Tutorial

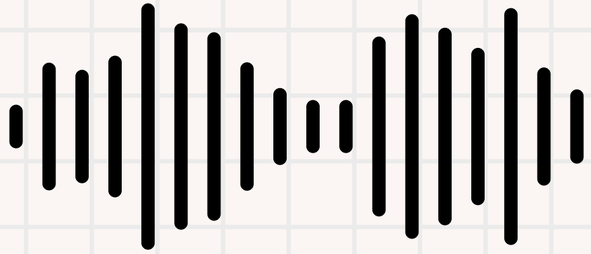
Codificação Turbo no Simulink

Laboratórios Didáticos para Ensino de Sistemas de Comunicação

Materiais

Pré-requisitos

MATLAB + Simulink instalados



Conceito rápido de codificação TURBO

Introdução

Simulink

A codificação turbo combina dois ou mais codificadores convolucionais e utiliza um processo de decodificação iterativo para melhorar a correção de erros. No Simulink, é possível modelar facilmente o sistema de codificação turbo, realizar simulações para validar o desempenho, garantindo a eficiência na transmissão de dados, mesmo em canais ruidosos.

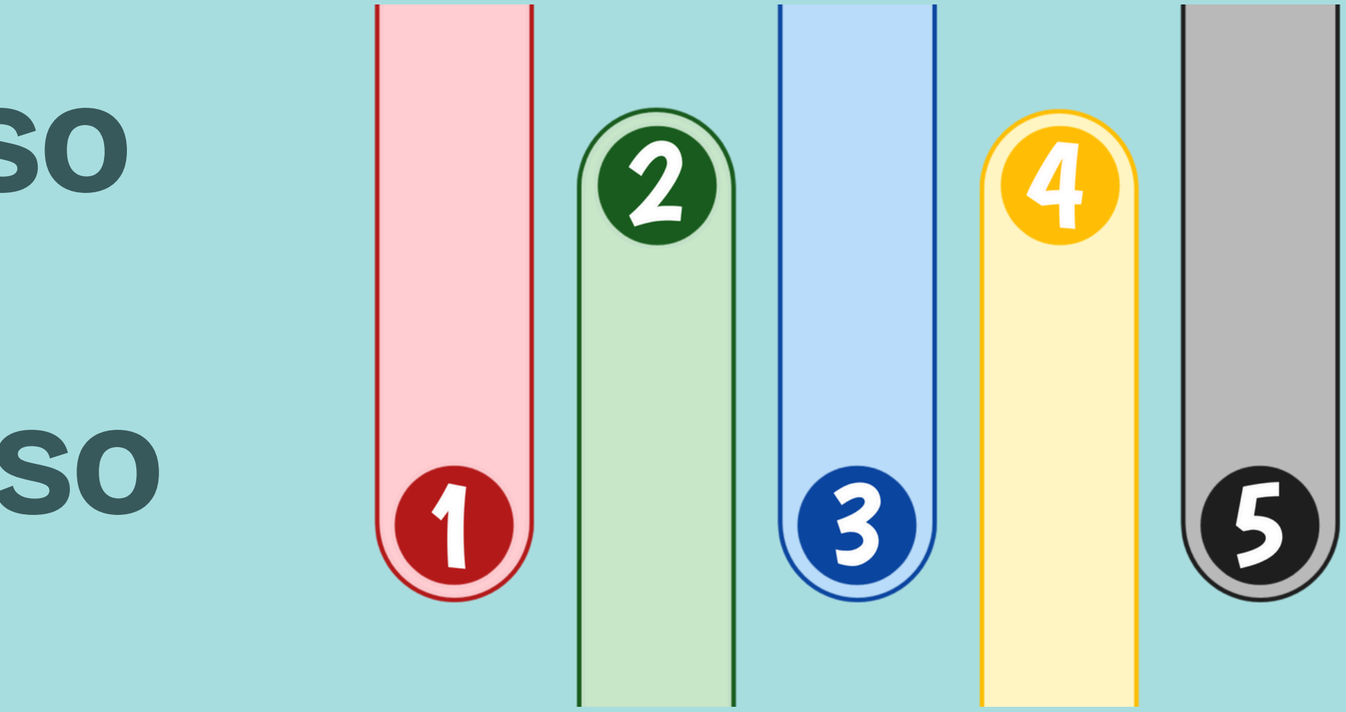
Introdução

Fluxo de trabalho com ModelSim

- Modelagem no Simulink (Codificação turbo)
- Simulação

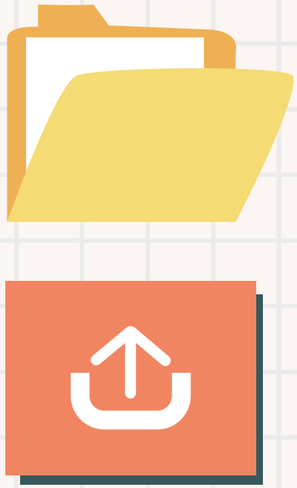
Desenvolvimento

Passo a Passo



Desenvolvimento

Simulink



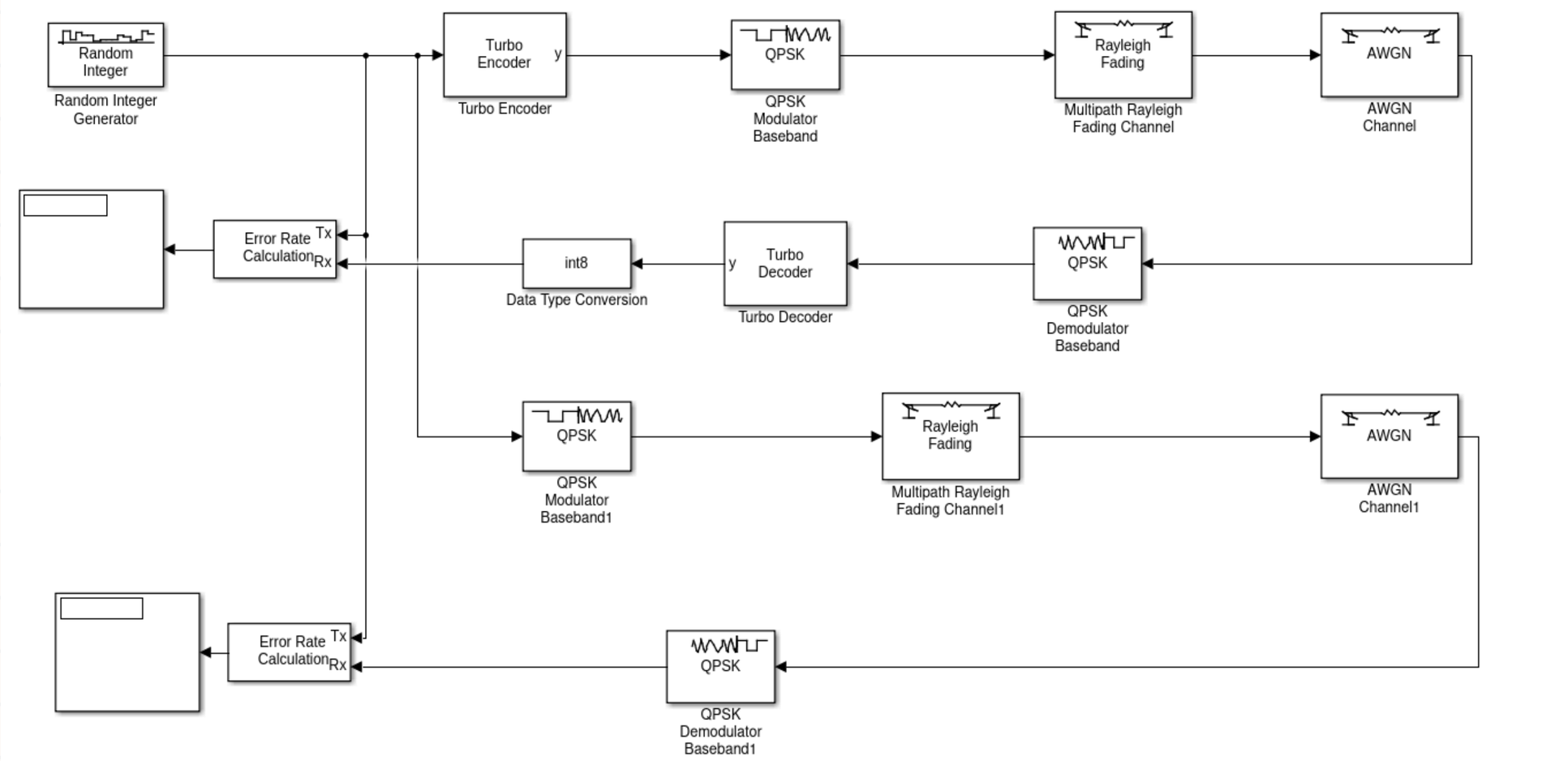
Arquivo do projeto

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

Link Download

Desenvolvimento

Codificação TURBO - Sistema



Desenvolvimento

Codificação TURBO - Sistema

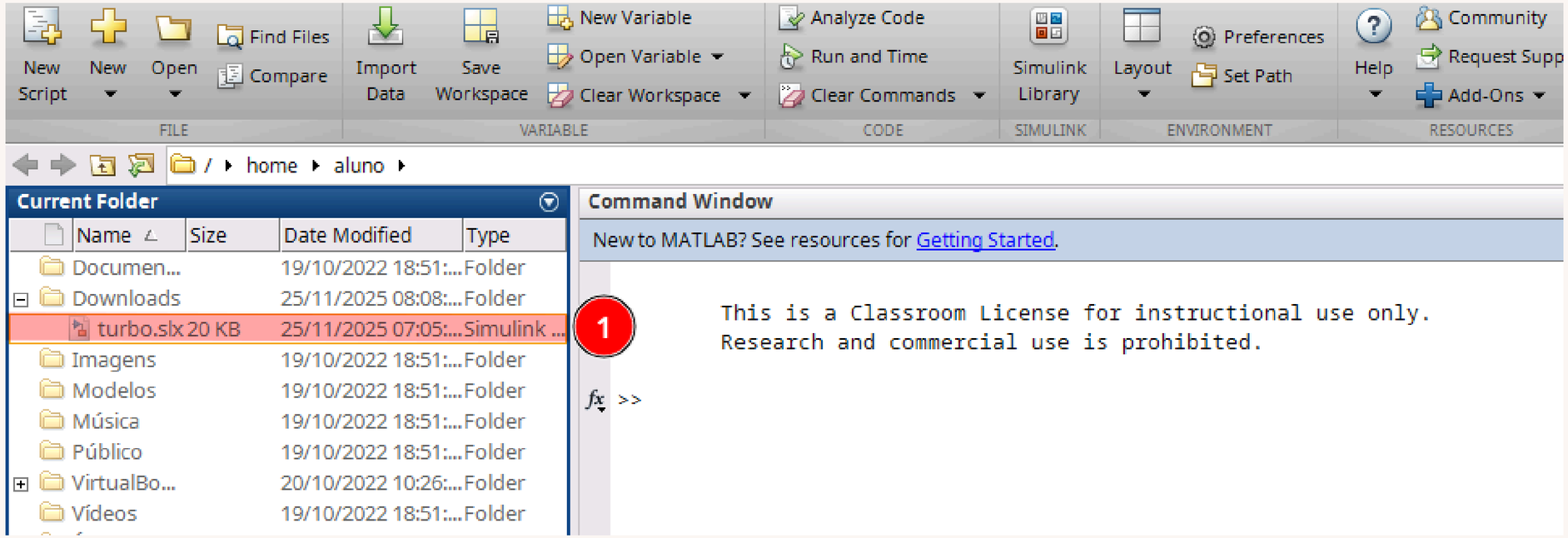
No projeto você já encontra:

- **Fonte de bits (Random Integer Generator):** Gerando bits aleatórios de 0 a 1.
- **Codificador Turbo:** Consiste em dois codificadores convolucionais em série e um intercalação entre eles. Após a codificação, teremos a sequência de bits codificada, que será transmitida.
- **Modulação QPSK:** Utilizado para mapear os bits para símbolos QPSK.
- **Canal Multipath Rayleigh:** Simula a propagação de ondas de rádio que chegam ao receptor por diferentes caminhos, com diferentes atrasos.
- **Canal AWGN:** Adiciona ruído branco gaussiano ao sinal transmitido.
- **Demodulação QPSK:** Transforma os símbolos de volta em bits.
- **Decodificador Turbo:** Responsável por corrigir os erros usando o processo de decodificação iterativa.
- **Cálculo da Taxa de Erro:** Compara os bits transmitidos com os bits recebidos, calculando a taxa de erro de bits (BER).

Desenvolvimento

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

Desenvolvimento



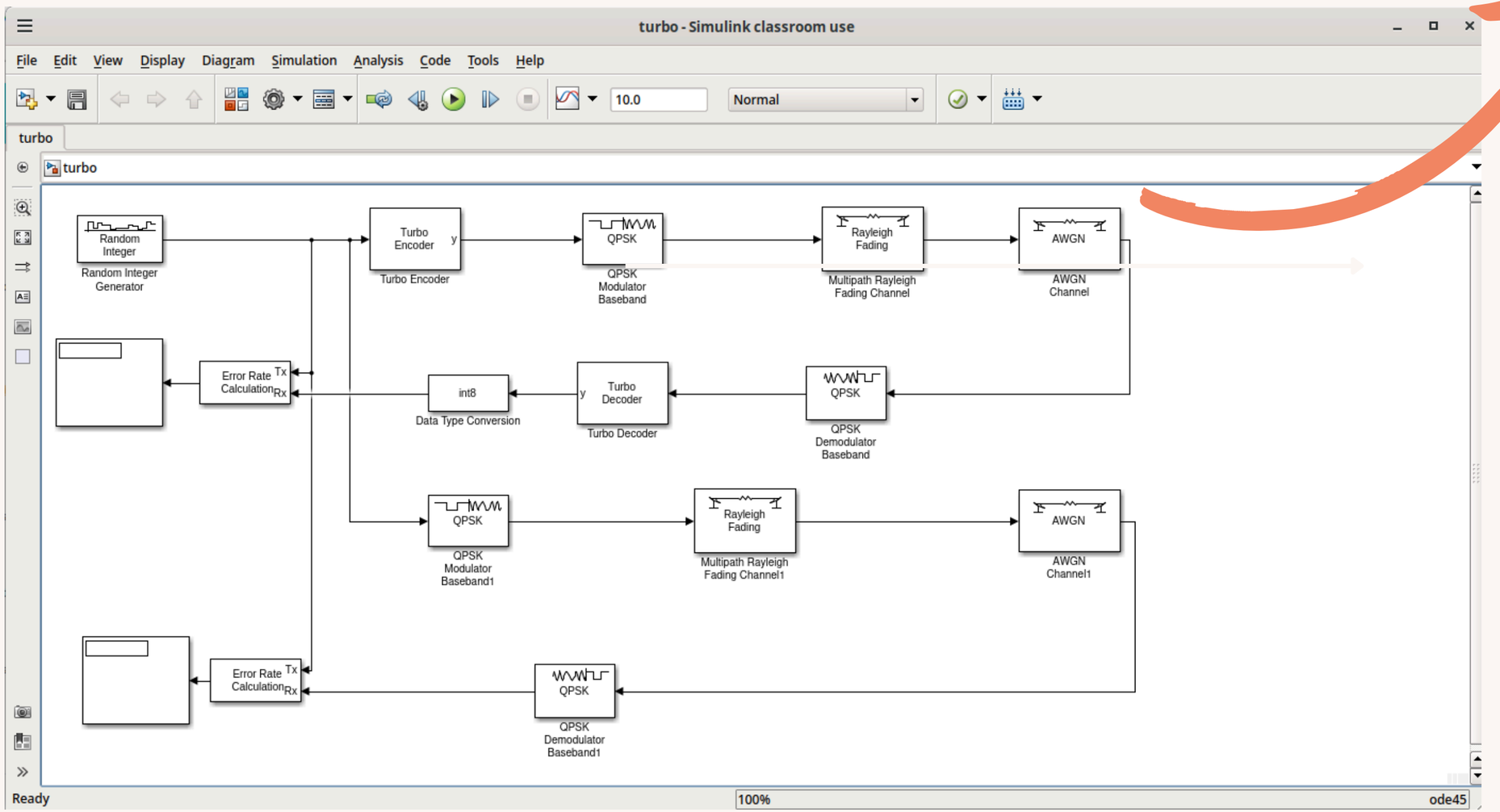
Abra o Matlab

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

1 - Dê um duplo click

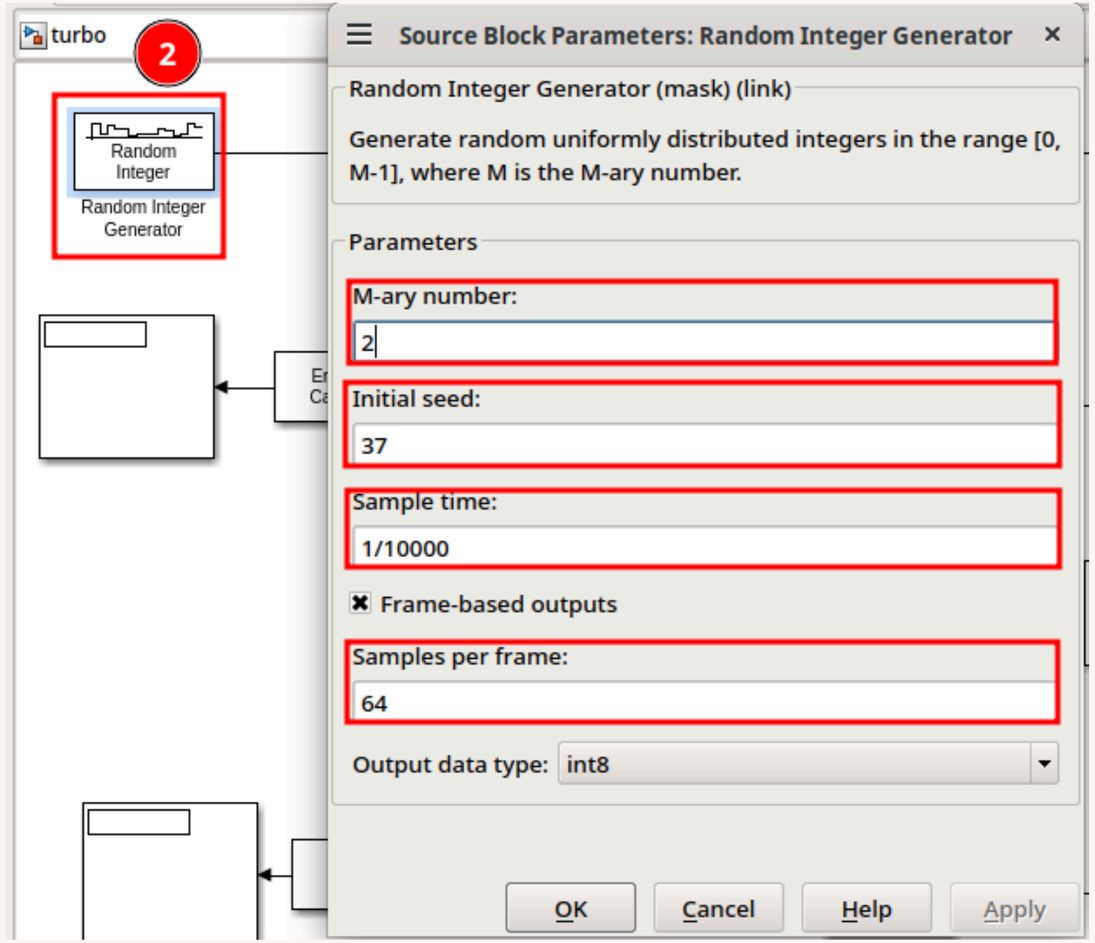
Desenvolvimento

turbo - Simulink classroom use



Abrirá essa aba do simulink

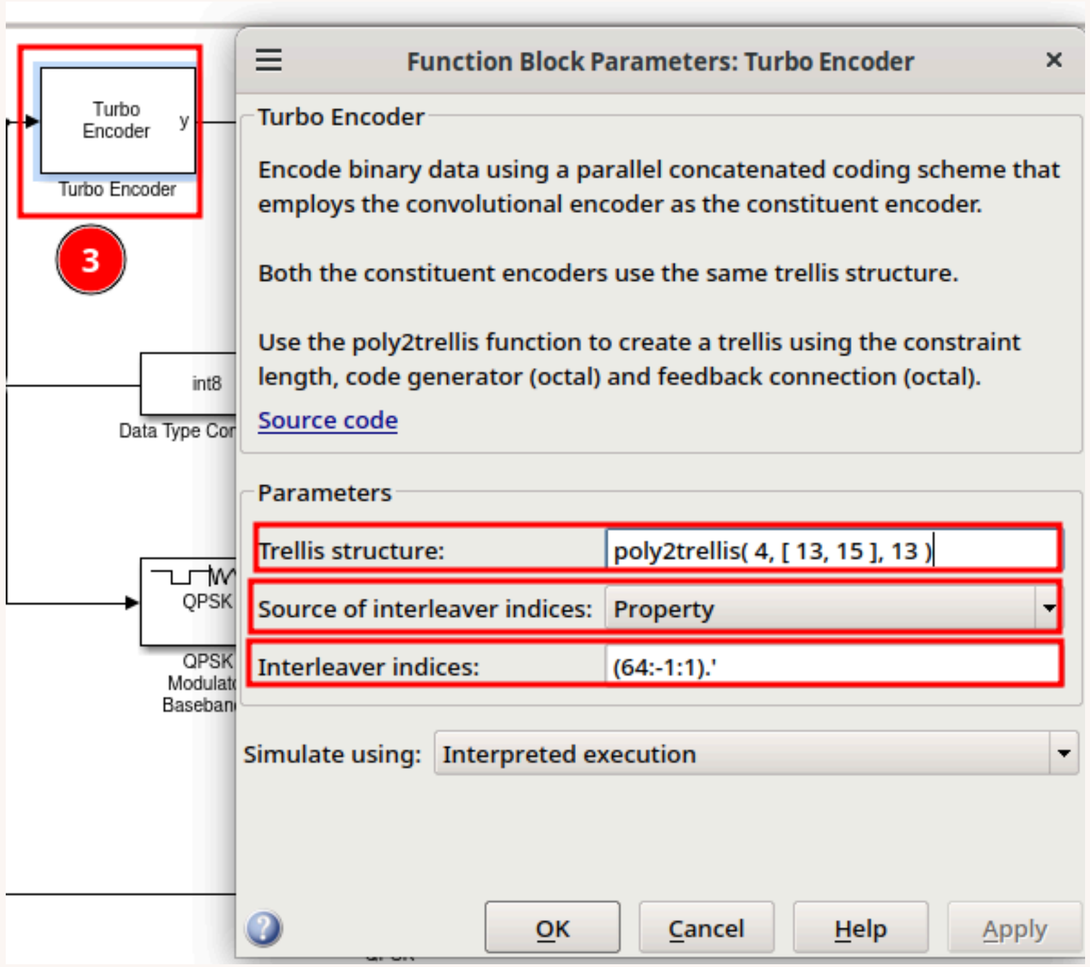
Desenvolvimento



2 - **Random Integer Generator** é responsável por gerar a sequência de bits que servirá de entrada para o codificador Turbo.

- **M-ary number = 2:** define que os valores gerados serão binários, que serão somente ⊙ ou 1.
- **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 = 64:** Cada saída gera um quadro de 64 bits por período de amostragem, fornecendo um pacote de 64 amostras, formato para o Turbo Encoder.

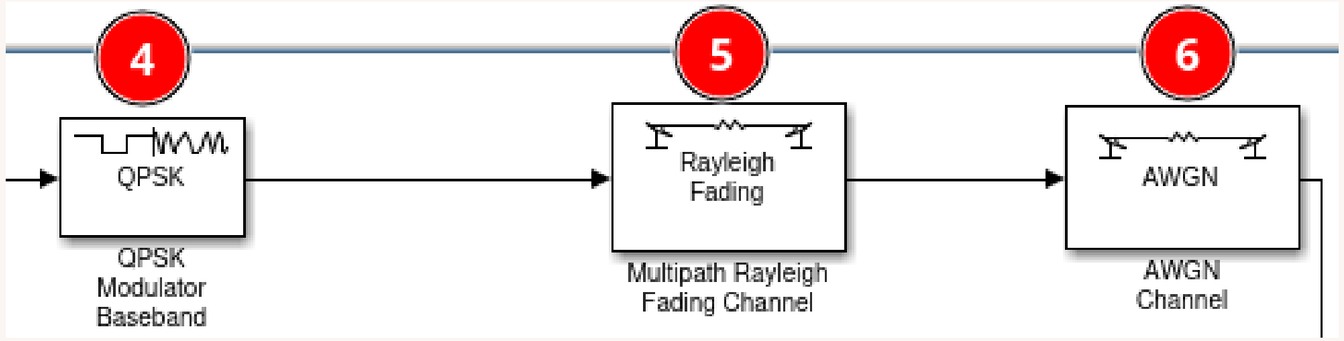
Desenvolvimento



3 - **Turbo Encoder:** O bloco já implementa o esquema clássico de codificação turbo: dois codificadores convolucionais em paralelo + um interleaver interno.

- **Trellis structure = poly2trellis(4, [13 15], 13):** Define o codificador RSC dos dois ramos do Turbo Encoder - “4” é o constraint length, [13 15] são os polinômios geradores, e o 13 é o polinômio de realimentação. Esse conjunto forma o codificador padrão de taxa 1/2 usado em Turbo Codes (3GPP).
- **Source of interleaver indices = Property:** Indica que o padrão de interleaving será definido manualmente
- **Interleaver indices = (64:-1:1).':** Define a permutação dos bits antes do 2° codificador. **(64:-1:1).'** cria a ordem reversa de 64 posições em formato de coluna. Assim, o segundo codificador recebe os bits invertidos, aumentando a aleatoriedade. O tamanho do interleaver deve coincidir com o frame (64)

Desenvolvimento

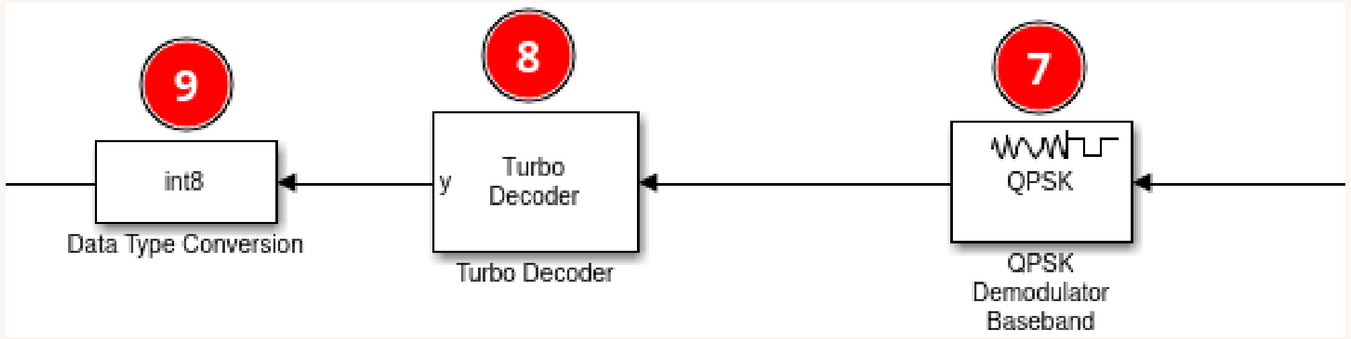


4 - **QPSK Modulator Baseband:** O modulador QPSK converte os bits do codificador turbo em símbolos capazes de serem transmitidos pelo canal. Ele mapeia pares de bits nos pontos da constelação QPSK, gerando um sinal complexo e permitindo transmitir 2 bits por símbolo, tornando o sinal adequado para propagação física.

5 - **Multipath Rayleigh Fading Channel:** Simula a propagação real com multipercurso 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



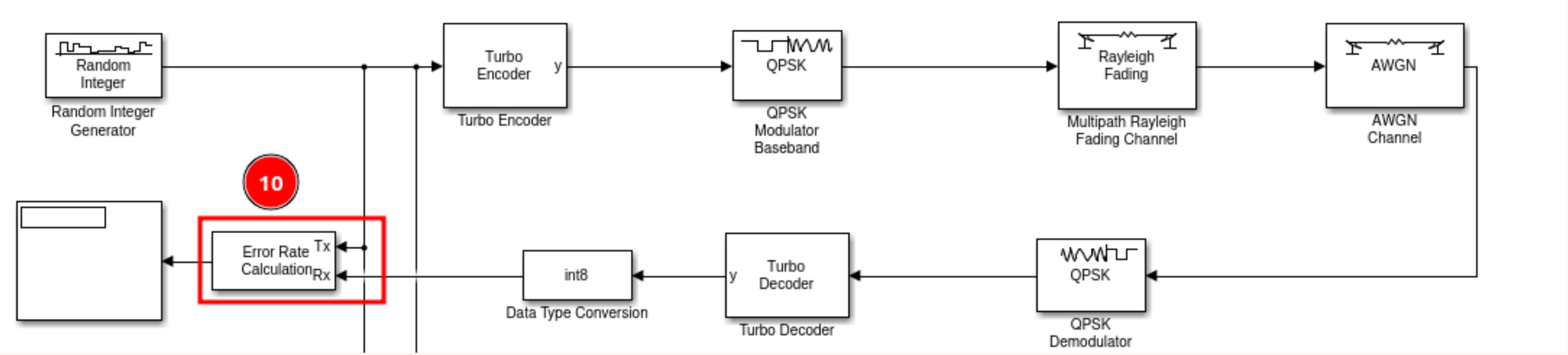
7 - **QPSK Demodulator Baseband:** Recupera os bits a partir do sinal ruidoso recebido.

Converte símbolos complexos novamente em informações digitais.

8 - **Turbo Decoder:** Recebe os bits da demodulação QPSK e usa algoritmos iterativos (MAP/Log-MAP) para corrigir erros de ruído e desvanecimento, combinando as informações dos dois codificadores.

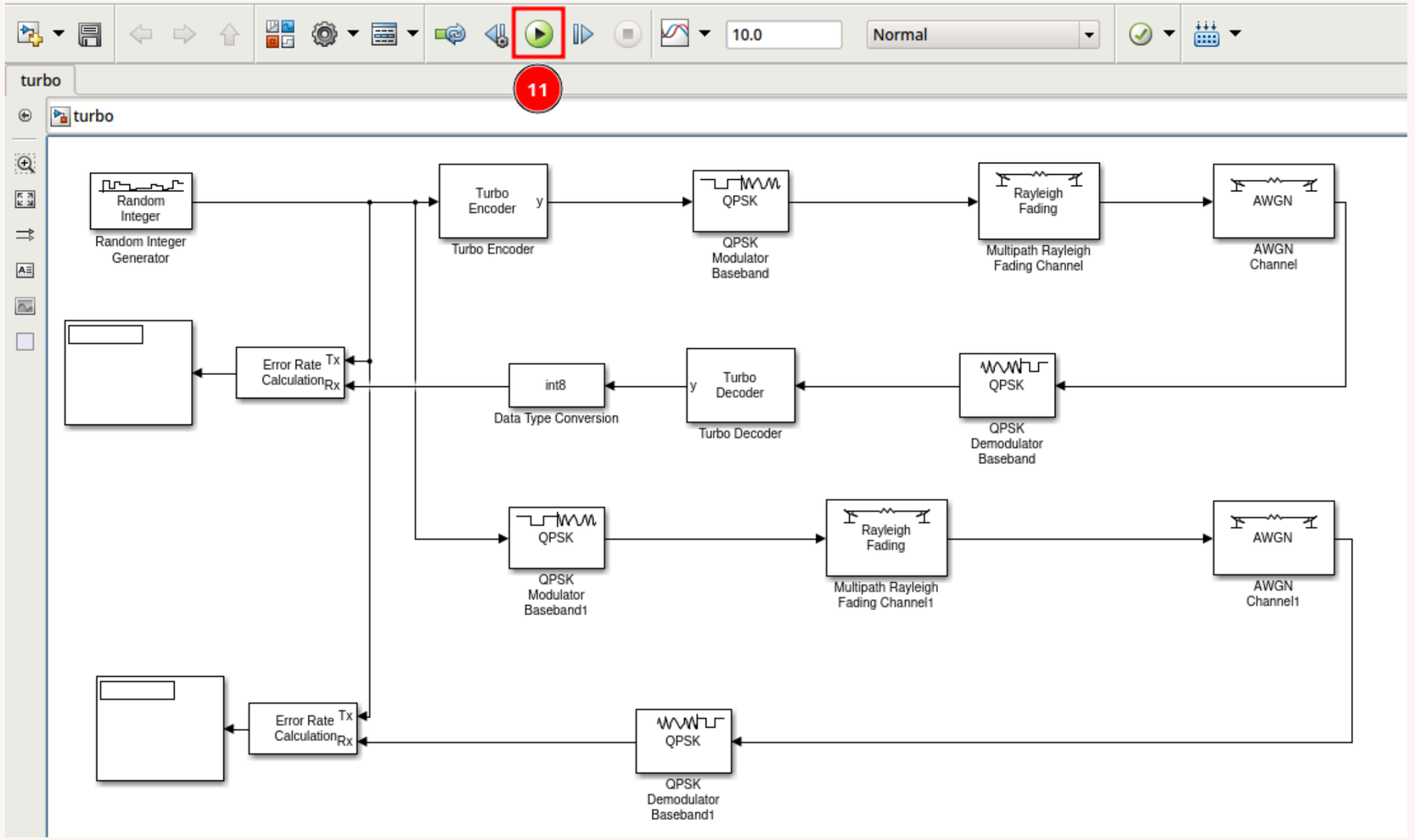
9 - **Data Type Conversion:** Ajusta o tipo de dado para int8, igual ao dos bits transmitidos. Necessário para comparar o resultado final com a sequência transmitida.

Desenvolvimento



10 - **Error Rate Calculation:** O bloco compara os bits transmitidos (Tx) com os bits decodificados (Rx) e calcula automaticamente o BER, o número de erros e o total de bits analisados. Ele mede o desempenho do sistema sob ruído e fading, permitindo avaliar o efeito da modulação QPSK, do canal e do Turbo Decoder. É essencial para validar a transmissão e gerar análises como BER × SNR.

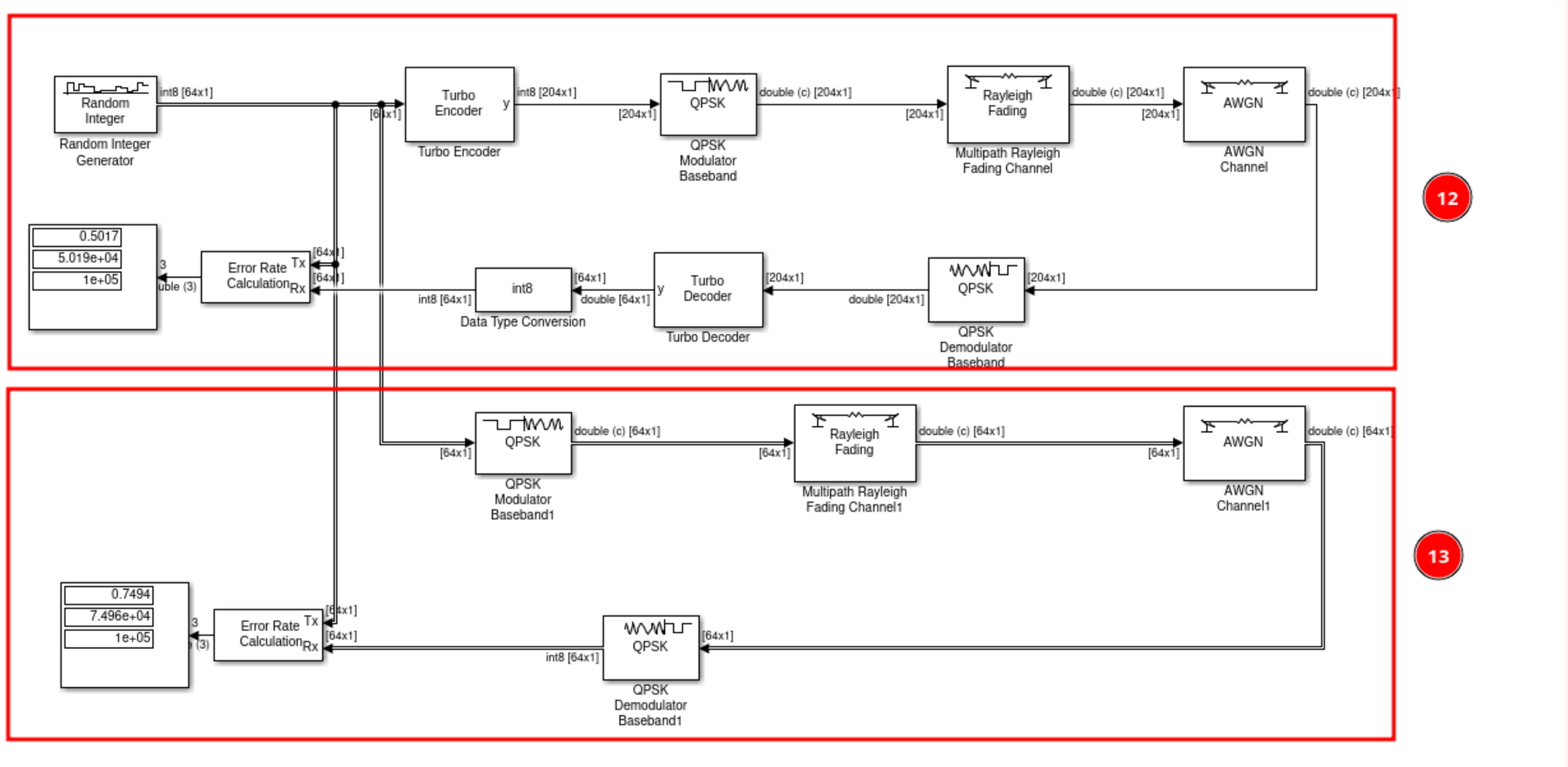
Desenvolvimento



11 - Clique em **run**

Desenvolvimento

12 - Com Codificação Turbo
13 - Sem Codificação Turbo



Desenvolvimento

12 - **Com Codificação Turbo:**

- BER ≈ 0.5017
- Erros ≈ 50.199 (aprox)
- Bits comparados ≈ 100.000

13 - **Sem Codificação Turbo:**

- BER ≈ 0.7494
- Erros ≈ 74.964 (aprox)
- Bits comparados ≈ 100.000

Desenvolvimento

Interpretação dos Resultados

A presença do Turbo Decoder melhora a comunicação mesmo em um canal severamente degradado:

- Reduz o BER de 0.75 → 0.50
- Diminui os erros absolutos de ~75.000 → ~50.000
- Melhora global de aproximadamente 33%

Isso confirma que:

O sistema com turbo coding consegue corrigir parte dos erros introduzidos pelo canal Rayleigh + AWGN, enquanto o sistema sem turbo fica muito mais vulnerável ao ruído e ao desvanecimento.

Atividades

Impacto do tamanho do interleaver

Objetivo: Ver como diferentes tamanhos de interleaver afetam o BER

Tarefa:

- Aumente o interleaver (100 → 1000 → 5000 bits).

Pergunta:

Interleavers maiores melhoram a decodificação turbo? Por quê?

Atividades

Treliça

Objetivo: Comparar o desempenho de diferentes configurações de poly2trellis em um encoder turbo.

Tarefa:

- Troque a treliça para poly2trellis(3, [7 ⊙]);
- Troque a treliça para poly2trellis(3, [7 7]).

Pergunta:

O BER melhora ou piora em relação à treliça original?

Atividades

Efeito do Doppler

Objetivo: Comparar o desempenho de diferentes configurações de poly2trellis em um encoder turbo.

Tarefa:

- Itere a frequência Doppler do canal Rayleigh para diferentes valores:0 Hz, 5 Hz, 30 Hz e 100 Hz

Pergunta:

Quando o Doppler aumenta, o canal varia mais rápido. Isso melhora ou piora o BER? Por quê?

Muito obrigado!