



**INSTITUTO  
FEDERAL**

Santa Catarina

---

Câmpus  
São José

**QAM**

Sistemas de Comunicações I

**Gabriel Luiz Espindola Pedro**

29 de Julho de 2024

# Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução .....</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Fundamentação teórica .....</b>	<b>3</b>
2 1	Modulação por Amplitude em Quadratura (QAM) .....	3
2 2	Modulação por Amplitude de Pulso (PAM) .....	3
2 3	Filtro Casado .....	4
<b>3</b>	<b>Análise dos resultados .....</b>	<b>4</b>
<b>4</b>	<b>Conclusões .....</b>	<b>6</b>

# 1 Introdução

Este relatório detalha a aplicação da modulação 16-QAM na transmissão de sinais binários, destacando suas vantagens e desafios. Por meio de uma simulação avançada, realizamos uma análise da geração e transmissão de informações aleatórias, considerando a configuração ideal de bits por símbolo para essa modulação. Utilizando pulsos 4-PAM e a abordagem de transmissão I/Q, investigamos detalhadamente o processo de transmissão e recepção de sinais, com o objetivo de compreender seu desempenho e avaliar a eficiência na recuperação das informações no receptor. Adicionalmente, são discutidos aspectos práticos e teóricos que influenciam a qualidade do sinal e da comunicação, proporcionando uma visão das potencialidades e limitações da modulação 16-QAM em diferentes cenários de aplicação.

## 2 Fundamentação teórica

### 2 1 Modulação por Amplitude em Quadratura (QAM)

A Modulação por Amplitude em Quadratura (QAM) é uma técnica de modulação digital que combina duas ondas portadoras de mesma frequência, mas defasadas em 90 graus (quadratura), para transmitir dados. Cada uma das portadoras é modulada em amplitude de forma independente, e a soma das duas resulta no sinal modulado. O sinal transmitido pode ser expresso como

$$s(t) = I(t) \cdot \cos(2\pi f_c t) + Q(t) \cdot \sin(2\pi f_c t), \quad (1)$$

onde  $I(t)$  é a componente em fase,  $Q(t)$  é a componente em quadratura, e  $f_c$  é a frequência da portadora. A combinação de  $I(t)$  e  $Q(t)$  em diferentes amplitudes permite a transmissão de múltiplos bits por símbolo, aumentando a eficiência espectral do sistema.

### 2 2 Modulação por Amplitude de Pulso (PAM)

A Modulação por Amplitude de Pulso (PAM) é uma técnica de modulação onde a amplitude de cada pulso é proporcional à amplitude do sinal de modulação em um determinado instante. A modulação PAM pode ser descrita matematicamente como

$$s(t) = \sum_n a_n \cdot p(t - nT), \quad (2)$$

onde  $a_n$  são as amplitudes dos pulsos,  $p(t)$  é a forma do pulso, e  $T$  é o período de amostragem. A técnica PAM é a base para outras formas de modulação digital, incluindo o QAM.

## 2 3 Filtro Casado

O Filtro Casado é um tipo de filtro projetado para maximizar a relação sinal-ruído (SNR) na presença de ruído branco gaussiano. Ele é particularmente útil na detecção de sinais digitais, onde é necessário recuperar sinais de pulso transmitidos através de canais ruidosos. Para um sinal  $s(t)$ , o filtro casado  $h(t)$  tem a resposta impulsional dada por

$$h(t) = s(T - t), \quad (3)$$

onde  $T$  é a duração do sinal de interesse. A saída do filtro casado no instante  $T$  é maximizada, o que facilita a detecção do pulso.

## 3 Análise dos resultados

Para podermos dar início a simulação da modulação 16-QAM, primeiramente devemos nos atentar aos parâmetros iniciais da simulação. Para isso, definimos a quantidade de bits a serem transmitidos, a quantidade de bits por símbolo, a quantidade de símbolos a serem transmitidos e a quantidade de amostras por símbolo. Com esses parâmetros definidos, podemos prosseguir com a simulação.

Para esta simulação utilizamos 16 símbolos, o que nos permite transmitir 4 bits por símbolo. A taxa de bits foi definida como 1024 bps, resultando em um tempo de bit de 1 ms. A taxa de símbolos foi calculada como 256 bauds, com um tempo de símbolo de aproximadamente 4 ms. A frequência de amostragem foi definida como 256 kHz, com um tempo de amostragem de 4 us. A frequência da portadora foi estabelecida em 4 kHz. O número de bits a serem transmitidos foi definido como 4000, resultando em um tempo total de transmissão de 4 s.

Com o sistema de modulação 16-QAM configurado, realizamos a transmissão dos símbolos gerados aleatoriamente, utilizando a modulação 16-QAM para codificar os símbolos em sinais I e Q. A figura a seguir apresenta a constelação 16-QAM gerada a partir dos símbolos transmitidos.

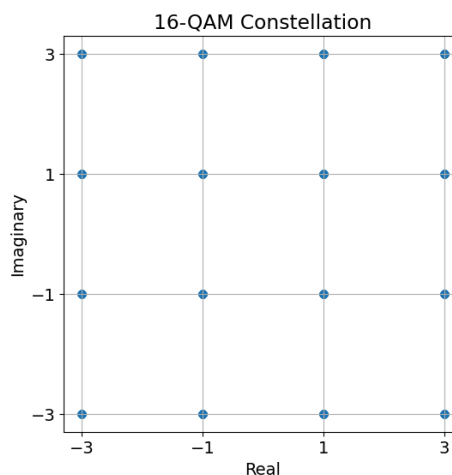


Figura 1: "Constelação 16-QAM"

A constelação 16-QAM é composta por 16 pontos, representando os 16 símbolos possíveis que podem ser transmitidos. Cada ponto da constelação representa um símbolo, que é formado pela combinação de 4 bits. A distância entre os pontos da constelação é proporcional à diferença entre os símbolos, o que facilita a detecção e decodificação dos símbolos no receptor.

A partir dos sinais I e Q gerados, formatamos os sinais utilizando a técnica 4-PAM, que consiste em mapear os sinais I e Q em 4 níveis de amplitude. A figura a seguir apresenta os sinais I e Q formatados utilizando a técnica 4-PAM.

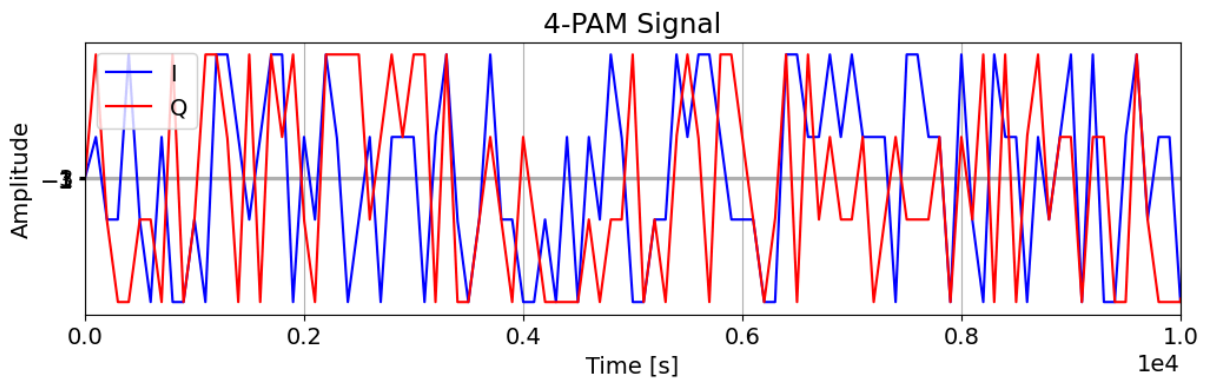


Figura 2: “Sinais I e Q formatados utilizando 4-PAM”

Para transmissão de um único sinal unimos os sinais I e Q, da seguinte forma:

$$s(t) = I(t) \cdot \cos(2\pi f_c t) - Q(t) \cdot \sin(2\pi f_c t) \quad (4)$$

Com isso obtemos o sinal modulado, que é transmitido através do canal de comunicação. No receptor, o sinal é demodulado e os sinais I e Q são recuperados para a detecção dos símbolos transmitidos. A figura a seguir apresenta o sinal 16-QAM transmitido.

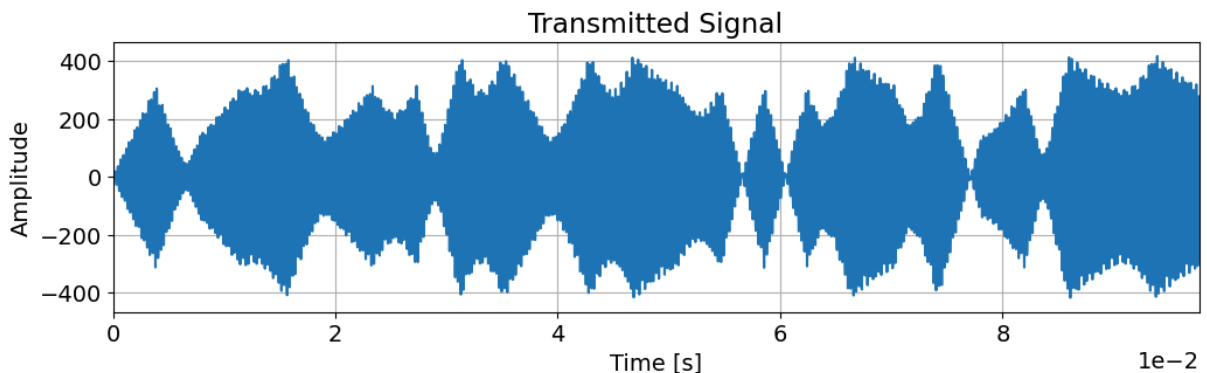


Figura 3: “Sinal 16-QAM transmitido”

Na recepção, o sinal é demodulado e os sinais I e Q são recuperados para a detecção dos símbolos transmitidos. O processo de demodulação é realizado utilizando um filtro casado, que é projetado para maximizar a relação sinal-ruído (SNR) na presença de ruído branco gaussiano. A figura a seguir apresenta o sinal 16-QAM recebido.

## 4 Conclusões

A análise da modulação 16-QAM demonstrou ser uma técnica eficaz para a transmissão de sinais binários, oferecendo uma melhoria significativa na eficiência espectral em comparação com métodos mais simples. As simulações evidenciaram que a combinação das componentes em fase e quadratura permite a transmissão de múltiplos bits por símbolo, maximizando a utilização do espectro. Apesar das vantagens, é essencial considerar as limitações e ajustar a implementação da modulação 16-QAM conforme as condições específicas para otimizar o desempenho em diversos cenários de aplicação.