 Sistema 4-QAM . . . . .	14
4.3 Comparação entre 16-QAM e 4-QAM . . . . .	17
<b>5 Discussão e Conclusão</b>	<b>18</b>

## **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 constatar 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 sub-portadoras 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:

$$s_c(t) = A_c(t)b_ce^{j[\omega_c t + \phi_c(t)]}, \quad (1)$$

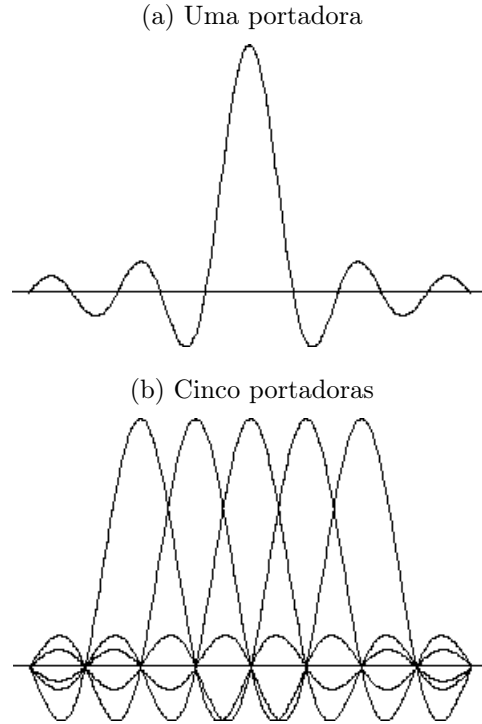
sendo  $A_c$  a amplitude,  $b_c$  é o vetor de dados,  $\omega_c$  e  $\phi_c(t)$  a frequência angular e a fase do sinal modulado, respectivamente [4].

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

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

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

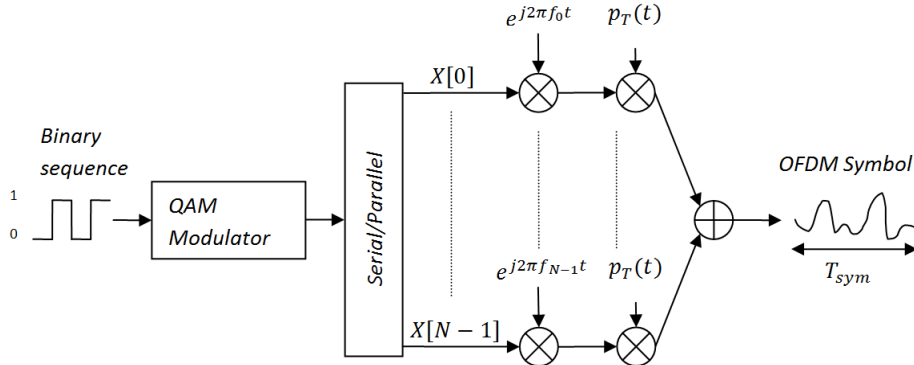
Figura 1: Espectro do sinal OFDM.



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

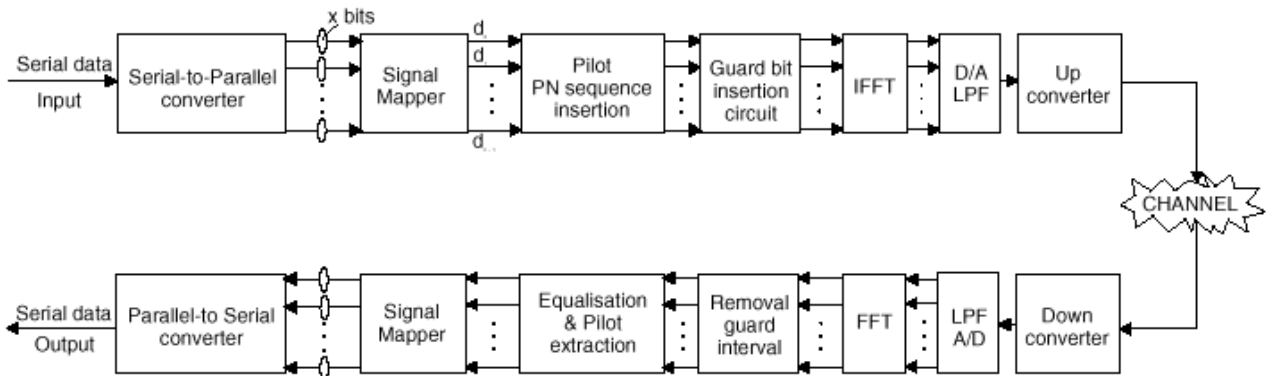
$$\Delta f = \frac{\Delta \omega}{2\pi} = \frac{1}{NT}. \quad (3)$$

## 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

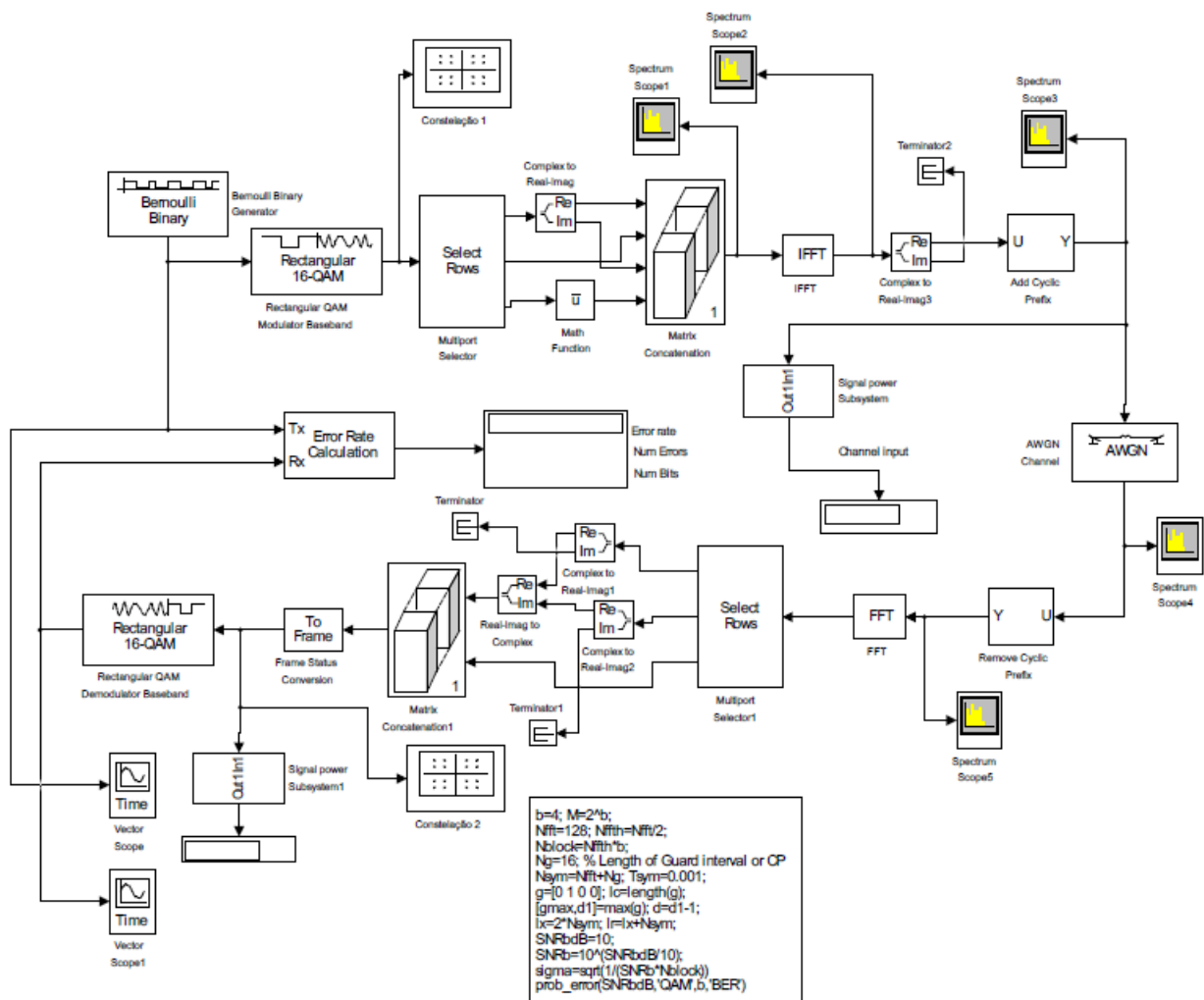
O experimento foi realizado em duas simulações. De início, foi estudado o comportamento do sistema OFDM com modulação 16-QAM. Em seguida, foi analisada a modulação 4-QAM, de modo a avaliar qual o melhor esquema de modulação, de acordo com o critério da taxa de erro de bit.

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.

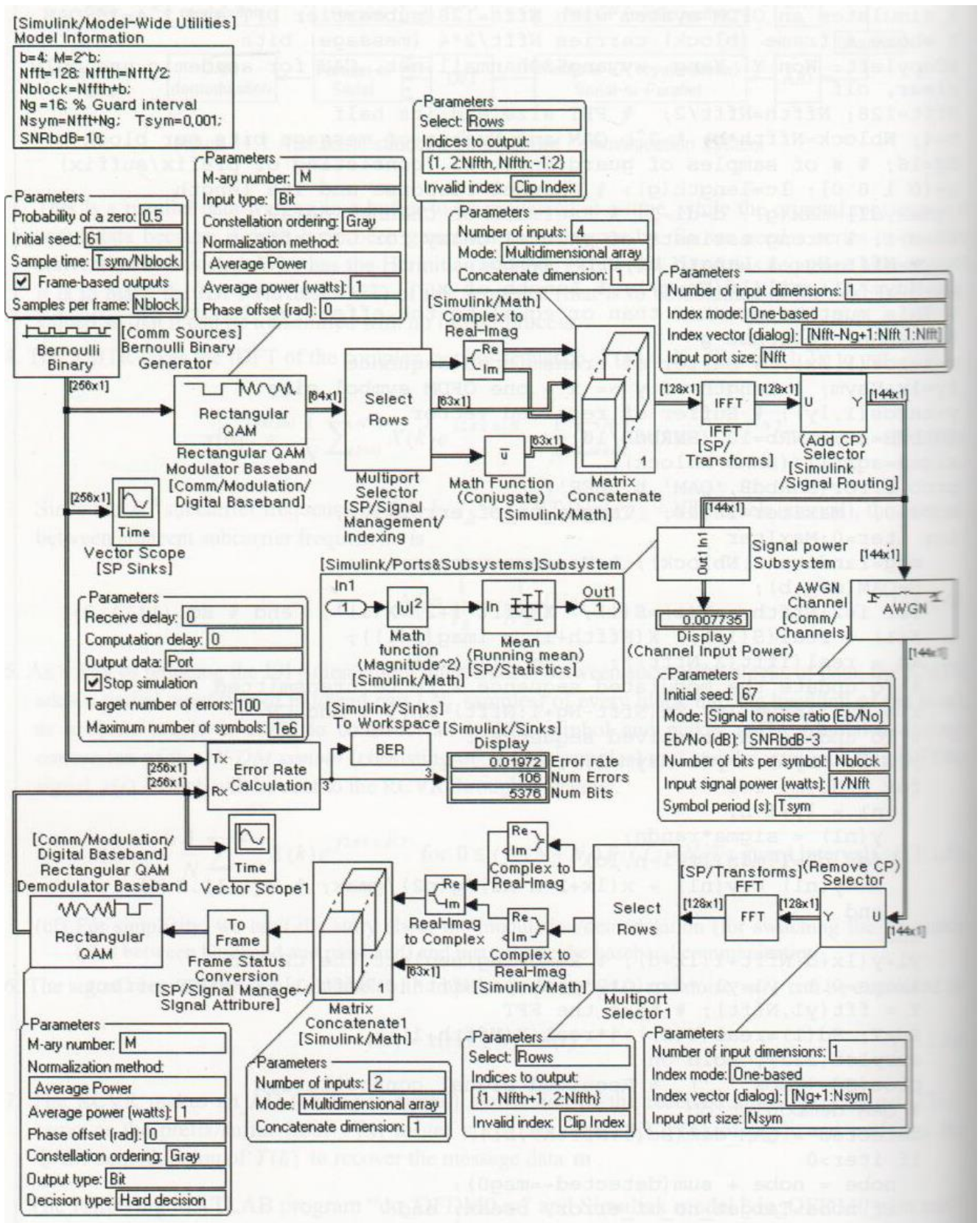
Figura 4: Diagrama do sistema OFDM com modulação 16-QAM.



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



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  $BER \times E_b/N_0$ , após do preenchimento da tabela 1.

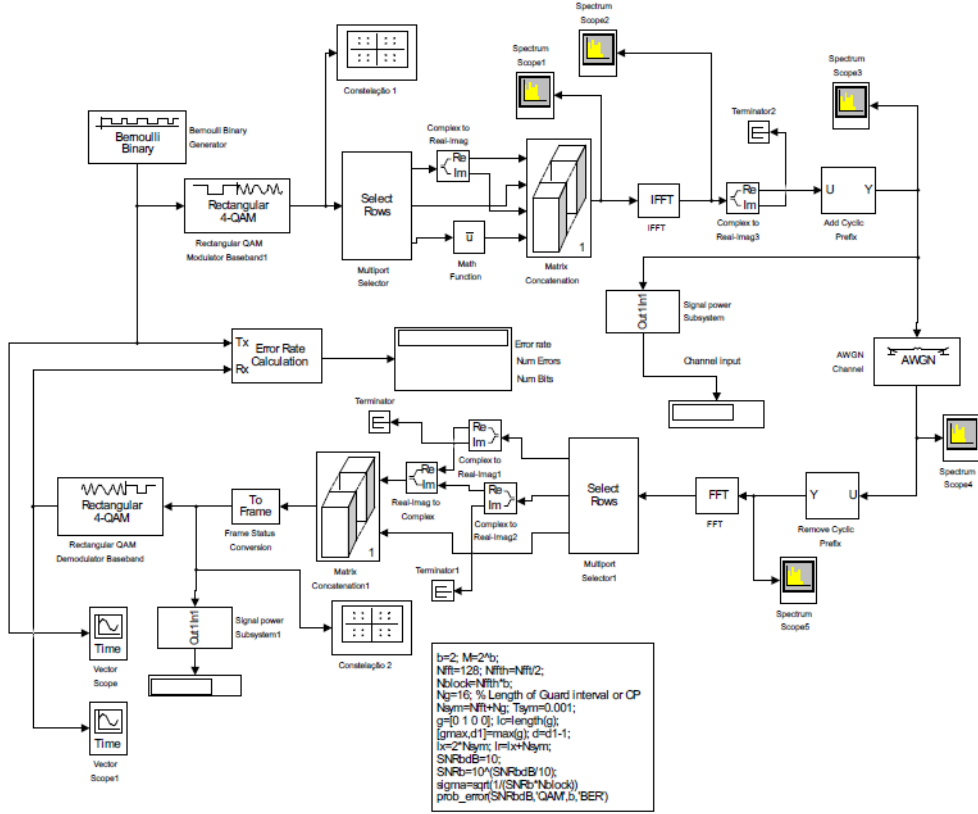
Tabela 1: Tabela BER x  $E_b/N_0$  para 16-QAM.

$\frac{E_b}{N_0}$ (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  $b=2$ .

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  $BER \times E_b/N_0$ , após do preenchimento da tabela 2.

Tabela 2: Tabela BER x  $E_b/N_0$  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

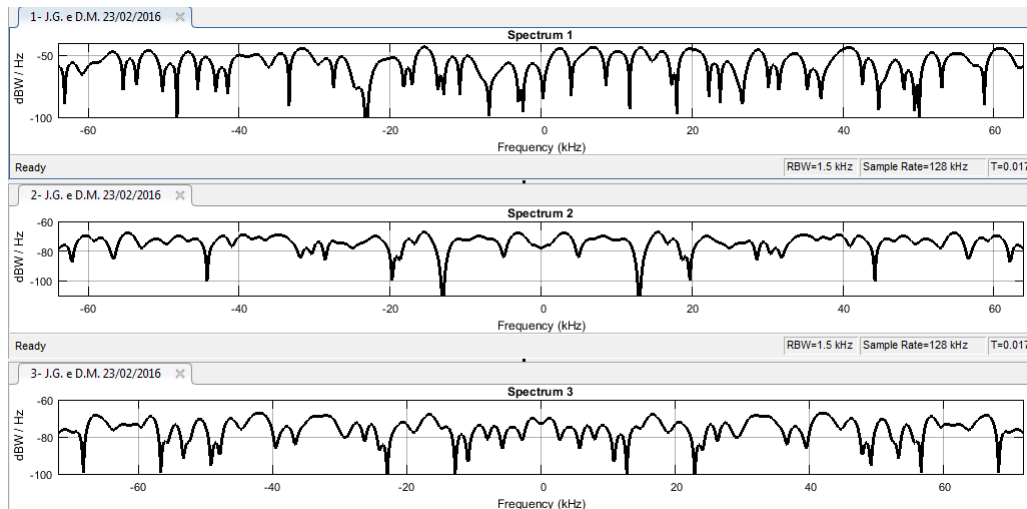
Foi realizada uma comparação entre os resultados obtidos para modulação 16-QAM e 4-QAM através do gráfico da  $BER \times E_b/N_0$  para os dois sistemas.

## 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.

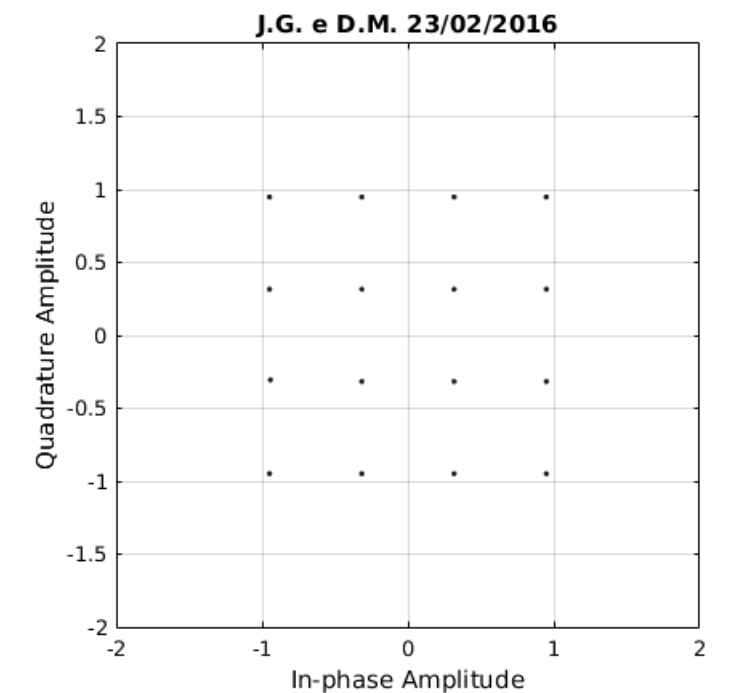
Figura 7: Espectros 1, 2 e 3.



Fonte: Autoria própria.

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

Figura 8: Constelação 1.



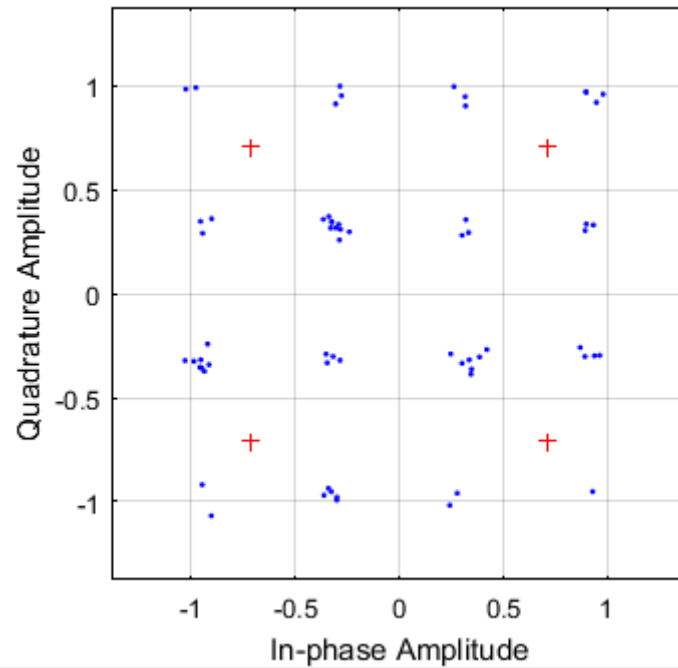
Fonte: Autoria própria.

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.

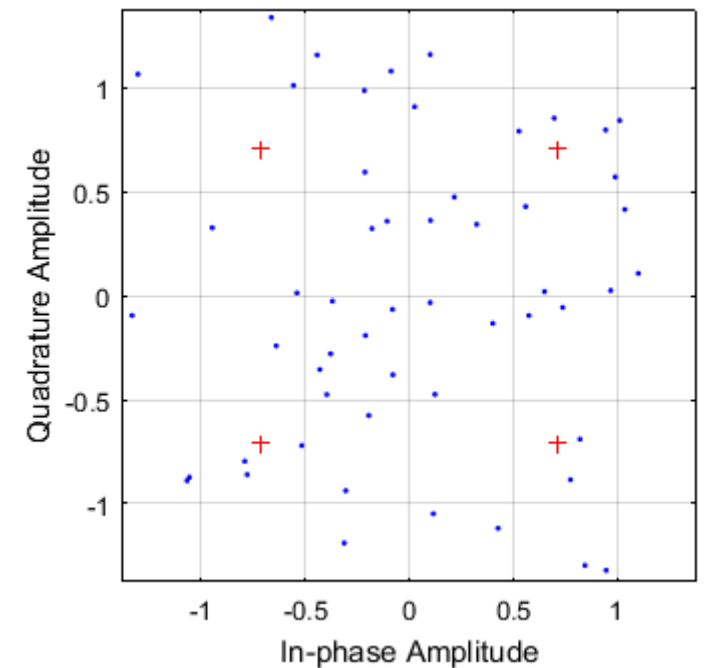
(a)  $E_b/N_0 = 20$  dB

**J.G. D. M. 23/01/16**



(b)  $E_b/N_0 = 0$  dB

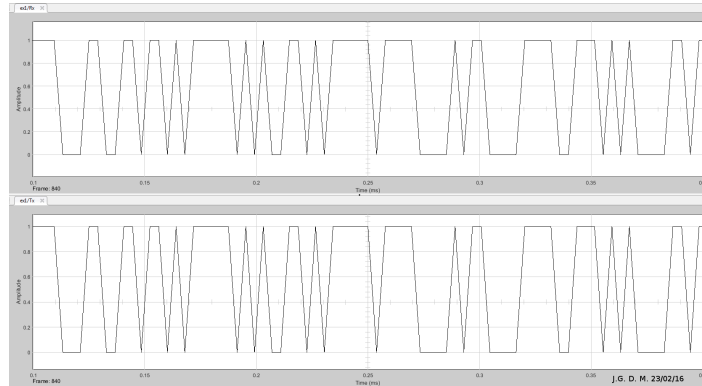
**J.G. D. M. 23/01/16**



Fonte: Autoria própria.

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

Figura 10: Scope e Scope 1.



Fonte: Autoria própria.

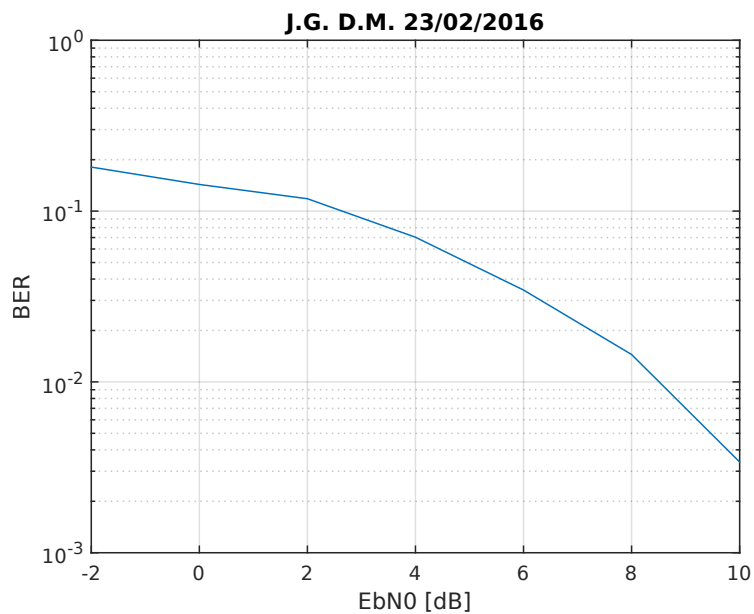
A tabela 3 mostra as taxas de erro de bit obtidas com a variação da relação sinal ruído.

Tabela 3: Tabela BER x  $E_b/N_0$  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: BERx $E_b/N_0$ .

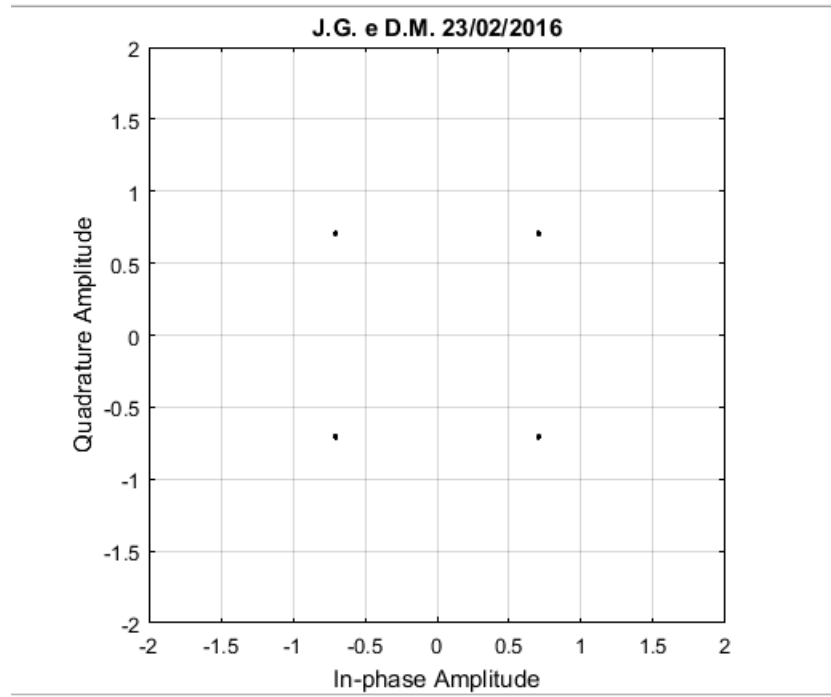


Fonte: Autoria própria.

## 4.2 Sistema 4-QAM

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

Figura 12: Constelação 1.

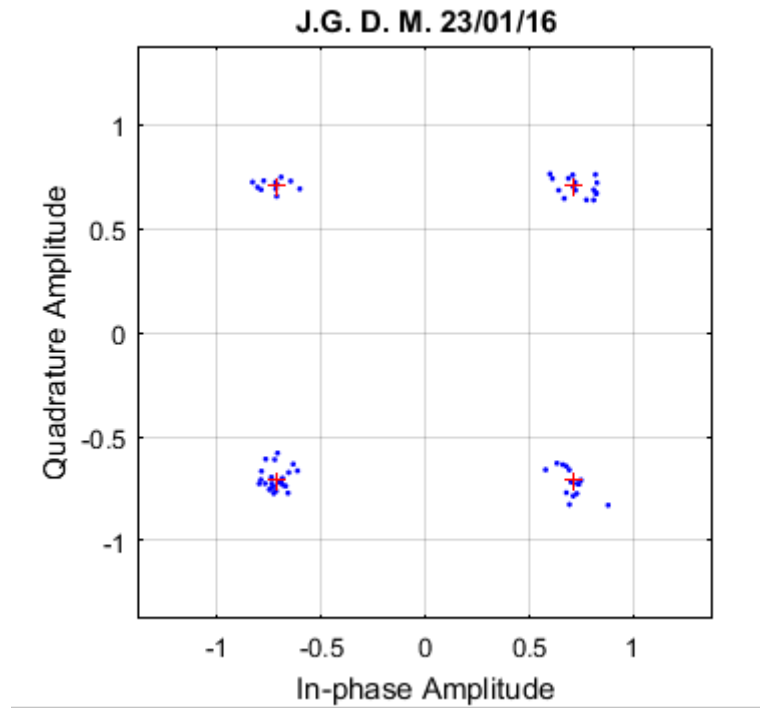


Fonte: Autoria própria.

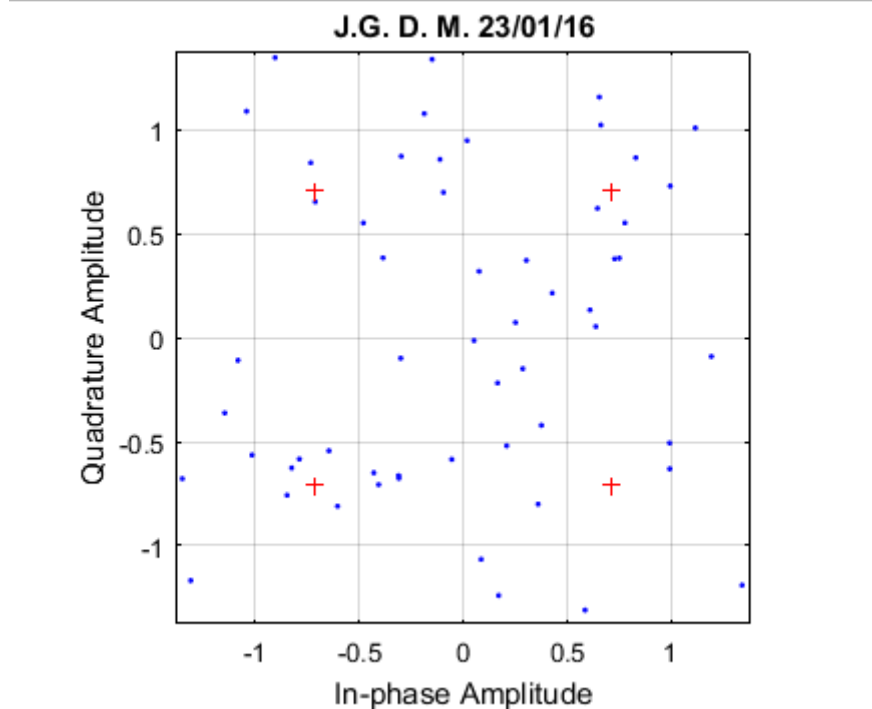
Na constelação 2 (figura 13), novamente foi constatado que, para  $E_b/N_0 = 0$  dB, o sinal fica fora da região de Voronoi.

Figura 13: Constelação 2.

(a)  $E_b/N_0 = 20$  dB



(b)  $E_b/N_0 = 0$  dB

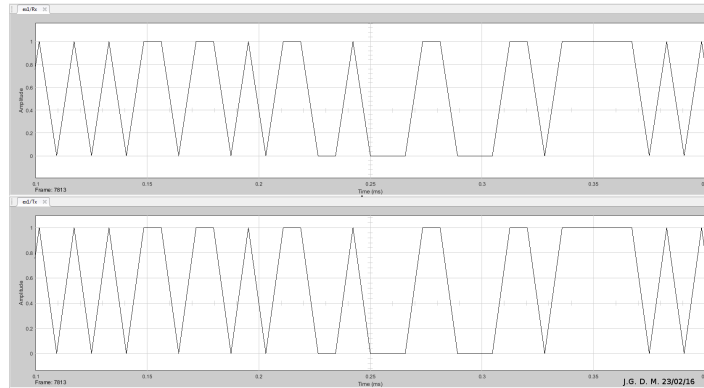


Fonte: Autoria própria.

A figura 14 mostra que, para a modulação 4-QAM, a informação também é recuperada.



Figura 14: Scope e Scope 1.



Fonte: Autoria própria.

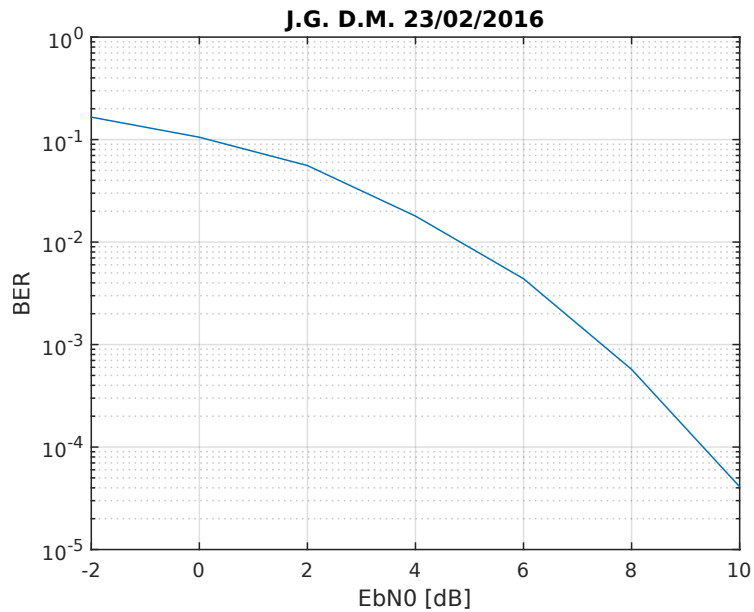
A tabela 4 mostra as taxas de erro de bit obtidas com a variação da relação sinal ruído.

Tabela 4: Tabela BER x  $E_b/N_0$  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: BERx $E_b/N_0$ .

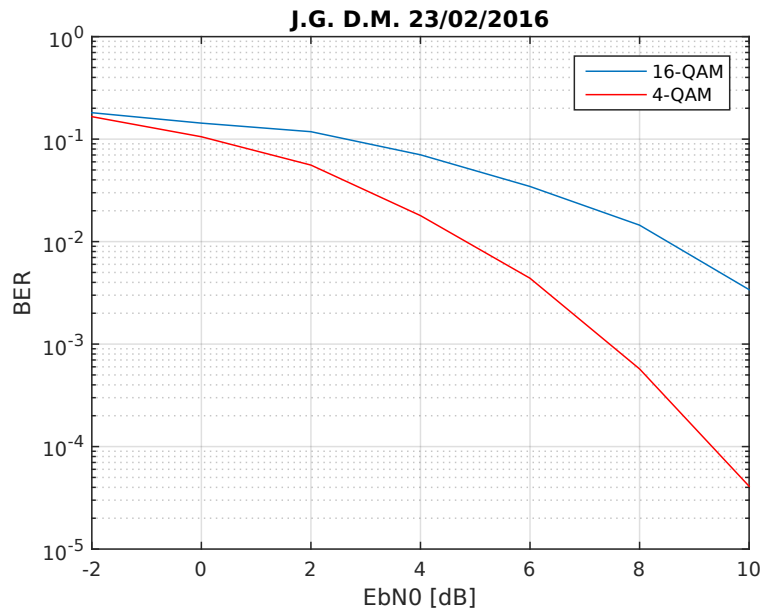


Fonte: Autoria própria.

### 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 se 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.

Figura 16:  $\text{BER} \times E_b/N_0$  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.