



MODELAGEM E SIMULAÇÃO CONTÍNUA DA MODULAÇÃO OFDM: CONCEITUAÇÃO E ESTUDO DE CASO

MODELING AND CONTINUOUS SIMULATION OF OFDM MODULATION: CONCEPTUALIZATION AND CASE STUDY

Aran Montalvão Dias¹, Diego Pinto Hornburg²,
Gabriel Cerqueira Pires³, Luiza Harumi Fujihara⁴
José Roberto Emiliano Leite⁵, Edson Luiz Ursini⁶

DOI: 10.37702/REE2236-0158.v45p70-83.2026

RESUMO: A simulação e a modelagem de sistemas se tornam cada vez mais importantes, seja em função dos custos, seja dos riscos envolvidos no sistema real. Este artigo, originado a partir do curso de Tópicos Especiais em Telecomunicações da Faculdade de Tecnologia da Unicamp, apresenta a modelagem e a simulação contínua de um Sistema de Modulação OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) utilizando o software MATLAB-Simulink. Esse tipo de modulação é utilizado em redes Wi-Fi, 5G, 6G entre outras. O artigo apresenta, de forma didática e com a participação dos estudantes em um contexto "mão na massa", como o sinal OFDM é formado, suas vantagens e desvantagens, bem como as implicações dos diferentes tipos de modulação digital e distribuições de canal ruidoso, sendo especialmente voltado ao curso de Engenharia de Telecomunicações. Os principais parâmetros da Modelagem Simulink mostram a Taxa de Erro de Bit (BER) em função dos vários tipos de entrada: onda quadrada, seno discreto e números inteiros aleatórios e blocos pertencentes às bibliotecas do Matlab-Simulink. Foram testados vários valores de relação sinal-ruído, ou energia do bit/variação do ruído (E_b/N_0), e dois tipos de canal (AWGN – *Additive White Gaussian Noise* – e Rayleigh). Também foram realizados testes em relação ao desvio Doppler, ao atraso e ao ganho multipercursos para o canal Rayleigh, por este ser mais crítico e mais sujeito a erros, considerando que o modelo teórico do canal AWGN é sempre melhor ou igual ao do canal Rayleigh para o mesmo valor de E_b/N_0 . Outras conclusões úteis podem ser obtidas por meio da variação dos parâmetros considerados.

PALAVRAS-CHAVE: Wi-Fi; OFDM; canal ruidoso, MATLAB-Simulink; simulação contínua.

ABSTRACT: Simulation and modeling of systems is increasingly important, both for the costs and the risks involved in the real system. This article, originating from the Special Topics in Telecommunications course at the School of Technology of Unicamp, presents the modeling and continuous simulation of an OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) modulation system using the MATLAB-Simulink software. This type of modulation is used in Wi-Fi, 5G, and 6G networks, among others. The article, with the participation of students in a hands-on context, presents in a didactic way, and is especially geared towards the Telecommunications Engineering course: how the OFDM signal is formed, its advantages and disadvantages, and the implications of the various types of digital modulation and noisy channel distributions. The main parameters of the Simulink modeling show the Bit Error Rate (BER) as a function of the various input types: square wave, discrete sine, and random integers, blocks belonging to the Matlab-Simulink libraries. Several signal-to-noise ratios, or bit energy/noise variance (E_b/N_0), and two channel types (AWGN - *Additive White Gaussian Noise* - and Rayleigh) were tested. Tests were also conducted regarding Doppler shift, delay, and multipath gain for the Rayleigh channel, given that the latter is more critical and prone to errors, and considering that the theoretical model of the AWGN channel is always better than or equal to that of the Rayleigh channel for the same value of E_b/N_0 . Other useful conclusions can be obtained by varying the parameters considered.

KEYWORDS: Wi-Fi; OFDM; noisy channel; MATLAB-Simulink; continuous simulation.

¹ Estudante de Engenharia de Telecomunicações, Faculdade de Tecnologia-Unicamp, a248116@dac.unicamp.br

² Estudante de Engenharia de Telecomunicações, Faculdade de Tecnologia-Unicamp, d250254@dac.unicamp.br

³ Estudante de Engenharia de Telecomunicações, Faculdade de Tecnologia-Unicamp, g250728@dac.unicamp.br

⁴ Estudante de Engenharia de Telecomunicações, Faculdade de Tecnologia-Unicamp, l255083@dac.unicamp.br

⁵ Engenheiro Eletricista, Doutor, Estudante de pós-doutorado, Faculdade de Tecnologia-Unicamp, josere@unicamp.br

⁶ Engenheiro Eletricista, Livre Docente, Professor Associado II, Faculdade de Tecnologia-Unicamp, ursini2@unicamp.br



INTRODUÇÃO

A Modulação OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) é uma técnica de multiplexação por divisão de frequências ortogonais, amplamente utilizada em sistemas de comunicação modernos devido à sua alta eficiência na transmissão de dados e robustez contra interferências e ruídos. Por essas características é muito útil, por exemplo, para aplicação em centros urbanos. Essa tecnologia divide o fluxo de dados em várias subportadoras ortogonais, transmitindo-as em paralelo, o que permite que cada uma ocupe uma banda de frequência estreita. Isso reduz a interferência entre elas e aumenta a eficiência do espectro. A importância do OFDM nas comunicações atuais é grande, pois possibilita altas taxas de transmissão em canais sujeitos a interferências, como os que encontramos nas comunicações sem fio e em grandes centros urbanos.

O curso de Tópicos Especiais em Telecomunicações, do curso de Engenharia de Telecomunicações da Unicamp, deu origem a um trabalho de simulação contínua utilizando o Matlab-Simulink para uma visualização mais didática do funcionamento da técnica OFDM. Os docentes identificaram lacuna na aprendizagem da técnica e propuseram um problema a ser investigado, dentro da realidade dos alunos, em um contexto de “mão na massa”. Alunos do curso se empenharam para transformar o projeto do curso neste artigo, incluindo até a elaboração de algumas de suas ilustrações, contando apenas com a orientação dos dois professores responsáveis.

Nessa forma de abordagem o aluno passa a ser um sujeito ativo e não um receptor passivo de informações pelo fato de que dispõe de terminal com *software* específico sobre o assunto mostrado em aula. Por sua vez, o conteúdo teórico também é mostrado como parte de seu cotidiano, facilitando a compreensão de conceitos abstratos. Outra vantagem é o desenvolvimento de seu pensamento crítico, a capacidade de resolução de problemas e o aprendizado do trabalho em equipe. A experiência não serve apenas para comprovar a teoria, mas também para questioná-la como parte da construção do ser humano.

Além da apreensão dos conceitos relacionados à modulação OFDM, outro objetivo do curso foi o de familiarizar os alunos com técnicas de simulação que são cada vez mais importantes, seja para planejamento, para dimensionamento e até para gerenciamento de redes (por exemplo, com a utilização dos gêmeos digitais para obter respostas quase em tempo real).

A Tecnologia OFDM é usada em diversos sistemas de comunicação de alta velocidade, incluindo Wi-Fi, LTE, 5G, 6G (próxima geração móvel), televisão digital,



rádio digital e outras aplicações que demandam uma transmissão de dados rápida e confiável. No Wi-Fi, por exemplo, o OFDM é responsável pela alta taxa de dados, possibilitando o uso simultâneo de dispositivos em uma rede sem comprometer o seu desempenho. Nas redes celulares 4G (LTE), 5G e 6G (futura), a modulação OFDM é crucial para suportar o grande volume de dados que essas redes precisam gerenciar, oferecendo aos usuários uma experiência de navegação mais fluida, além de suportar aplicações de *streaming* de vídeo e realidade aumentada. Na televisão digital e no rádio digital, o OFDM permite transmitir sinais de áudio e vídeo com qualidade, minimizando o impacto de interferências e garantindo que os dados cheguem com integridade ao receptor.

O OFDM se destaca como uma das tecnologias de modulação mais eficazes para comunicações de alta velocidade e alta demanda de dados. Sua robustez, eficiência espectral e capacidade de minimizar os efeitos de interferências e ruídos tornam a modulação OFDM ideal para os desafios das comunicações modernas, permitindo que mais usuários e dispositivos se conectem simultaneamente, sem comprometer a qualidade do serviço. Em um cenário em que a Indústria 4.0 (Coutinho, 2024; Deltashop, 2024), Internet das Coisas (IoT) (Deltashop, 2024), redes móveis de quinta e sexta gerações (5G, 6G) (Deltashop, 2024) e a crescente quantidade de dispositivos conectados se tornam realidade, o papel do OFDM nas comunicações continua sendo de extrema importância, e seu estudo e aprimoramento são cruciais para o avanço das telecomunicações. Estudar a modulação OFDM atualmente é fundamental, já que a demanda por comunicações rápidas e confiáveis continua a crescer, e as tecnologias que suportam essa transmissão estão se expandindo e evoluindo.

CONCEITUANDO O SINAL OFDM

Como se forma um sinal OFDM?

OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) é uma técnica de modulação de dados, em que a banda é dividida em múltiplas portadoras ortogonais, as subportadoras. As subportadoras são chamadas ortogonais por não possuírem sobreposição de frequência, não interferindo assim umas nas outras.

Basicamente, o OFDM é a conversão de um fluxo de dados serial de taxa de transmissão elevada em múltiplos subfluxos paralelos de taxa de transmissão baixa. Essa técnica apresenta o termo multiplexação em sua denominação; vale ressaltar



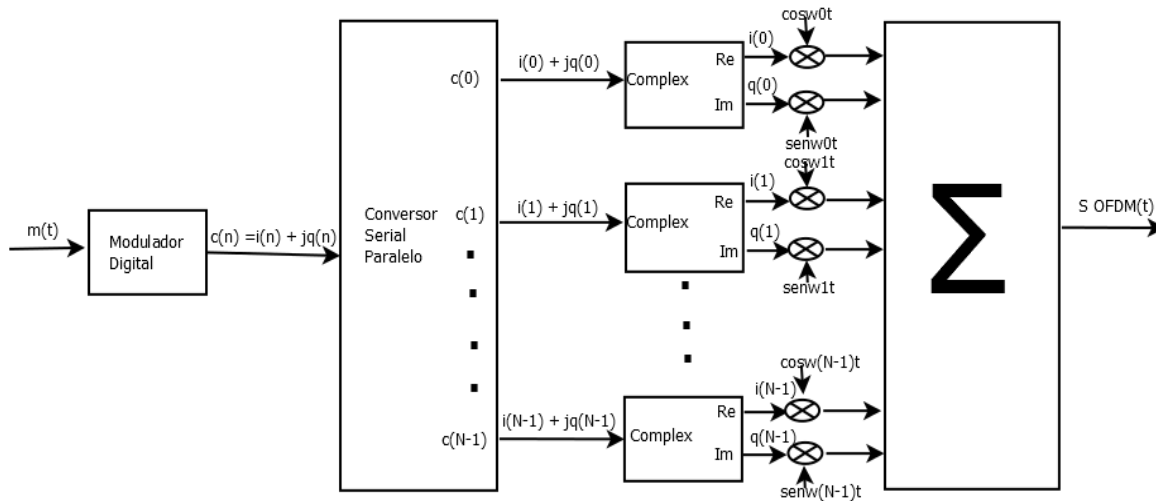
que, a rigor, não ocorre multiplexação em um sistema OFDM, mas sim a transmissão paralela de uma sequência de bits originalmente serial. Explicando de outra maneira, não há vários canais em paralelo em relação ao nível de aplicação, mas há multiplexação pelo fato de que várias portadoras ortogonais compartilham o mesmo meio físico.

Para a formação de um sinal OFDM (Figura 1), ocorre a divisão do espectro em múltiplas subportadoras, primeiramente com a atuação de um bloco para fazer a modulação digital. Para isso, a sequência binária/mensagem a ser transmitida ($m(t)$) é mapeada nos sinais em fase, $i(n)$, e em quadratura, $q(n)$, que compõem o sinal complexo, $c(n)$. Com isso, tem-se o sinal: $c(n)=i(n)+jq(n)$.

Posteriormente, o sinal passa pelo bloco de conversor serial/paralelo, em que o sinal $c(n)$ é convertido em N feixes de símbolos complexos paralelos que modulam as subportadoras complexas. No caso da transmissão paralela, cada feixe modula uma subportadora, fazendo com que se reduza a taxa de sinalização em função do número de subportadoras adotado. O valor da amplitude de cada subportadora é atualizado a cada T segundos, o que corresponde ao tempo de cada símbolo OFDM.

A parte real do símbolo de entrada modula a função cosseno de frequência angular w_i , e a parte imaginária modula a função seno de mesma frequência w_i . As N subportadoras são ortogonais entre si e o espaçamento de frequência entre subportadoras adjacentes é igual ao inverso do tempo de símbolo OFDM. Todas as subportadoras complexas moduladas geram o sinal OFDM. A última etapa no transmissor é a transformação do sinal em frequência em sinal no tempo por meio da aplicação da iFFT (inverso da Transformada Rápida de Fourier). Após passar pelo canal, a primeira operação no receptor é a aplicação da FFT para fazer as operações equivalentes às da transmissão (não foi colocada a ilustração do receptor OFDM).

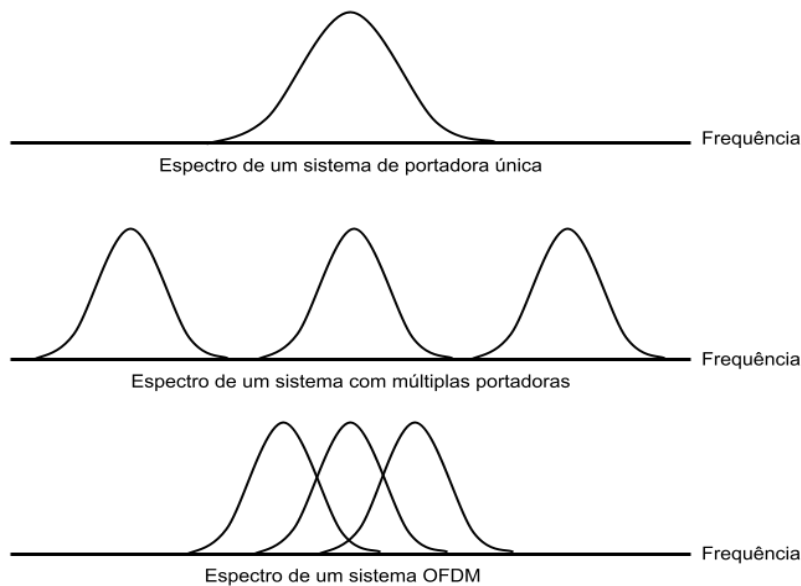
Figura 1 – Formação de um Sinal OFDM



Fonte: elaborada pelos autores, adaptada de Keysight (2024).

Sempre deve se buscar o sincronismo entre as frequências geradas na transmissão e as geradas na recepção, pois se houver diferença entre elas, a condição de ortogonalidade das subportadoras é violada, comprometendo a qualidade do sistema OFDM. Dessa forma, tanto os osciladores complexos do transmissor quanto os osciladores complexos do receptor devem estar em fase para evitar interferências entre as componentes cossenoidais e senoidais (Figura 2).

Figura 2 – Comparação entre os espectros FDM e OFDM



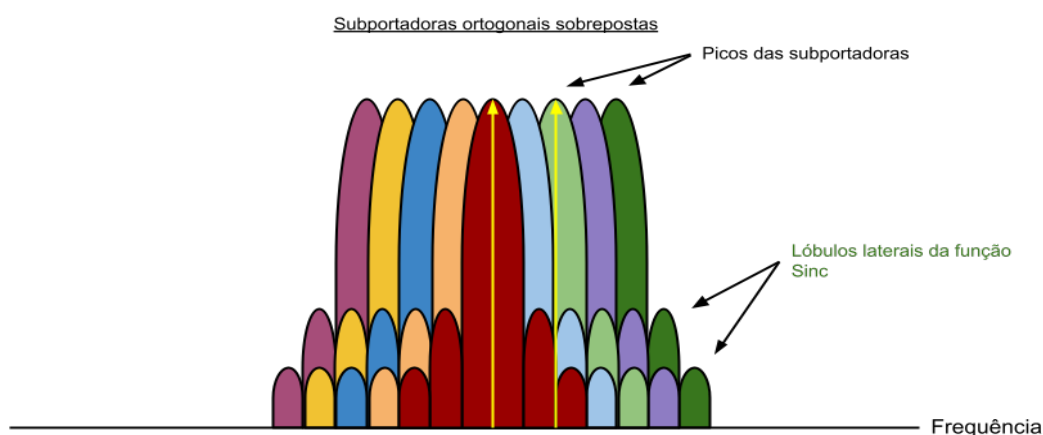
Fonte: elaborada pelos autores, baseada em Wright e Burke (2025).

Principais vantagens e desvantagens

Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) é uma técnica de modulação usada em sistemas de comunicação sem fio, como Wi-Fi, LTE, 5G e 6G (futuro). Uma de suas vantagens é a melhor eficiência espectral, já que o OFDM divide a largura de banda em subportadoras que são ortogonais entre si. Dessa forma, a transmissão se torna eficiente e em várias frequências, fazendo com que a taxa de transferência de dados aumente em relação à utilização de portadora única.

Além disso, o OFDM sofre menos com o desvanecimento seletivo em frequência e com o atraso, algo que é muito comum para canais sem fio, principalmente em ambientes urbanos e repletos de obstáculos. A modulação também utiliza símbolos curtos em vez de longos, o que reduz a chance de interferência intersimbólica (IIS); além destes, para prevenção da IIS, também é inserida uma banda de guarda, ou seja, uma parte do final do símbolo OFDM é copiada e inserida no início do mesmo símbolo, criando a chamada banda de guarda (UFPR, 2024; Wikipedia, 2024). A Figura 3 mostra um espectro OFDM típico.

Figura 3 – Espectro em Frequência do Sinal OFDM



Fonte: elaborada pelos autores, adaptada de Keysight (2024).

Nota: observe que a parte nula das subportadoras corresponde aos picos das subportadoras adjacentes, eliminando a interferência entre elas.

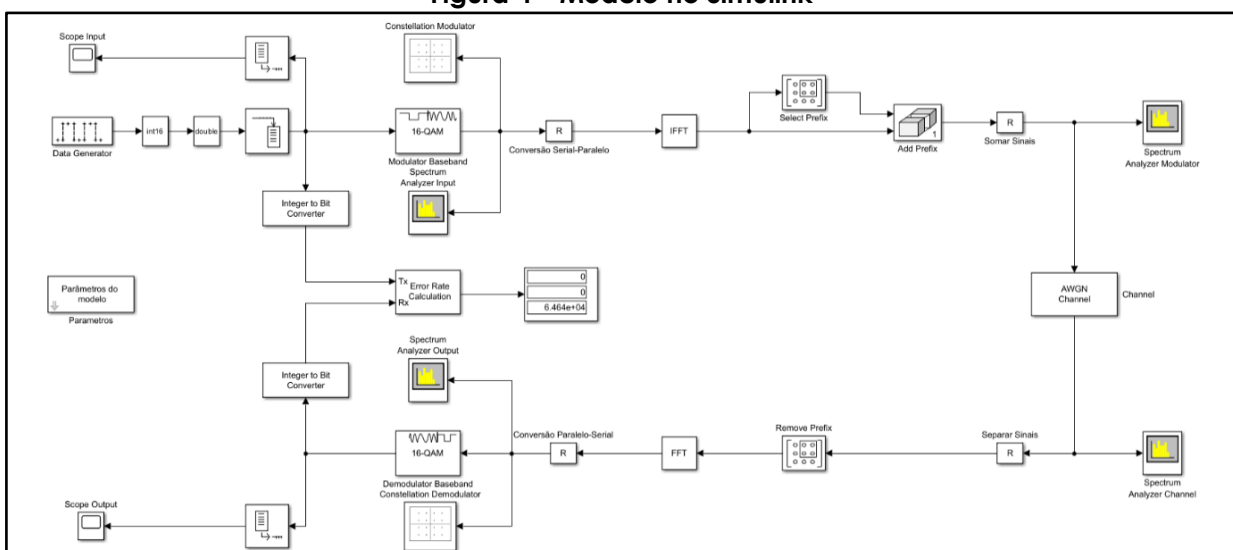
Algumas das principais desvantagens são a complexidade de geração e detecção dos símbolos OFDM, que aumentam quando o número de subportadoras é alto, devido à necessidade de sincronismo entre elas. Dessa forma, o número de subportadoras utilizadas deve ser uma solução de compromisso entre a estabilidade de fase e frequência e a capacidade de

combater o desvanecimento seletivo em frequência. Isso pode ser corrigido a partir de algoritmos de sincronização avançados que compensam os desvios de frequência e os atrasos de propagação. A técnica apresenta alta PAPR (*Peak-to-Average Power Ratio*) (Labalive, 2025), ou seja, elevada relação entre a potência de pico e a potência média, o que demanda o uso de amplificadores lineares mais complexos e eficientes em relação à energia transmitida. Isso pode ser corrigido com a codificação dos blocos, seleção de subportadoras e algoritmos de alocação de potência. Além disso, outras técnicas podem ser implementadas para resolver problemas com ruído de fase e interferência adjacente, como técnicas de cancelamento de interferência e equalização junto a algoritmos de monitoramento de condições do canal.

MATERIAIS E MÉTODOS (UTILIZAÇÃO DO MATLAB-SIMULINK)

Tendo em vista os aspectos levantados nas seções anteriores, os alunos da FT-Unicamp implementaram, no Matlab-Simulink, um sistema em blocos que realiza a modulação e a demodulação OFDM, com o objetivo de proporcionar uma compreensão mais aprofundada da técnica, sem o uso de blocos prontos e dedicados a essa modulação, visando a fins didáticos (Figura 4).

Figura 4 – Modelo no Simulink



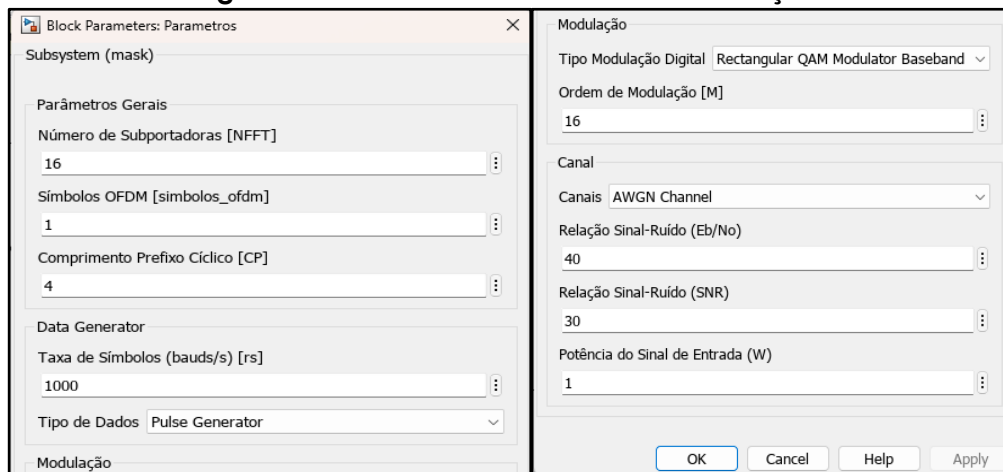
Fonte: elaborada pelos autores.

Para facilitar a configuração do modelo, foi criada a submáscara chamada “Parâmetros” (Figuras 4 e 5). Essa submáscara possui a capacidade de trocar os



blocos de Gerador de Sinais (“taxa e tipo de dados, campo Data Generator”), Modulação (“campo Tipo Modulação Digital e ordem da modulação, Modulator Baseband”), Demodulação (“Demodulator Baseband”) e Canal (“tipo de canal, relação sinal-ruído e potência do canal, Channel”), além de configurar os parâmetros dentro dos demais blocos no modelo (Figura 5):

Figura 5 – Parâmetros do Bloco e da Modulação



Fonte: elaborada pelos autores.

Foi realizada a comparação entre sinais de entrada (bloco “Data Generator”) de três tipos: Onda Quadrada (bloco “Discrete Pulse Generator”), Seno Discreto (bloco “Sine Wave”) e Números Inteiros Aleatórios (bloco “Random Integer Generator”), e também entre Canais de Transmissão (bloco “Channel”) do tipo AWGN (bloco “AWGN Channel”) e Rayleigh (bloco “SISO Fading Channel”).

Inicialmente foi configurado pela submáscara o bloco “Data Generator” para retornar um bloco “Random Integer Generator” usado para criar uma sequência de números inteiros aleatórios entre 0 a 15 (ordem de modulação $M=16$, ou seja, 16 QAM). À medida que o modelo é inicializado, esses números são organizados em um vetor coluna por meio do Buffer que os recebe. Em seguida, foi utilizado o bloco “Rectangular QAM Modulator Baseband” para converter esses números em símbolos QAM, realizando o mapeamento dos símbolos em fase e em quadratura.

Foi utilizado também um bloco “Reshape” (“Conversão Serial-Paralelo”) para converter essa coluna de dados em uma matriz ($NFFT \times \text{símbolos_ofdm}$), realizando a conversão Serial-Paralelo, em que as linhas ($NFFT = 16$) irão determinar as subportadoras do OFDM, e as colunas ($\text{símbolos_ofdm} = 1$) representam a sequência de símbolos OFDM transmitidos no tempo.

O próximo passo foi usar o bloco iFFT que realiza a Inversa da Transformada de Fourier para criar a forma de onda OFDM. O bloco iFFT pega os dados em paralelo

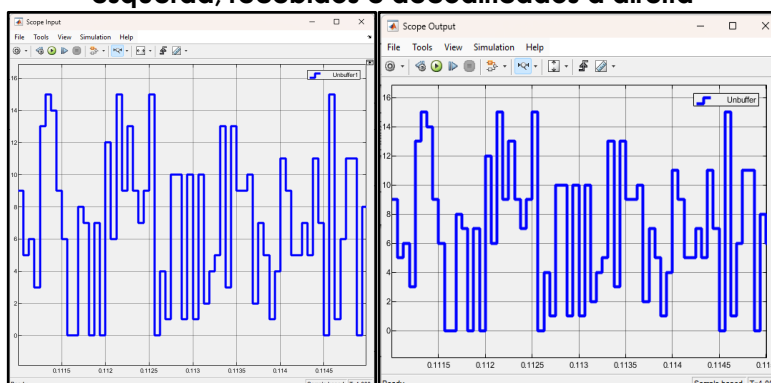
e transforma para o domínio do tempo. Nesse passo também se define o número de pontos de acordo com o número de subportadoras utilizadas ($N_{FFT} = 16$). Depois é inserido o prefixo cíclico utilizando os blocos Submatrix ("Select Prefix") e Concatenate ("Add Prefix"). O prefixo cíclico é uma cópia das últimas "CP" (=4) amostras do sinal OFDM inseridas no início do sinal, sendo definido pela variável. Na etapa seguinte, o sinal é convertido para a forma serial novamente por meio de um bloco "Reshape" ("Somar Sinais"), e o canal de transmissão é simulado, seja ele AWGN ou Rayleigh. Depois disso, realiza-se o processo inverso para a demodulação do sinal. Assim, remove-se o prefixo cíclico aplicado à FFT, a demodulação QAM e coloca-se um bloco "Error Bit Calculation" para analisar o BER (Bit Error Rate), comparando o valor transmitido com o valor recebido.

Após essa primeira simulação, foram inseridos blocos de Onda Quadrada, de Números Inteiros Binários e de Seno Discreto para analisar o comportamento da modulação OFDM considerando esses três tipos de entrada e os dois tipos de canal. Esse programa está pronto para ser explorado com valores mais próximos dos reais, que devem ser obtidos por medidas efetuadas na rede. Para esses resultados, os valores foram exagerados propositalmente (e.g. $1,8519e-3$ e não $9,2593e-8$ para desvio Doppler, valor *default*).

RESULTADOS DA SIMULAÇÃO

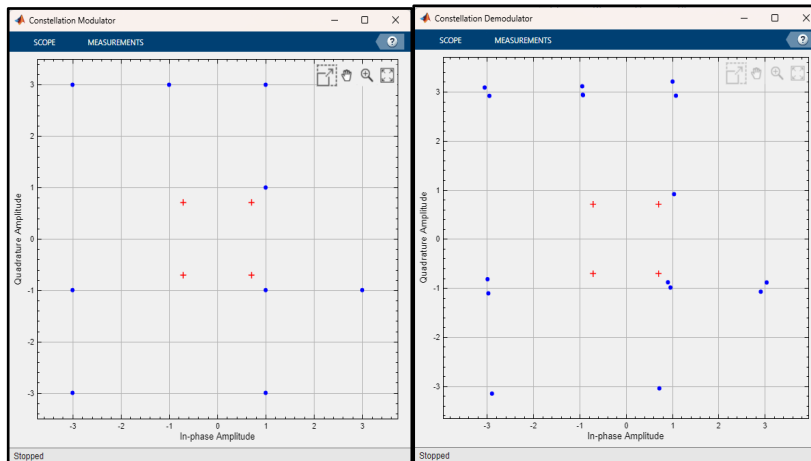
No primeiro teste, utilizando símbolos inteiros aleatórios, foram obtidas as seguintes imagens dos "Scopes" (osciloscópios), de entrada e saída (Figura 6), Analisador de Constelações (Figura 7) e Analisadores de Espectro (Figura 8):

Figura 6 – Resultados da primeira simulação. Números inteiros aleatórios: valores transmitidos à esquerda; recebidos e decodificados à direita



Fonte: elaborada pelos autores.

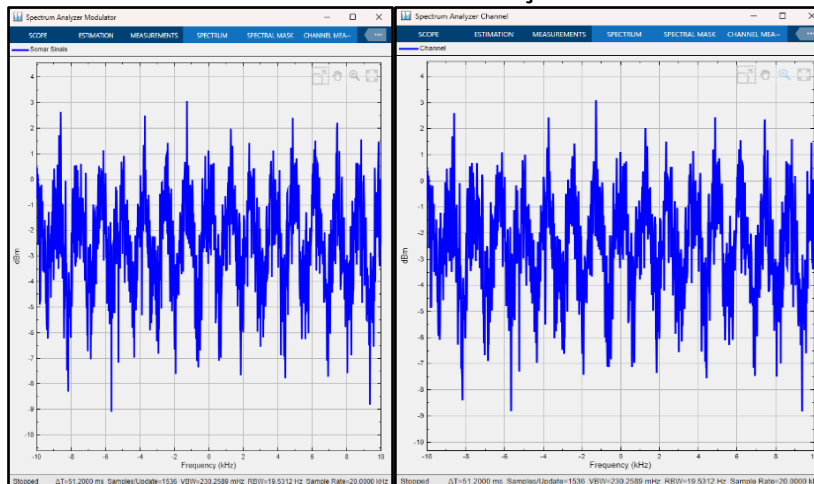
Figura 7 – Resultado da primeira simulação. Números inteiros aleatórios. 16 QAM – Valores transmitidos e recebidos.



Fonte: elaborada pelos autores.

Nota-se que os quatro pontos vermelhos no centro são apenas para referência do usuário. Observa-se a pequena variação (pequena distância) dos símbolos transmitidos em relação aos símbolos recebidos (em azul).

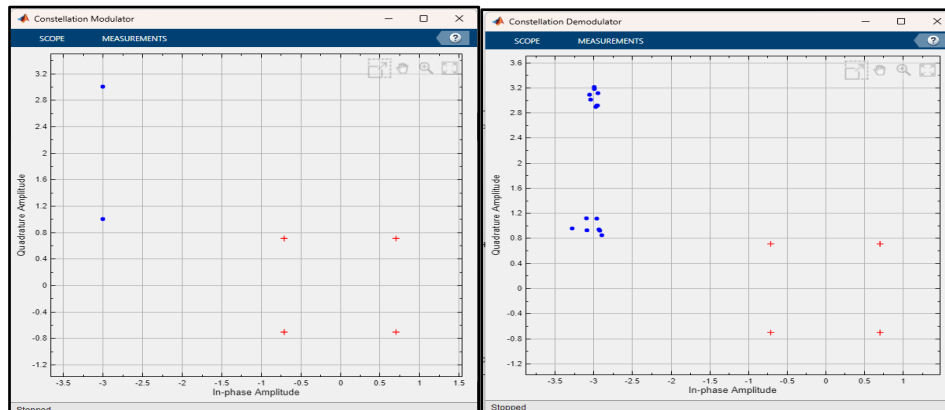
Figura 8 – Resultado da primeira simulação. Números inteiros aleatórios. Analisador de Espectro de entrada e de saída – Modulação 16 QAM



Fonte: elaborada pelos autores.

Em seguida, para os mesmos tipos de testes utilizando onda quadrada, foram obtidas as seguintes imagens dos "Scopes" (osciloscópios), de entrada e de saída (Figura 9), Analisador de Constelações de entrada e de saída, para modulação BPSK (Figura 10), e Analisadores de Espectro de entrada e de saída (Figura 11).

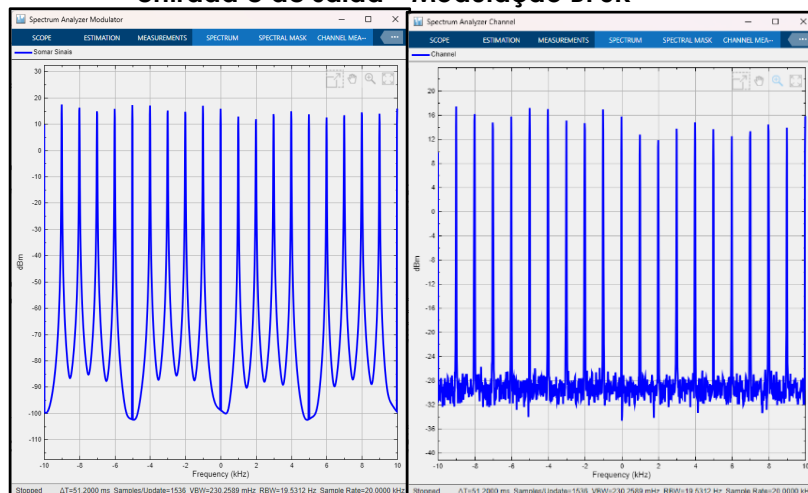
Figura 10 – Resultado da segunda simulação. Onda quadrada. BPSK – valores transmitidos e recebidos



Fonte: elaborada pelos autores.

Nota-se a maior variação dos símbolos recebidos (em azul) em relação aos transmitidos.

Figura 11 – Resultado da segunda simulação – onda quadrada. Analisador de Espectro de entrada e de saída – Modulação BPSK



Fonte: elaborada pelos autores.

Nota-se que no canal ruidoso foi utilizada uma modulação mais robusta (BPSK) com apenas dois símbolos. Comparando com o canal AWGN e 16QAM é possível notar visualmente que os erros de recepção foram maiores.

Além da Onda Quadrada e dos Números Inteiros Aleatórios, as saídas da simulação do Seno Discreto também foram colocadas na Tabela 1, mas não foram colocadas as figuras correspondentes no texto. Após vários testes combinando todos os cenários de tipo de entrada e canal, foram obtidos os seguintes resultados de Taxa de Erro de Bit (BER) (Tabela 1).



Deve-se observar que os valores obtidos foram propositalmente elevados para mostrar a variação da BER tendo em vista os parâmetros considerados na simulação efetuada. Por exemplo, 0,34 (34%) ou 0,47 (47%) de BER são inadmissíveis nos sistemas reais. Outro aspecto a ser ressaltado é de que um canal AWGN, com mesma relação E_b/N_0 que a de um canal Rayleigh, terá um desempenho melhor que o desse canal Rayleigh, que também é sensível aos múltiplos percursos realizados pelo sinal. Nos casos estudados, foram considerados dois percursos para o canal Rayleigh, mas o modelo permite um número maior de percursos que pode ser definido pelo usuário. O modelo pode ser adaptado para ficar o mais próximo possível da rede real.

Tabela 1 – Resultados de Taxa de Erro de Bit (BER)

Canal NFFT=16 e CP = 4		Onda Quadrada (BER)	Seno Discreto (BER)	Número Inteiro Aleatório (BER)
AWGN	$E_b/N_0 = 40$	0	0	0
	$E_b/N_0 = 10$	0,3491	0,3240	0,3508
	$E_b/N_0 = 1$	0,4499	0,4060	0,4507
Rayleigh	Máximo Desvio Doppler (Hz): 0 Delay Multipercurso (s): 0 Ganho Multipercurso (dB): 0	0	0	0
	Máximo Desvio Doppler (Hz): $1,8519e-6$ Delay Multipercurso (s): $[0 \ 2e-6]$ Ganho Multipercurso (dB): $[0 \ -3]$	0,5301	0,4993	0,4548
	Máximo Desvio Doppler (Hz): $1,8519e-3$ Delay Multipercurso (s): $[0 \ 2e-6]$ Ganho Multipercurso (dB): $[0 \ -3]$	0,3600	0,4993	0,4533
	Máximo Desvio Doppler (Hz): $1,8519e-6$ Delay Multipercurso (s): $[0 \ 2e-3]$ Ganho Multipercurso (dB): $[0 \ -3]$	0,1275	0,2669	0,4382
	Máximo Desvio Doppler (Hz): $1,8519e-6$ Delay Multipercurso (s): $[0 \ 2e-6]$ Ganho Multipercurso (dB): $[0 \ -30]$	0,4078	0,5316	0,4740

Fonte: elaborada pelos autores.



CONSIDERAÇÕES E OBSERVAÇÕES FINAIS

Por meio do Simulink, observou-se como o sistema OFDM se comporta em diferentes cenários envolvendo alto ruído e degradação do sinal transmitido. Em função do tipo de modulação em quadratura (16QAM), o sistema apresentou pouca estabilidade da BER no canal AWGN, mas alta variação no canal Rayleigh. Após vários testes efetuados, nota-se que a taxa de erro observado no canal Rayleigh ocorre em função das reflexões provocadas pelos multipercursos. O sistema apresentou melhor comportamento quando o atraso de multipercurso é maior (mas não para todos os tipos de entradas) e não apresentou variação significativa após aumento no Máximo Desvio Doppler, o BER diminuiu para onda quadrada.

Observa-se que o sistema OFDM implementado com dois percursos apresenta certa robustez quando há aumento no desvio Doppler (canal seletivo em frequência). Outro fato é que o aumento do ganho no segundo percurso não impacta significativamente os valores da BER. Por fim, além dos resultados em termos de taxa de erros de bits, foi também observada a proximidade das subportadoras umas com as outras no espectro da frequência, o que resulta em uma estreita banda de transmissão de dados, e, portanto, em uma melhor eficiência espectral.

Nos casos práticos, outras simulações podem e devem ser feitas. Pode-se dizer que não se pode atribuir os valores de BER a um único tipo de parâmetro, mas à atuação conjunta de vários parâmetros, incluindo os tipos de fontes/frequências e modulação digital. Isso torna a simulação ainda mais adequada para o planejamento da rede. Para trabalhos futuros, outras características do sinal no canal Rayleigh devem ser contempladas, como a variação do número de percursos e de seus respectivos parâmetros (desvio Doppler, atraso e ganho).

A experiência permitiu que os alunos do curso de Engenharia de Telecomunicações da FT-Unicamp alcançassem uma melhor compreensão dos conteúdos ministrados, além do desenvolvimento deste artigo, que poderá servir como base a ser explorada por outros alunos e cursos. Finalmente, a abordagem “mão na massa” e a possibilidade de atuação ativa por parte dos alunos demonstraram que houve a assimilação dos conceitos básicos apresentados no curso de Tópicos Especiais em Telecomunicações.



Agradecimentos

Este trabalho foi apoiado pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (subvenção CAPES, nº 001).

REFERÊNCIAS

- COUTINHO, P. S. **OFDM** (Orthogonal Frequency Division Multiplexing). UFRJ, 2008. Disponível em: https://www.gta.ufrj.br/ensino/eel879/trabalhos_vf_2008_2/coutinho/OFDM.OFDMA. Acesso em: 9 nov. 2024.
- DELTASHOP. **Modulação OFDM**. Disponível em: https://shopdelta.eu/modulacao-ofdm_I7_aid789.html. Acesso em: 9 nov. 2024.
- KEYSIGHT TECHNOLOGIES. **OFDM Basic Principles Overview**. Disponível em: https://helpfiles.keysight.com/csg/89600B/Webhelp/Subsystems/wlan-ofdm/content/ofdm_basicprinciplesoverview.htm. Acesso em: 9 nov. 2024.
- LABALIVE. **Peak to average power ratio of OFDM systems**. Disponível em: <https://www.etti.unibw.de/labalive/experiment/papofdm/#:~:text=This%20tutorial%20points%20out%20that,an%20OFDM%20system%20is%20N.&text=PAPR%20is%20the%20peak%20power%20divided%20by%20the%20average%20power>. Acesso em: 20 ago. 2025.
- RAPPAPORT, T. **Wireless Communications: Principles and Practice**. Upper Saddle River: Pearson, 2000.
- UFPR. Universidade Federal do Paraná. **A Técnica de Transmissão OFDM**. Curitiba. Disponível em: <http://www.eletrica.ufpr.br/p/arquivostccs/27.pdf>. Acesso em: 9 nov. 2024.
- WIKIPEDIA. **Orthogonal frequency-division multiplexing**. Disponível em: https://en.wikipedia.org/wiki/Orthogonal_frequency-division_multiplexing. Acesso em: 9 nov. 2024.
- WRIGHT, G.; BURKE, J. **Orthogonal Frequency-division Multiplexing (OFDM)**, Nemertes Research. Disponível em: <https://www.techtarget.com/searchnetworking/definition/orthogonal-frequency-division-multiplexing>. Acesso em: 20 ago. 2025.