



Tutorial

Modulação OFDM no Simulink

Laboratórios Didáticos para Ensino de Sistemas de
Comunicação

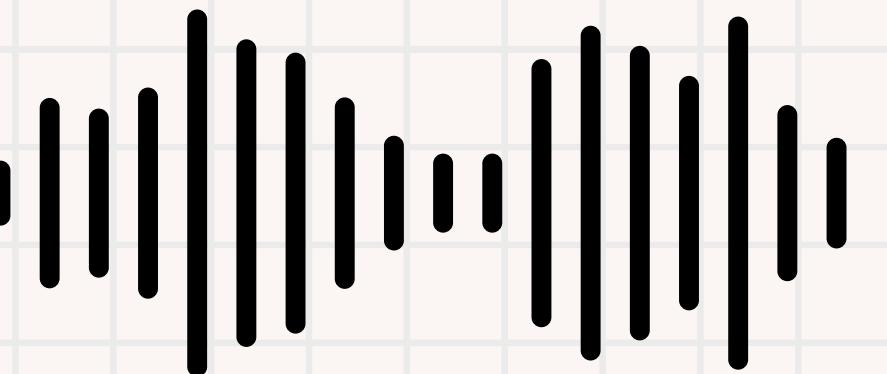


Materiais

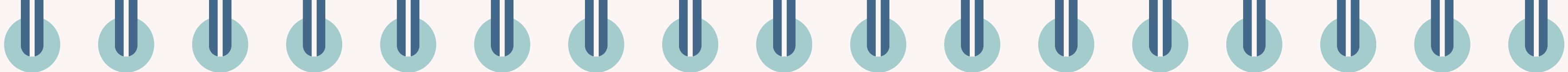
Pré-requisitos



**MATLAB + Simulink
instalados**



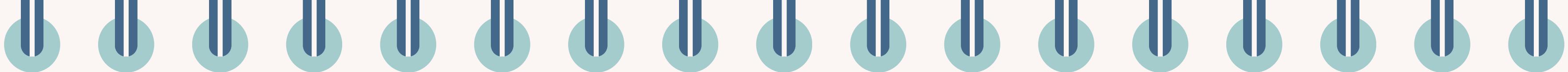
**Conceito rápido de
modulação OFDM**



Introdução

Simulink

A modulação OFDM divide um stream de dados de alta taxa em diversos streams de baixa taxa, que são transmitidos em múltiplas subportadoras ortogonais. Isso combate a interferência inter-símbolos (ISI) e o desvanecimento (fading) em canais de banda larga. No Simulink, é possível modelar facilmente o sistema OFDM, incluindo realizar simulações para validar o desempenho em cenários de multipath e otimizar os parâmetros (como espaçamento entre subportadoras e prefixo cíclico), garantindo alta taxa de dados e robustez em canais seletivos em frequência.



Introdução

Fluxo de trabalho com ModelSim



Modelagem no Simulink (Modulação OFDM)



Simulação



Desenvolvimento

Passo a Passo



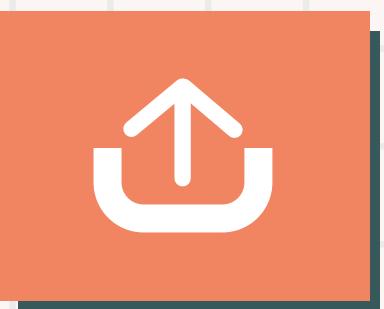


Desenvolvimento

Simulink

Arquivo do projeto

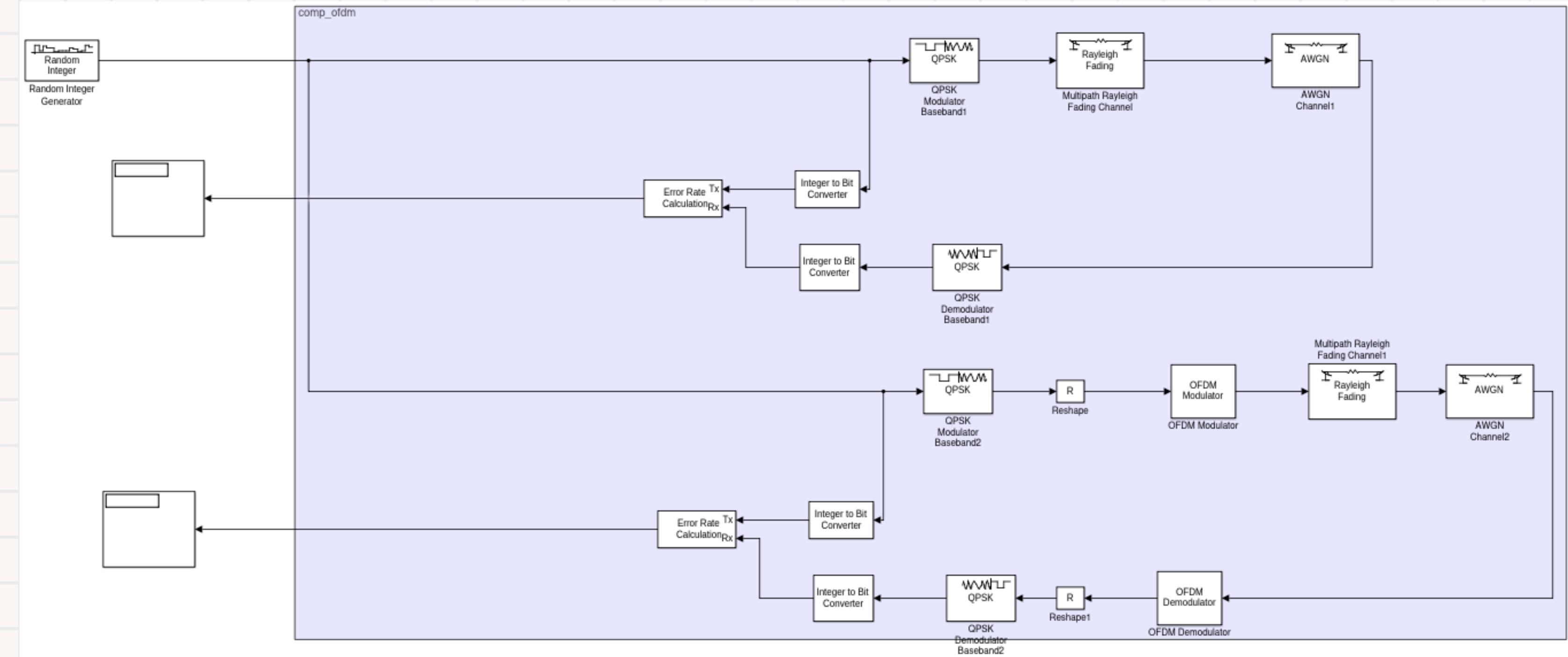
Para facilitar, é disponibilizado arquivo do modelo em Simulink no Github:



[Link Download](#)

Desenvolvimento

Modulação OFDM - Sistema





Desenvolvimento

OFDM - Sistema

No projeto você já encontra:

- **Fonte de bits (Random Integer Generator)**: Gera os dados de entrada aleatórios (em formato inteiro) que serão transmitidos.
- **QPSK Modulator**: Mapeia os bits de entrada para símbolos complexos QPSK.
- **Reshape**: Paraleliza os símbolos em blocos, preparando-os para o OFDM.
- **OFDM Modulator**: Realiza a IFFT, cria o sinal OFDM e adiciona o Prefixo Cíclico.
- **AWGN Channel**: Adiciona Ruído Branco Gaussiano ao sinal.
- **OFDM Demodulator**: Realiza a FFT e remove o Prefixo Cíclico.
- **Reshape**: Converte os símbolos de volta para uma sequência serial.
- **QPSK Demodulator**: Demodula os símbolos QPSK, convertendo-os de volta para bits.
- **Error Rate Calculation (BER)**: Compara bits transmitidos e recebidos, calculando a Taxa de Erro.





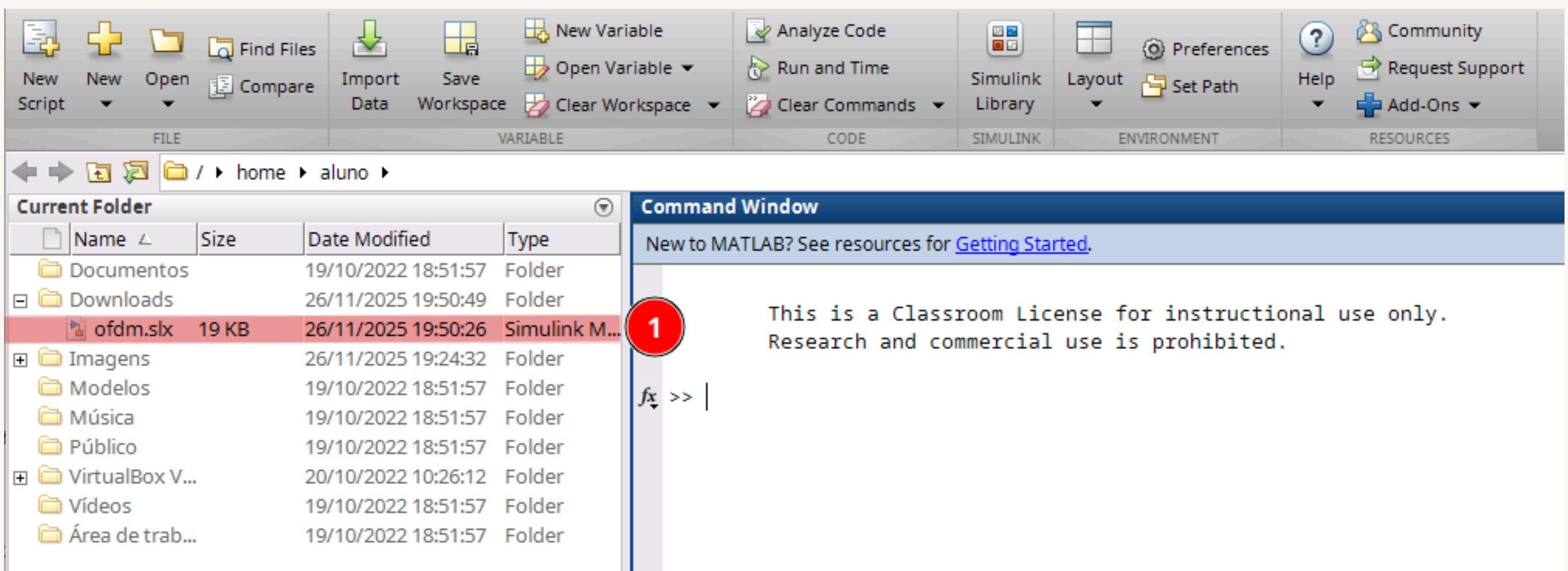
Desenvolvimento



A seguir a demonstração de como usar o Simulink...



Desenvolvimento



Abra o Matlab

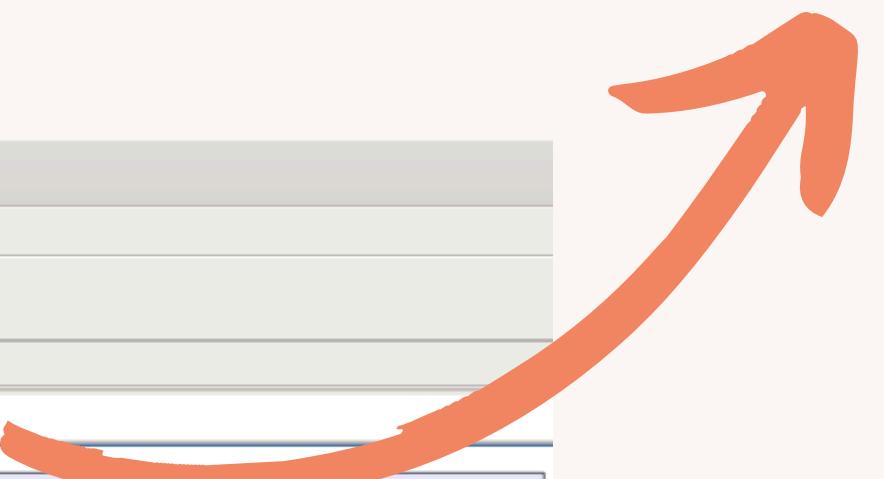
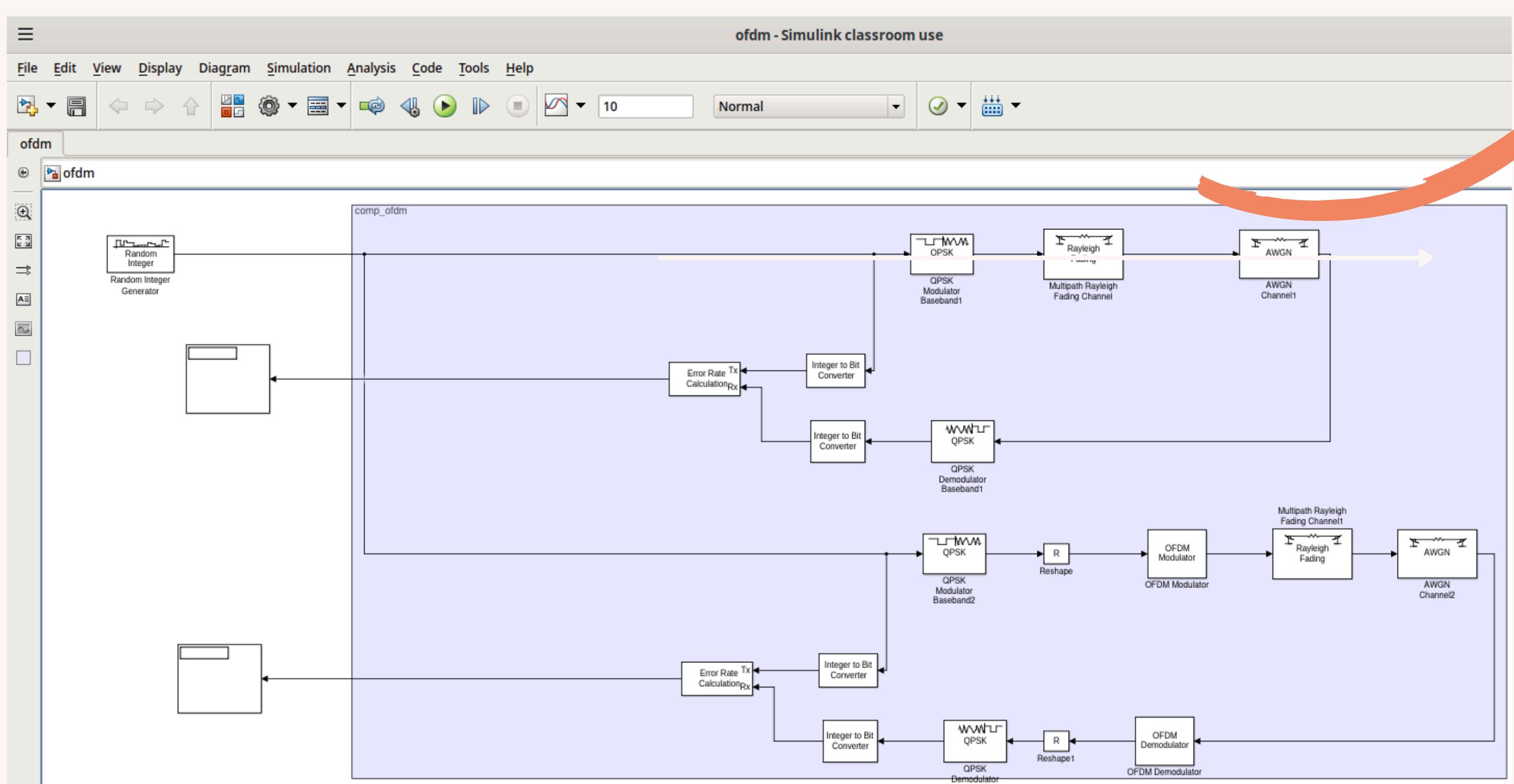
Vá até ao diretório onde foi salvado o arquivo **ofdm.slx**

1 - Dê um duplo click



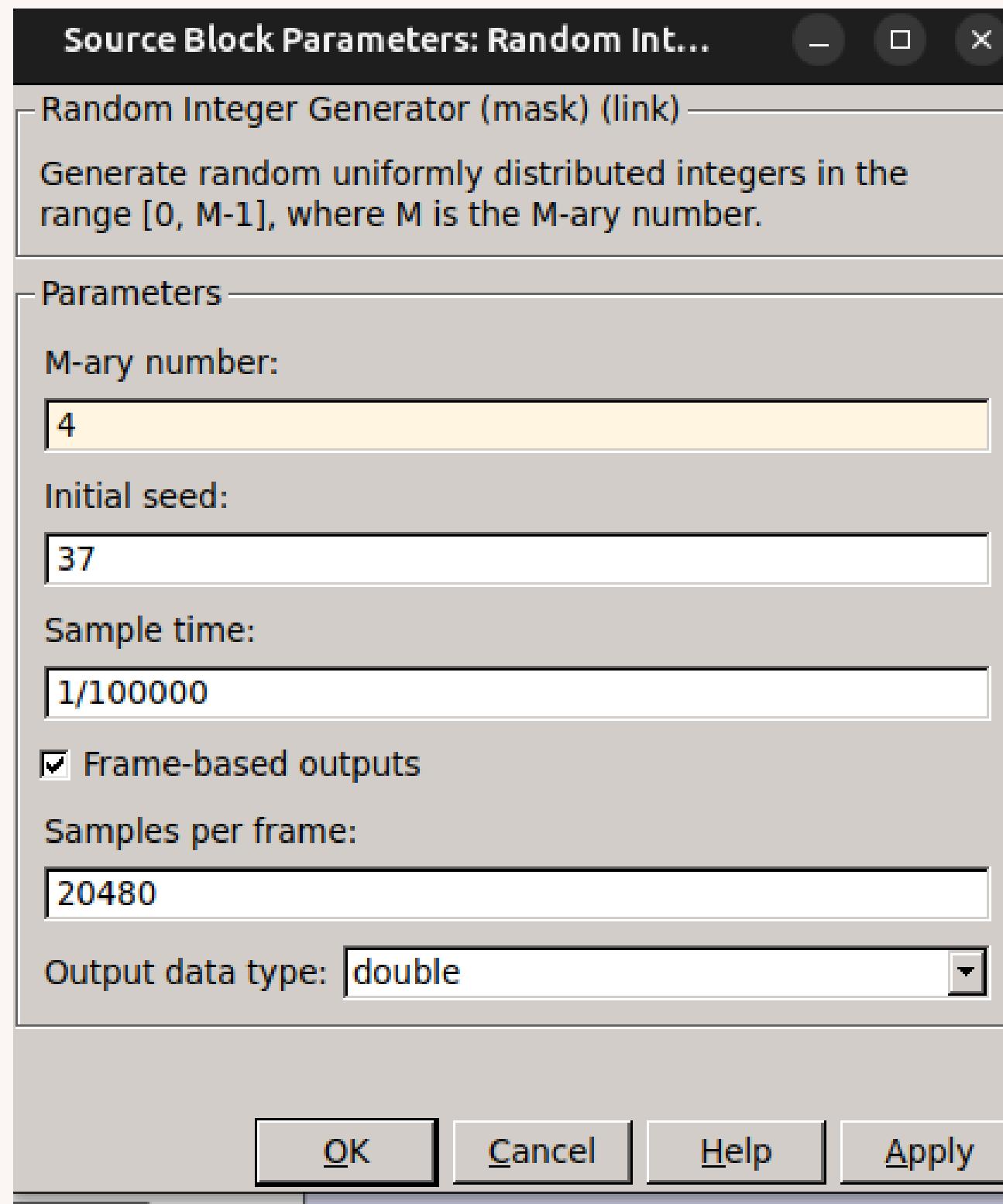
Desenvolvimento

ofdm - Simulink classroom use



Abrirá essa aba
do simulink

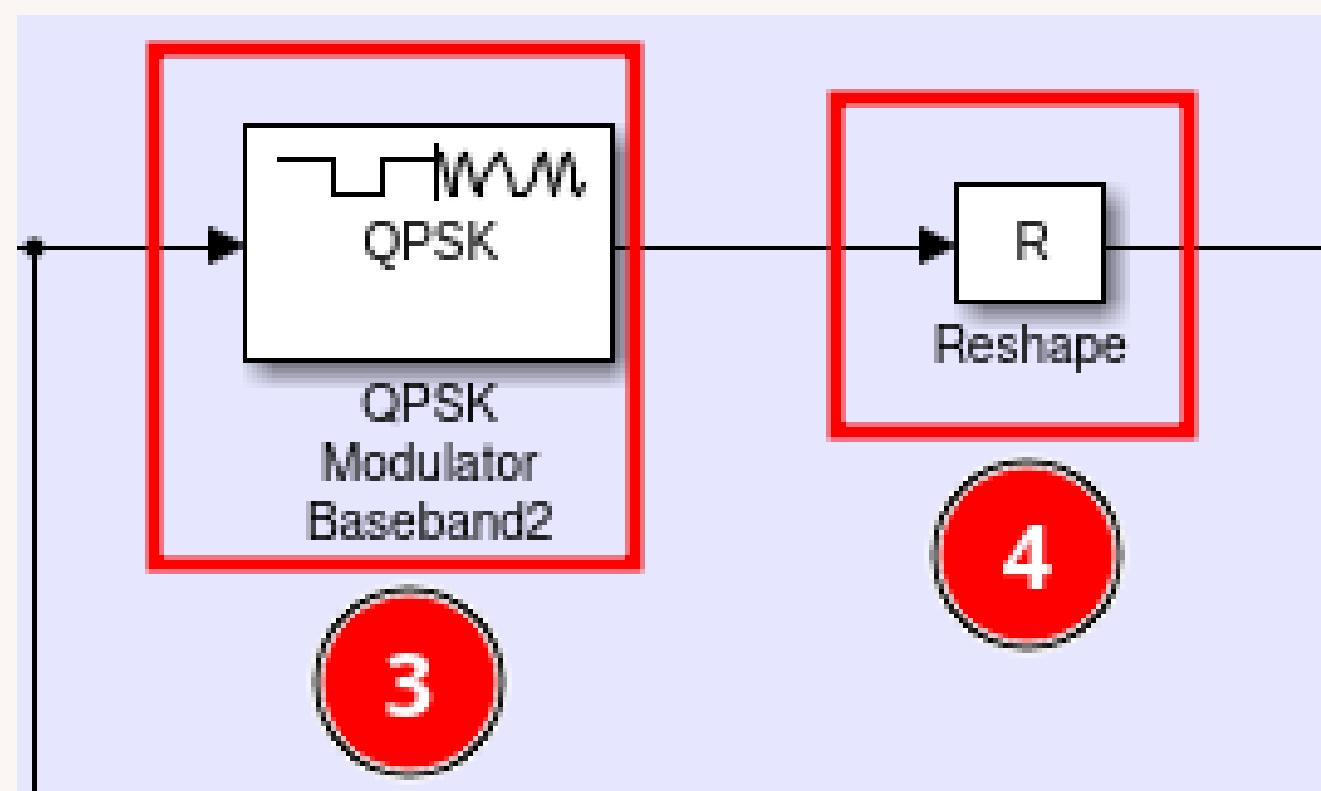
Desenvolvimento



2 - **Random Integer Generator** é responsável por gerar uma sequência uniforme de inteiros aleatórios para servir como a fonte de dados (bits) de entrada em sistemas de comunicação

- **M-ary number = 4:** Define o alcance dos inteiros gerados(0, 1, 2 e 3).
- **Initial seed = 37:** A semente do gerador aleatório define o ponto inicial da sequência, garantindo que a simulação produza sempre a mesma sequência.
- **Sample time = 1/10000:** Representa o intervalo entre amostras; quanto menor o tempo, maior a taxa de geração de bits, ideal para sistemas Turbo.
- **Samples per frame = 20480:** Define o tamanho do pacote de dados. A cada tempo de amostra, o bloco gera um vetor (quadro) contendo 20480 inteiros aleatórios.

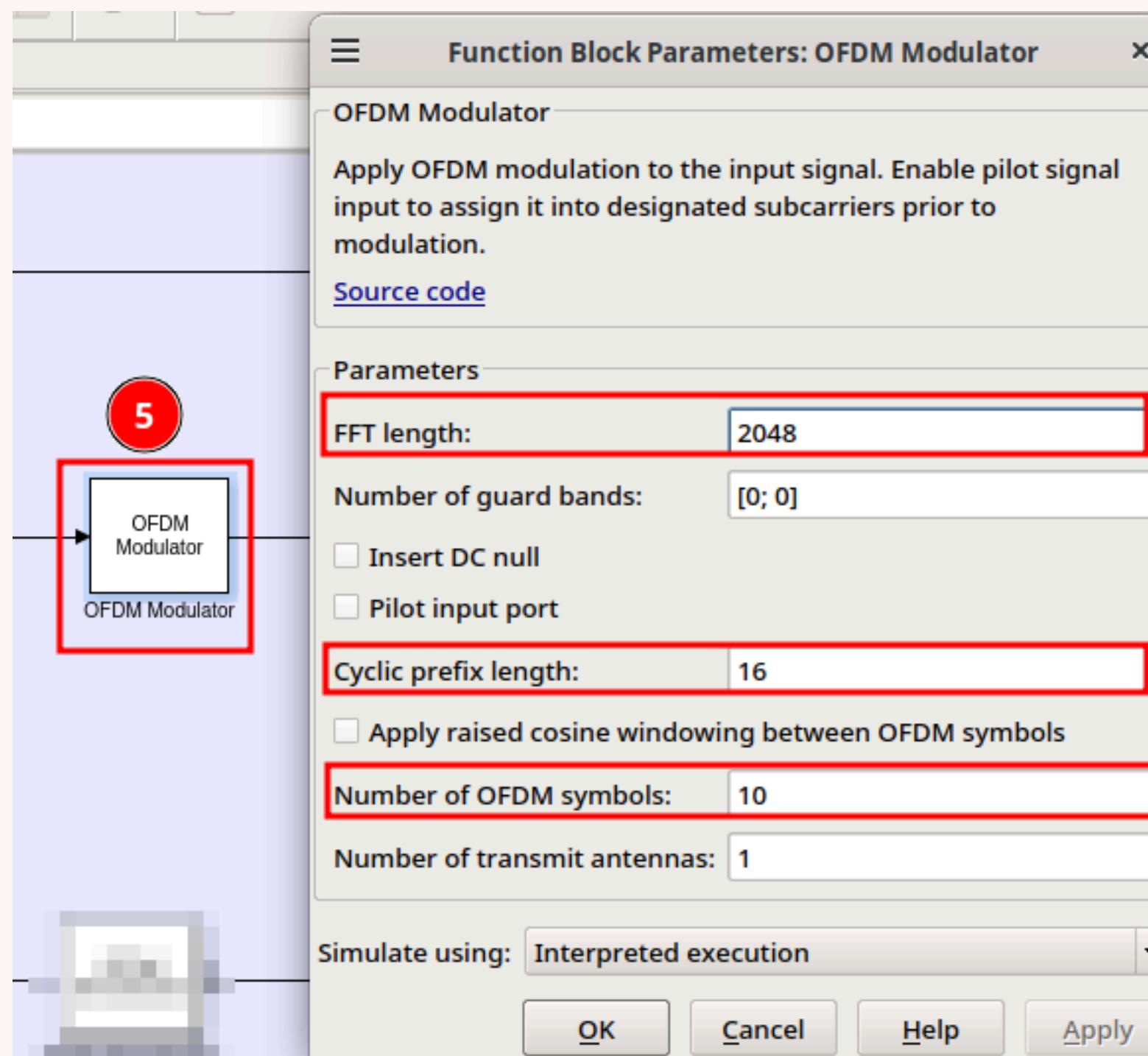
Desenvolvimento



3 - **QPSK Modulator Baseband:** Recebe essa sequência de bits e os mapeia para símbolos complexos QPSK, transformando o fluxo de bits em um fluxo de símbolos no domínio complexo, prontos para a modulação de subportadoras

4 - **Reshape(Reorganização):** É essencial, pois converte o fluxo serial de símbolos complexos em blocos paralelos (vetores) de dados, uma estrutura necessária para decompor em subportadoras.

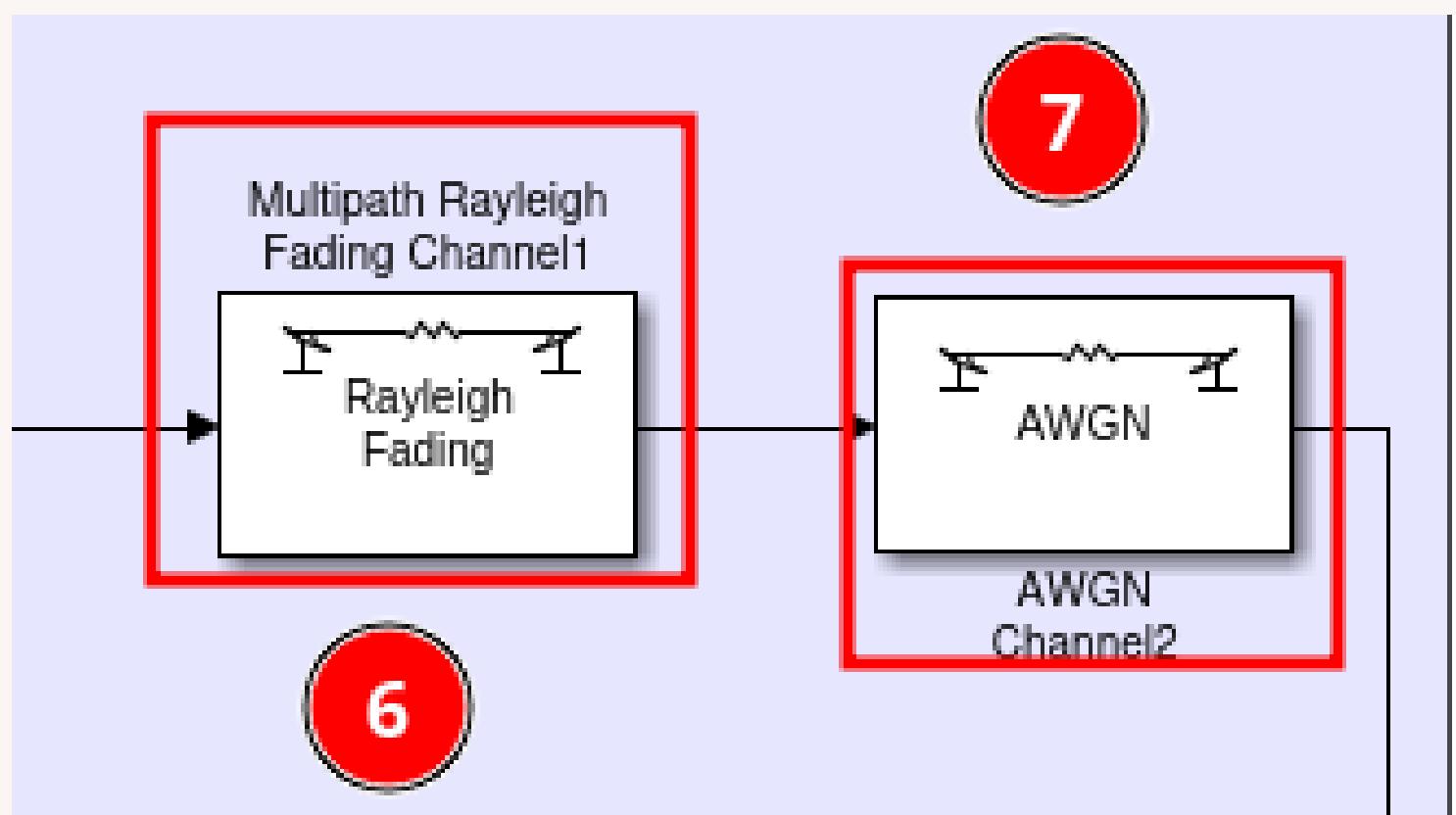
Desenvolvimento



5 - **OFDM Modulator**: é o componente central do transmissor OFDM. Ele recebe os símbolos paralelos mapeados por QPSK e os transforma em um sinal no domínio do tempo pronto para transmissão.

- **FFT length = 2048**: Define o tamanho da IFFT. Este valor determina o número total de subportadoras no sinal OFDM.
- **Cyclic prefix length = 16**: Define o tamanho do Prefixo Cíclico
- **Number of OFDM symbols**: Define quantos símbolos OFDM serão gerados por quadro ou por bloco de simulação.

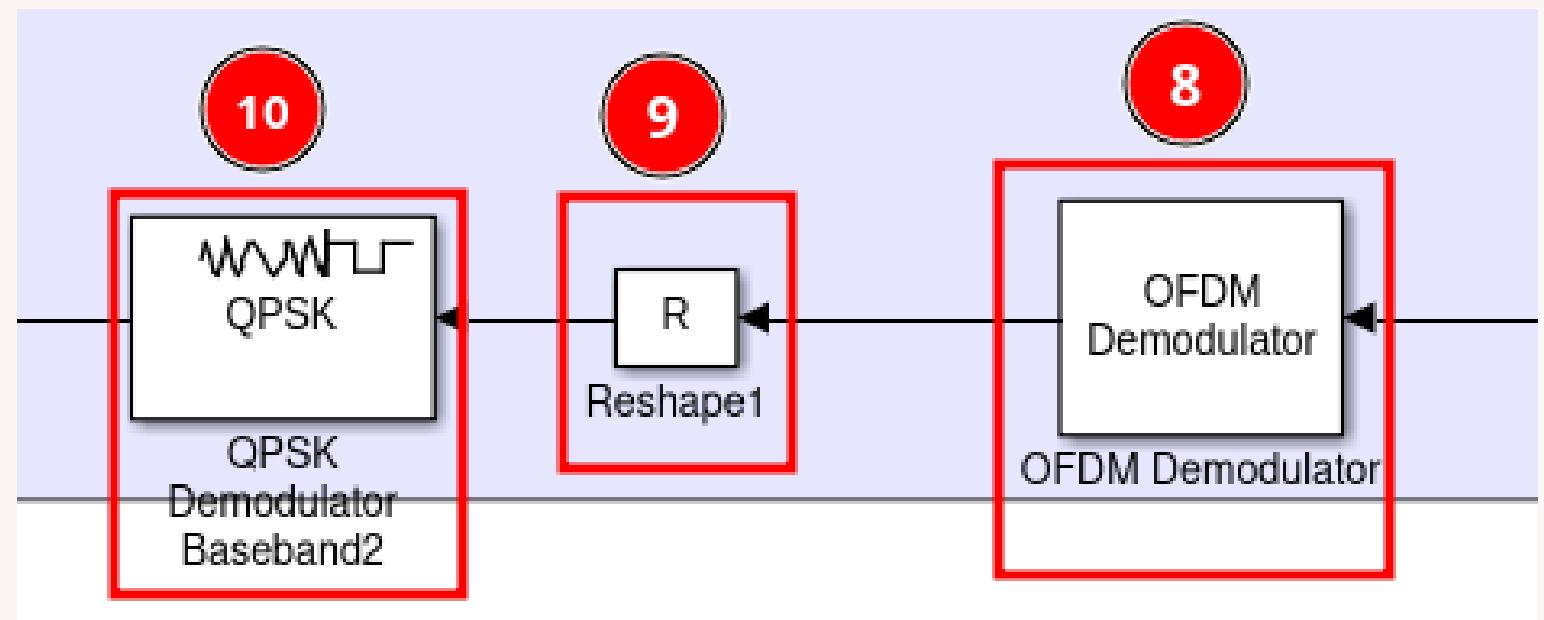
Desenvolvimento



5 - **Multipath Rayleigh Fading Channel:** Simula a propagação real com multipercorso e variações rápidas → representa o canal sem linha de visada direta.

6 - **AWGN Channel:** Adiciona ruído térmico gaussiano ao sinal → permite analisar o desempenho em diferentes SNR.

Desenvolvimento



8 - **OFDM Demodulator**: Ele recebe o sinal, remove o Prefixo Cílico (CP) e executa a Transformada Rápida de Fourier (FFT).

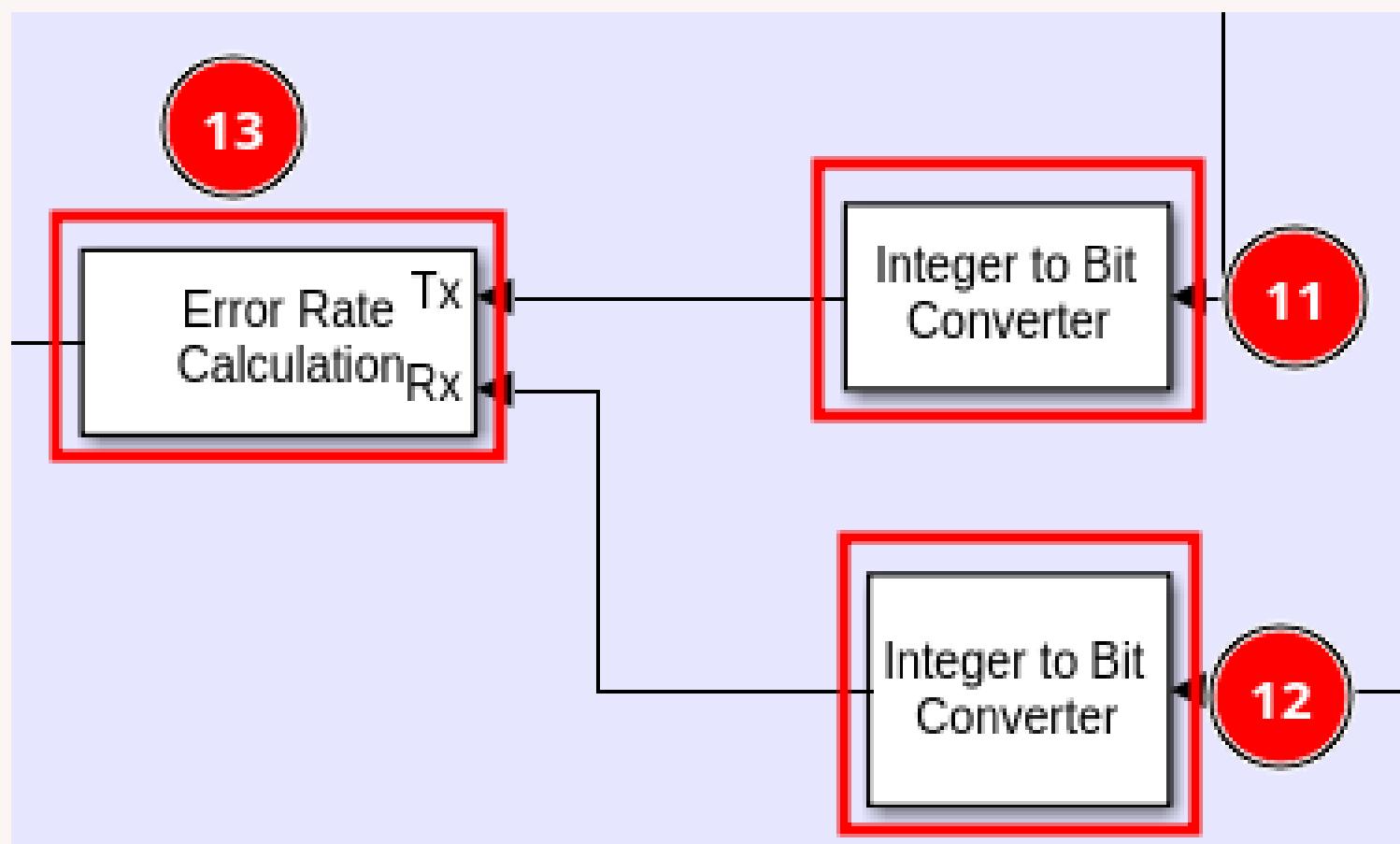
A FFT converte o sinal do domínio do tempo para o domínio da frequência, isolando os símbolos complexos transmitidos em cada subportadora.

9 - **Reshape**: Converte os blocos paralelos de símbolos complexos (vindos do Demodulador OFDM) de volta para um fluxo serial contínuo.

10 - **QPSK Demodulator Baseband**: Ele recebe o fluxo serial de símbolos complexos e, com base em suas coordenadas, decide qual par de bits (00, 01, 10 ou 11) corresponde ao símbolo recebido.

O resultado é a sequência final de bits digitais recuperados.

Desenvolvimento



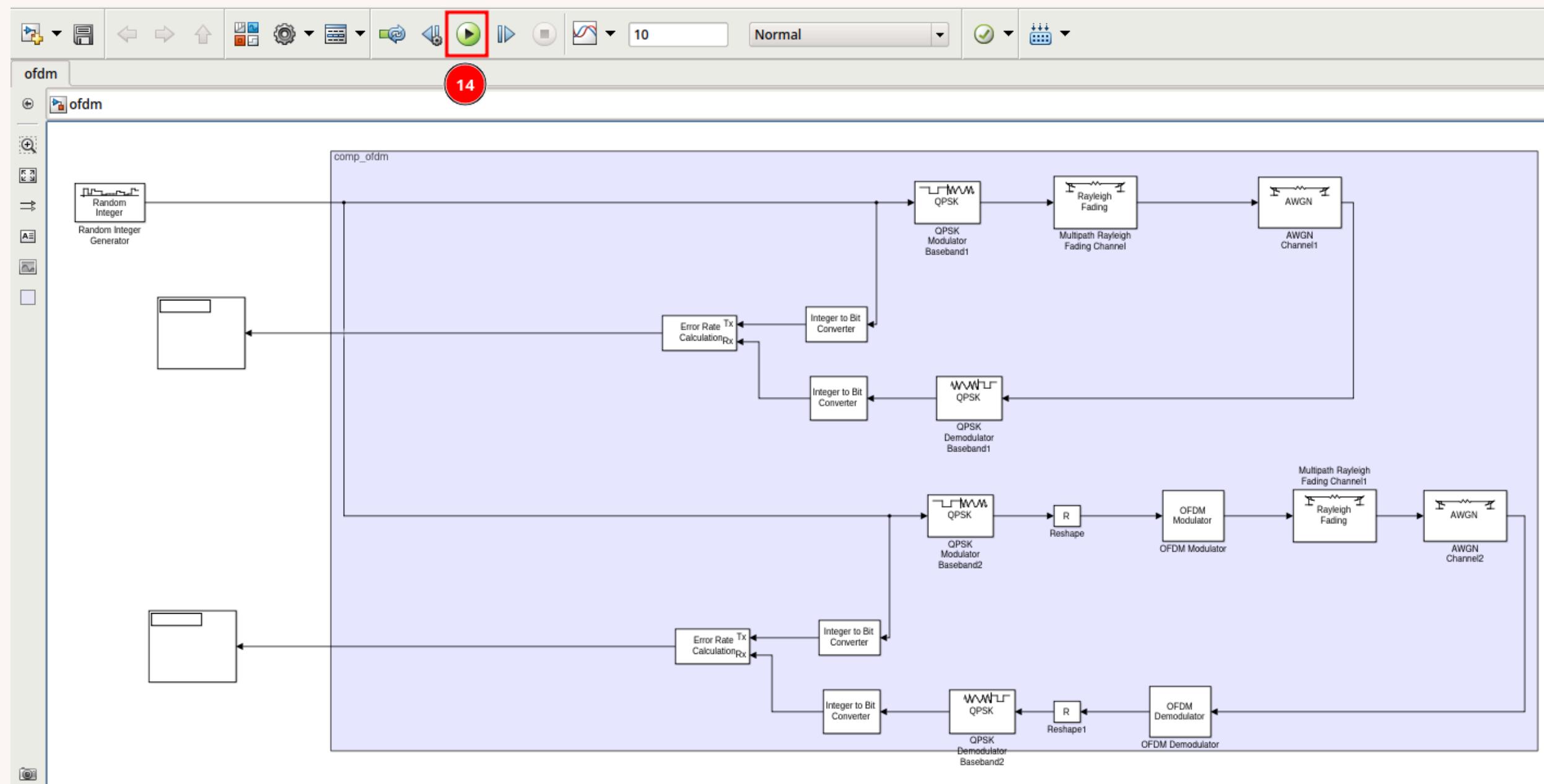
11 - **Integer to Bit Converter(Dados Transmitidos - Tx):** Transforma os inteiros da fonte de dados na sequência binária (bits) original que foi enviada.

12 - **Integer to Bit Converter(Dados Recebidos - Rx):** Transforma os símbolos ou valores inteiros recuperados do demodulador de volta para a sequência binária (bits).

13 - **Error Rate Calculation:** Ele compara, bit a bit, a sequência de dados Tx (Transmitida) com a sequência de dados Rx (Recebida).

- Saída Principal: Taxa de Erro de Bit (BER), que é a razão entre o número de bits incorretos e o total de bits transmitidos.

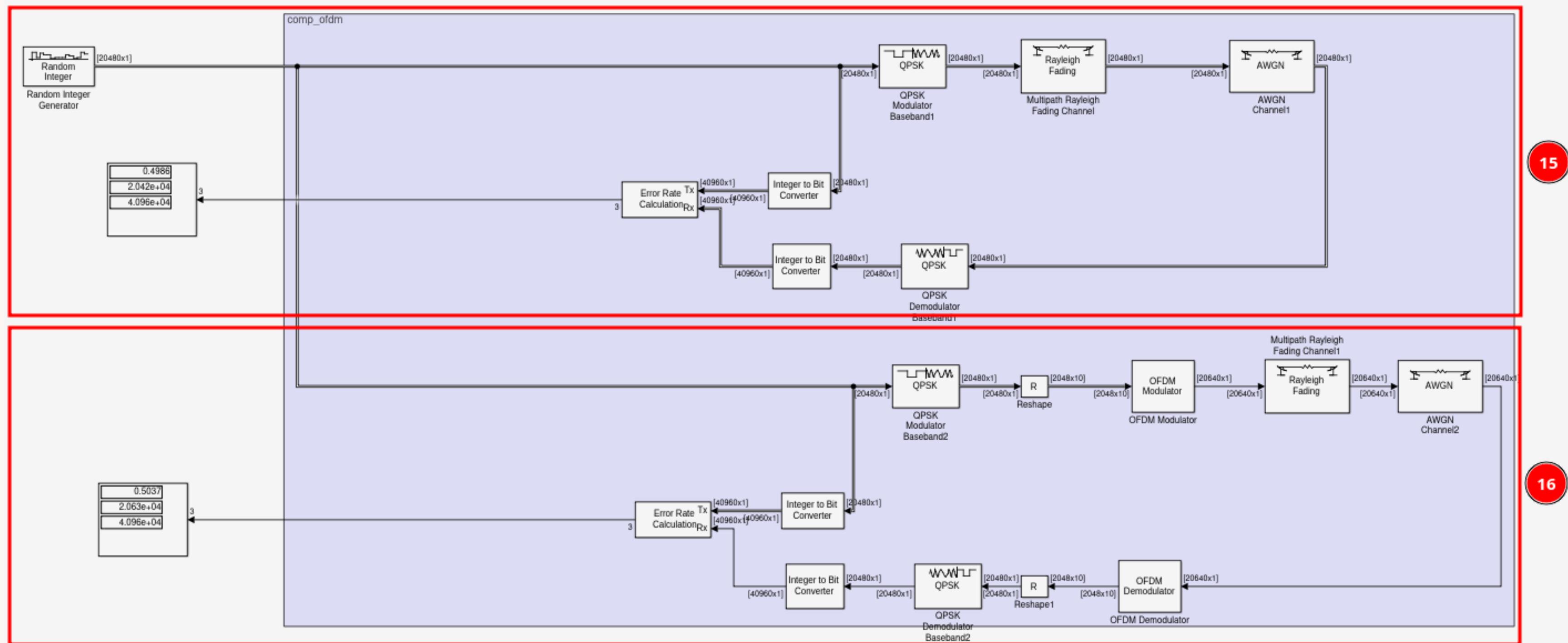
Desenvolvimento



11 - Clique em **run**

Desenvolvimento

15 - Sem Modulação OFDM
16 - Com Modulação OFDM





Desenvolvimento

15 - Sem Modulação OFDM:

- BER ≈ 0.5006
- Erros $\approx 1.005 \times 10^6$
- Bits comparados $\approx 2.007 \times 10^6$

16 - Com Modulação OFDM:

- BER ≈ 0.5003
- Erros $\approx 1.004 \times 10^6$
- Bits comparados $\approx 2.007 \times 10^6$

Desenvolvimento

Interpretação dos Resultados

O sistema **COM OFDM** apresenta uma Taxa de Erro de Bit (BER) de 0.5003, que é marginalmente menor que a BER de 0.5006 do sistema **SEM OFDM**.

- 1. Melhora Técnica:** Esta diferença, embora minúscula, pode ser atribuída à capacidade inerente do OFDM de mitigar a **Interferência Inter-Símbolos (ISI)** causada pelo canal **Rayleigh Fading** (propagação por múltiplos caminhos). O uso do **Prefixo Cíclico** pelo OFDM reduz essa interferência, resultando em uma taxa de erro ligeiramente inferior.
- 2. Saturação por Ruído:** A melhora é tão pequena porque a simulação está sendo executada sob condições de SNR (Relação Sinal-Ruído) extremamente baixa. O **ruído AWGN** e o desvanecimento do canal são tão intensos que saturam o sistema (BER $\approx 50\%$), impedindo que os benefícios do OFDM (como a redução de ISI) se traduzam em uma redução significativa da taxa de erro. O ruído domina completamente a performance.

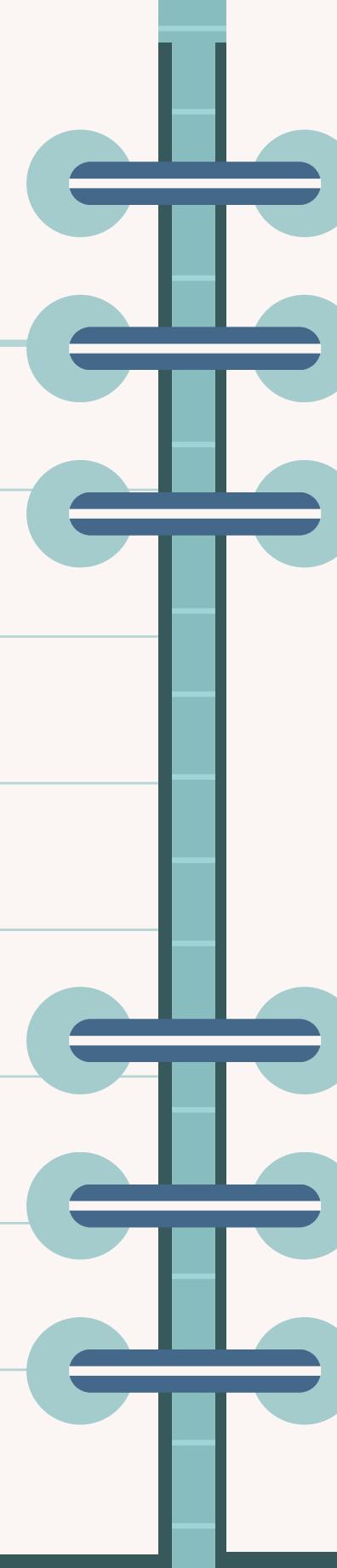
Em resumo, a modulação OFDM funcionou tecnicamente ao reduzir o ISI (por isso a BER é menor), mas a magnitude do ruído presente no canal é o fator principal, mantendo o desempenho geral em um nível inaceitável (50%).



Atividades

Ajuste de SNR no canal AWGN

Objetivo: Observar como o BER se comporta com diferentes valores de SNR.



Tarefa:

- Alterar o parâmetro SNR do bloco AWGN Channel para: 0 dB, 5 dB, 10 dB, 15 dB, 20 dB;
- Rodar a simulação para cada caso;
- Registrar e plotar o BER em função do SNR.

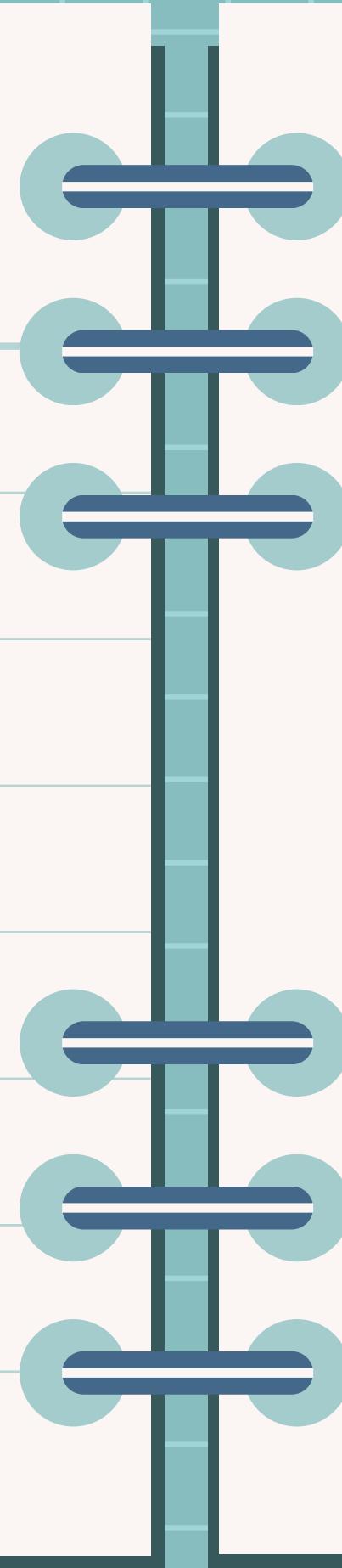
Pergunta:

Em qual faixa de SNR o sistema OFDM começa a ficar confiável?

Atividades

Impacto do Prefixo Cílico

Objetivo: Entender o papel do CP na redução de ISI.



Tarefa:

- Modificar o Cyclic Prefix length no OFDM Modulator para valores: 0, 8, 16, 32, 64;
- Rodar a simulação para cada caso.

Perguntas:

- 1- Qual valor de CP parece mais adequado?
- 2- O CP muito longo prejudica a taxa de transmissão?

Atividades

Número de subportadoras

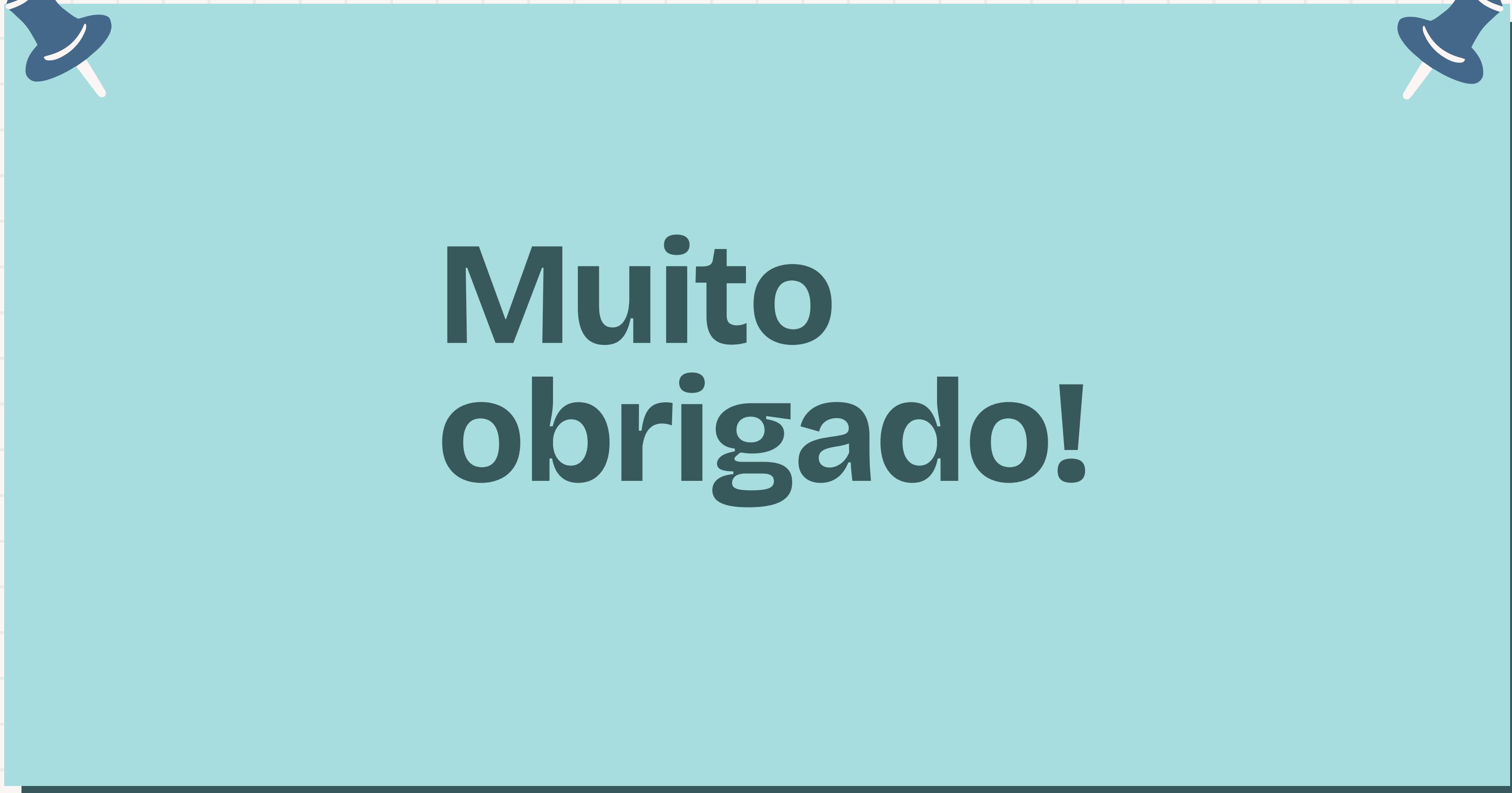
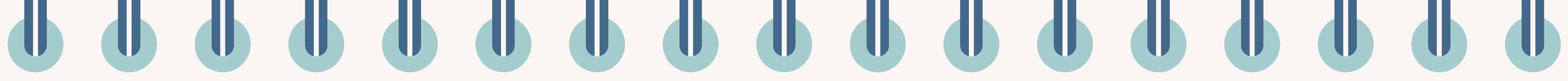
Objetivo: Ver como a granularidade do espectro influencia o sistema.

Tarefa:

- Trocar o FFT length (subportadoras) para: 256 → 512 → 1024 → 2048 → 4096.

Pergunta:

O BER melhora ou não faz muita diferença?



**Muito
obrigado!**