

**EXPERIÊNCIA 4: Modulações ASK, FSK e PSK Multiníveis****1 – Objetivos:**

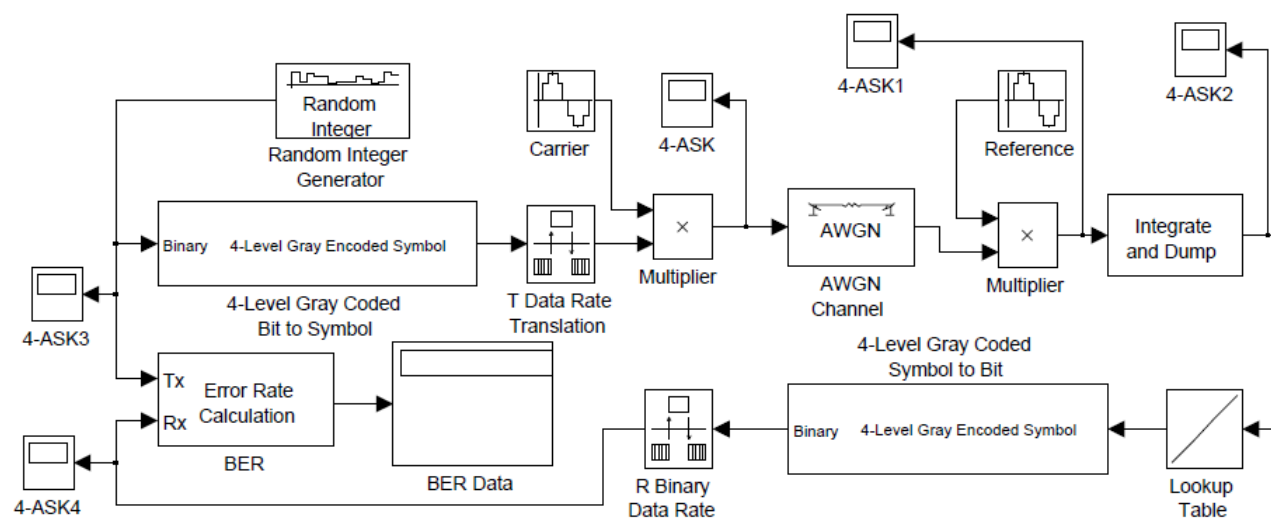
Entender o funcionamento das modulações ASK, FSK e PSK multiníveis e seus espectros através da análise das curvas obtidas no diagrama em blocos do Simulink.

Obter os desempenhos  $E_b/N_0$ BER, inclusive a  $P_b$ , e as PSDs práticos de cada sistema e comparar.

**Chaveamento por Deslocamento de Amplitude (ASK) Multinível (M-ário)**

O chaveamento por deslocamento de amplitude (ASK) multinível (M-ário) transmite um símbolo que representa  $N = \log_2(M)$  bits de informação. Um sinal ASK M-ário chaveia a frequência da portadora como um de M níveis discretos durante o tempo de bit  $T_s$  para a representação do sinal lógico binário  $N = \log_2(M)$  para a transmissão da informação. O sinal da portadora senoidal modulada tem uma amplitude de  $A m(t) V$ , uma frequência da portadora de  $f_c$  Hz e um ângulo de fase de referência de  $0^\circ$ , como dado pela expressão analítica abaixo

$$s_j(t) = A m_j(t) \sin(2\pi f_c t) \quad (i-1)T_s \leq t \leq iT_s \quad j = 1, 2, \dots, M$$

**2 – Simulação da Modulação ASK M-ária**

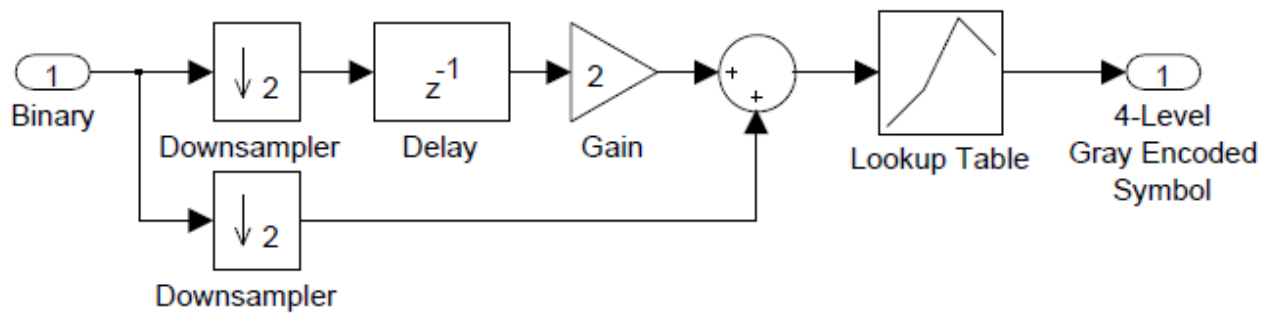
Este sistema 4-ASK é similar ao sistema PAM 4 níveis código Gray de 2 bits. Os sinais 4-ASK são considerados com probabilidade de ocorrência igual a priori ( $P_1 = P_2 = P_3 = P_4, P_j = 0,25$ ).

**2.1 – Descrição dos blocos**

**A – Random Integer Generator** – Communications Blockset; Comm Sources.

PARÂMETROS: M-ary number: 2; Initial seed: randseed; Sample time: 1e-3; Output data type: double.

**B – 4-Level Gray Encoded**



#### **B-1 – Downsampler** – Signal Processing blockset; Signal Operations

PARÂMETROS: - Downsample factor, K: 2; Sample offset (0 to K-1): 0; Input processing: Inherited; Sample-based mode: Force single rate; Frame-based mode: Maintain input frame rate; Initial conditions: 0.

#### **B-2 – Downsampler** – Signal Processing blockset; Signal Operations

PARÂMETROS: - Downsample factor, K: 2; Sample offset (0 to K-1): 1; Input processing: Inherited; Sample-based mode: Force single rate; Frame-based mode: Maintain input frame rate; Initial conditions: 0.

#### **B-3 – Delay** – Signal Processing blockset; Signal Operations

PARÂMETROS: - Input processing: Inherited; Delay units: Samples; Delay (samples): 1; Initial conditions: 0; Reset port: None.

#### **B-4 – Gain** – Simulink blockset; Math Operations

PARÂMETROS: - Main: Gain: 2; Multiplication: Element-wise(k.\*u); Sample time (-1 for inherited): -1.

#### **B-5 – Sum** – Simulink blockset; Math Operations

PARÂMETROS: - Main: Icon shape: round; List of signs: I++; Sample time (-1 for inherited): -1.

#### **B-6 – Lookup Table** – Simulink blockset; Lookup Tables

PARÂMETROS: - Main: Vector of input values: [0,1,2,3]; Table data: [0,1,3,2]; Lookup method: Interpolation-Extrapolation; Sample time (-1 for inherited): -1.

#### **C – Rate Transition Block** – Simulink Blockset; Attributes.

PARÂMETROS: Parameters: [x] Ensure data integrity.....[x] Ensure deterministic.....; Initial conditions: 0; Output ort samples time options: Specify; Output port sample time: 2e-6.

#### **D – Product** – Simulink blockset; Math Operations

PARÂMETROS: - Main: Number of inputs: 2; Multiplication: Element-wise(.\*) ; Sample time (-1 for inherited): -1.

#### **E – Sine Wave** – Simulink blockset; Sources

PARÂMETROS: - Sine type: Time based; Time(t): Use simulation time; Amplitude: 1.66666; Bias: 0; Frequency: (rad/sec):  $40000\pi$ ; Phase (rad): 0; Sample time:  $2e-6$ ; [x] Interpret vector parameters as 1-D.

#### F – AWGN – Communications Blockset; Channels

PARÂMETROS: Input processing: Inherited; Initial seed: randseed; Mode: Signal to noise ratio (Eb/No); Eb/No (dB): 60; Number of bits per symbol: 2; Input signal power, referenced to 1 ohm (watts): 4.86; Symbol period (s):  $2e-3$ .

#### G – Product – Simulink blockset; Math Operations

PARÂMETROS: - Main: Number of inputs: 2; Multiplication: Element-wise(.\*); Sample time (-1 for inherited): -1.

#### H – Sine Wave – Simulink blockset; Sources

PARÂMETROS: - Sine type: Time based; Time(t): Use simulation time; Amplitude: 5; Bias: 0; Frequency: (rad/sec):  $40000\pi$ ; Phase (rad): 0; Sample time:  $2e-6$ ; [x] Interpret vector parameters as 1-D.

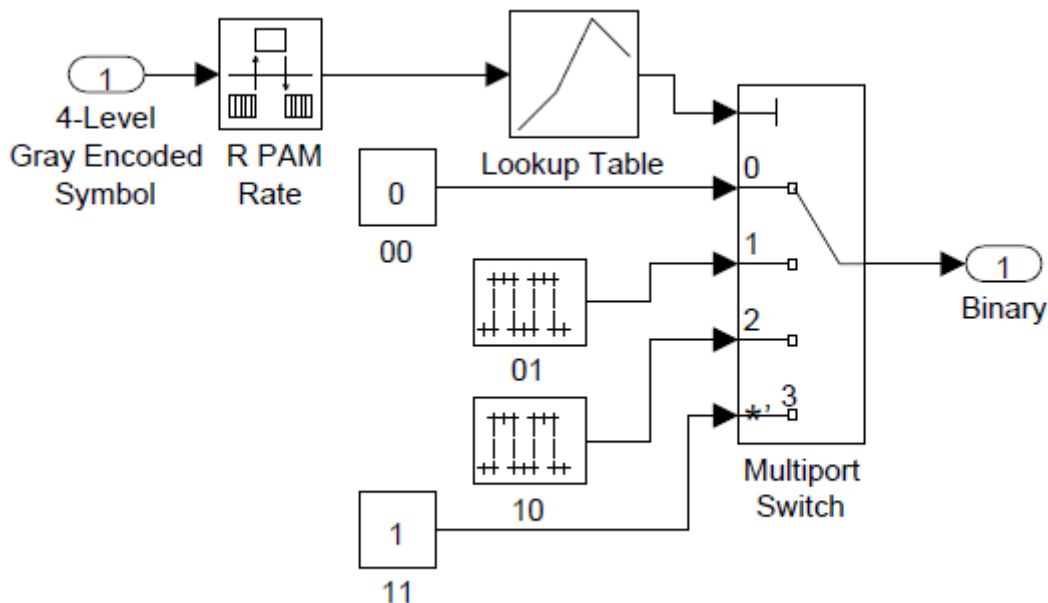
#### I – Integrate and Dump – Communications blockset; Comm Filters

PARÂMETROS: - Main: Integration period (number of samples): 1000; Offset (number of samples): 0.

#### J – Lookup Table – Simulink blockset; Lookup Tables

PARÂMETROS: - Main: Vector of input values: [0, 4166.666, 8333.333, 12500]; Table data: [0,1,2,3]; Lookup method: Use Input Nearest; Sample time (-1 for inherited): -1.

#### K – 4-Level Gray Coded Symbol to Bit – Communications blockset; Modulation



#### K-1 – Rate Transition – Simulink Blockset; Signal Attributes

PARÂMETROS: [x] Ensure data .....; [x] Ensure deterministic...; Initial Conditions: 0; Output port sample time options: Specify; Output port Sample time: 2e-6.

#### **K-2 – Lookup Table – Simulink blockset; Lookup Tables**

PARÂMETROS: - Main: Vector of input values: [0,1,2,3]; Table data: [0,1,3,2]; Lookup method: Interpolation-Extrapolation; Sample time (-1 for inherited): -1.

#### **K-3 – Multiport Switch – Simulink Blockset; Signal Routing**

PARÂMETROS: Main: Data port order: Zero-based contiguous; Number of data ports: 4; Data port for default case: Last data port; Diagnostic for default case: Error; Sample time (-1 for inherited): -1.

#### **K-4 - Constant – Simulink blockset; Source**

PARÂMETROS: - Main: Constant value: 0; [x] Interpret vector parameters as 1-D; Sample time: inf.

#### **K-5 – Pulse Generator – Simulink Blockset; Sources**

PARÂMETROS: Pulse type: Sample based; Time (t): Use simulation time; Amplitude: 1; Period (number of samples): 1000; Pulse Width(% of period): 500; Phase Delay(s): 500; Sample time: 2e-6; [x] Interpret vector parameters as 1-D.

#### **K-6 – Pulse Generator – Simulink Blockset; Sources**

PARÂMETROS: Pulse type: Sample based; Time (t): Use simulation time; Amplitude: 1; Period (number of samples): 1000; Pulse Width(% of period): 500; Phase Delay(s): 0; Sample time: 2e-6; [x] Interpret vector parameters as 1-D.

#### **K-7 - Constant – Simulink blockset; Source**

PARÂMETROS: - Main: Constant value: 1; [x] Interpret vector parameters as 1-D; Sample time: inf.

#### **L – Rate Transition – Simulink Blockset; Signal Attributes**

PARÂMETROS: [x] Ensure data .....; [x] Ensure deterministic...; Initial Conditions: 0; Output port sample time options: Specify; Output port Sample time: 1e-3.

#### **M – Error Rate Calculation – Communications Blockset – Comm Sinks**

PARÂMETROS: Receive Delay: 6; Computation delay: 0; Computation mode: Entire frame; Output data: Port.

#### **N – Display – Simulink, Sinks Blockset.**

PARÂMETROS: - Format: long; Decimation: 1.

### **2.2 – Simulações**

Configuration Parameters: Start time: 0; Stop time: 10.005; Type: Fixed-step; Solver: ode3; Fixed-step size: 2e-6; Periodic sample time constraint: Unconstrained; Tasking mode for periodic sample times: Auto.

### 2.3 – Gráficos a serem obtidos:

- 1 – Comparar o sinal modulado no osciloscópio 4-ASK com o sinal original no 4-ASK3.
- 2 – Comparar o sinal com ruído nos osciloscópios: 4-ASK1 e 4-ASK2.
- 3 – Verificar o atraso do sinal na saída através dos osciloscópios: 4-ASK3, 4-ASK4.
- 4 – Gerar o Gráfico BERxEb/No a partir dos dados abaixo. Usar a fórmula da  $P_b$  para sinais com código Gray do sistema de comunicação digital 4-ASK com receptor ótimo.

$$P_{b,4\text{ bits, código Gray}} = \frac{3}{4} Q \left( \sqrt{\frac{0,286 E_{b,4 \text{ níveis}}}{N_0}} \right)$$

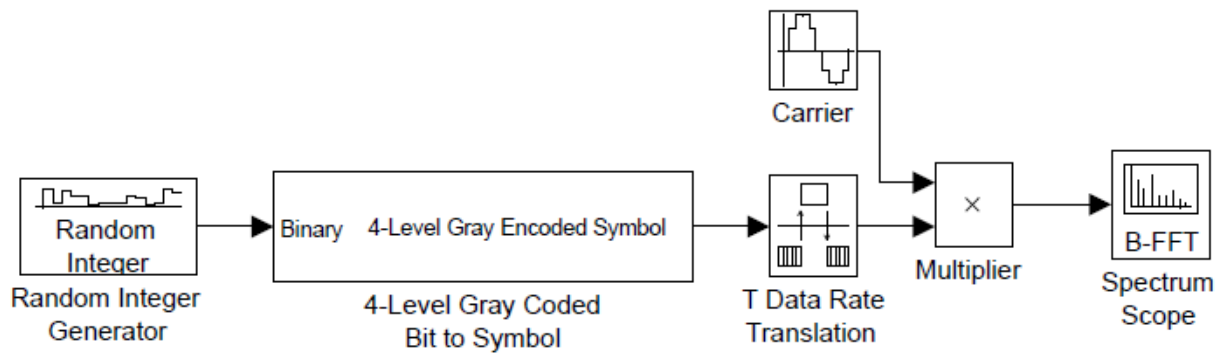
Ed/No (dB)	BER	$P_b$
14	2,3x10 <sup>-3</sup>	
12		1,27x10 <sup>-2</sup>
10		
8		
6		
4		
2		
0		

### 3 – Densidade Espectral de Potência do ASK Multinível

O ASK M-ário transmite  $N$  bits por símbolo ( $N = \log_2(M)$ ) mas mantém a mesma portadora e forma de pulso retangular  $s_{PAM}(t)$  como ASK binário. A largura de banda de um transmissor ASK não é afetada pela amplitude do pulso, mas somente pela forma do pulso. A densidade espectral de potência bilateral  $PSD_{M\text{-ário, ASK}}(f)$  para o ASK M-ário, seguindo a mesma análise do ASK binário, resulta na PSD dada por

$$P_{M\text{-ário ASK}}(f) = \frac{A_{avg}^2 T_s}{16R_L} \text{sinc}^2(2\pi(T_s/2)(f - f_c)) + \frac{A_{avg}^2}{4} \delta(f - f_c) + \frac{A_{avg}^2 T_s}{16R_L} \text{sinc}^2(2\pi(T_b/2)(f + f_c)) + \frac{A_{avg}^2}{4} \delta(f + f_c)$$

### 4 – Gráfico da Densidade Espectral de Potência da Modulação ASK Multinível



#### 4.1 – Descrição dos blocos

**A – Spectrum Scope** – Signal Processing blockset; Signal Processing Sinks.

PARÂMETROS: - Scope Properties: Spectrum units: dBW/Hertz; Spectrum type: One-sided ([0...Fs/2]); [x] Buffer input; Buffer size: 524288; Buffer overlap: 0; Treat Mx1...: M channels; Window: Boxcar; [x] Specify FFT length; Number of spectral averages: 1; FFT length: 524288. Axis Properties: Minimum Y-limit: -50; Maximum Y-limit: 60; Y-axis label: Magnitude-squared, dB.

#### 4.2 – Simulações

Configuration Parameters: Start time: 0; Stop time: 5.24288; Type: Fixed-step; Solver: ode3; Fixed-step size: 2e-6; Periodic sample time constraint: Unconstrained; Tasking mode for periodic sample times: Auto.

#### 4.3 – Gráficos a serem obtidos:

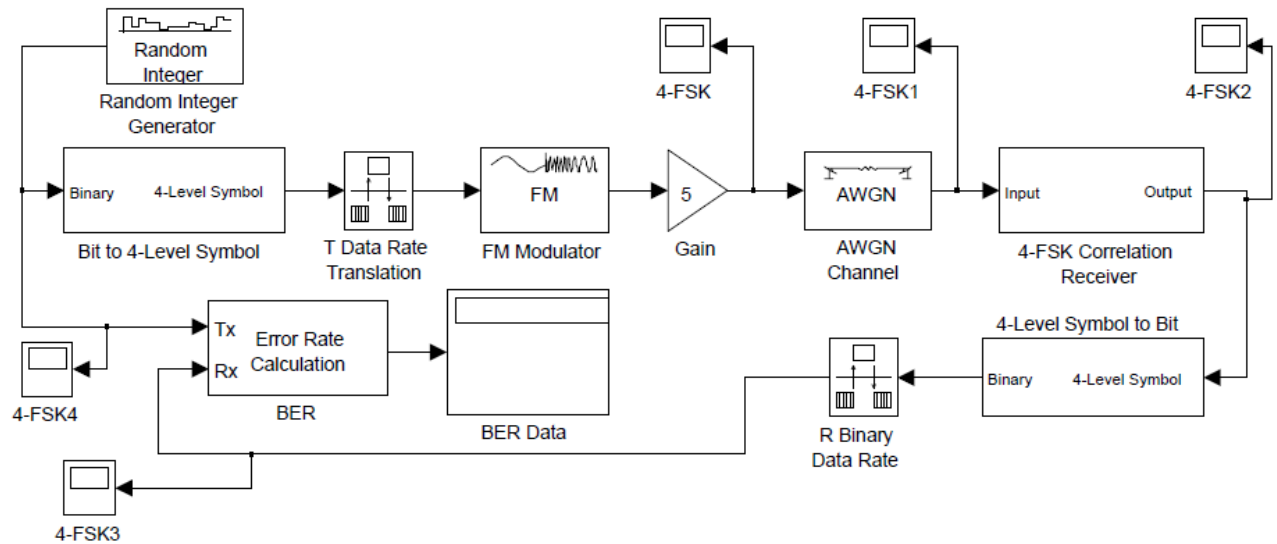
1 – Obter a PSD do sinal de saída do circuito. Mostrar o resultado para frequência entre 0 e 50 kHz.

#### Chaveamento por Deslocamento de Frequência Multinível (M-ário)

O chaveamento por deslocamento em frequência multinível (M-FSK) transmite um símbolo que representa  $N = \log_2(M)$  bits de informação. Um sinal FSK M-ário chaveia a frequência da portadora para uma das M frequências discretas durante um tempo de símbolo  $T_s$  para a representação de N sinais lógicos binários para a transmissão da informação. O sinal senoidal modulado tem uma amplitude constante de A V, uma frequência de portadora de  $f_c$  Hz e um ângulo de fase como referência de  $0^0$ , como dado pela expressão analítica abaixo

$$s_j(t) = A \sin(2\pi(f_c - k_j m_j(t))t) \quad (i-1)T_b \leq t \leq iT_b \quad j = 0, 1, \dots, M$$

#### 5 – Simulação do FSK Multinível



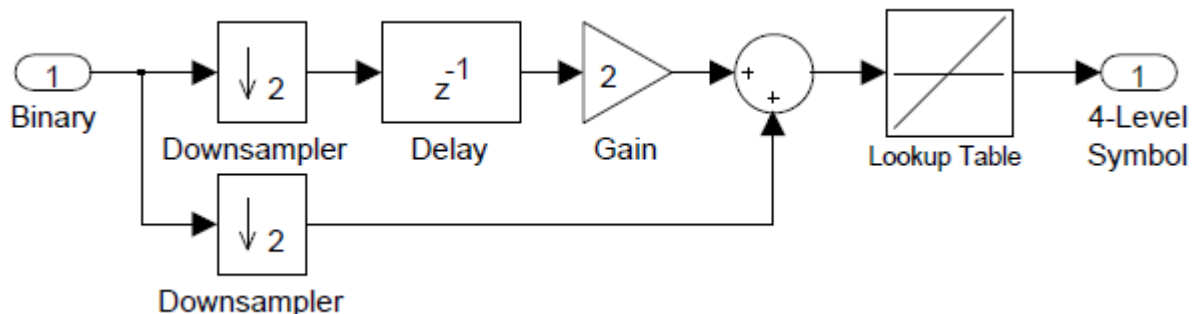
Um sistema de comunicação coerente com chaveamento por deslocamento de frequência multinível (4-FSK) em canal AWGN é mostrado na figura acima.

### 5.1 – Descrição dos blocos

**A – Random Integer Generator** – Communications Blockset; Comm Sources.

PARÂMETROS: M-ary number: 2; Initial seed: randseed; Sample time: 1e-3; Output data type: double.

**B – Bit to 4-Level Symbol**



**B-1 – Downsampler** – Signal Processing blockset; Signal Operations

PARÂMETROS: - Downsample factor, K: 2; Sample offset (0 to K-1): 0; Input processing: Inherited; Sample-based mode: Force single rate; Frame-based mode: Maintain input frame rate; Initial conditions: 0.

**B-2 – Downsampler** – Signal Processing blockset; Signal Operations

PARÂMETROS: - Downsample factor, K: 2; Sample offset (0 to K-1): 1; Input processing: Inherited; Sample-based mode: Force single rate; Frame-based mode: Maintain input frame rate; Initial conditions: 0.

**B-3 – Delay** – Signal Processing blockset; Signal Operations

**PARÂMETROS:** - Input processing: Inherited; Delay units: Samples; Delay (samples): 1; Initial conditions: 0; Reset port: None.

**B-4 – Gain** – Simulink blockset; Math Operations

**PARÂMETROS:** - Main: Gain: 2; Multiplication: Element-wise( $k \cdot u$ ); Sample time (-1 for inherited): -1.

**B-5 – Sum** – Simulink blockset; Math Operations

**PARÂMETROS:** - Main: Icon shape: round; List of signs: I++; Sample time (-1 for inherited): -1.

**B-6 – Lookup Table** – Simulink blockset; Lookup Tables

**PARÂMETROS:** - Main: Vector of input values: [0,1,2,3]; Table data: [-3,-1,1,3]; Lookup method: Use Input Nearest; Sample time (-1 for inherited): -1.

**C – Rate Transition Block** – Simulink Blockset; Attributes.

**PARÂMETROS:** Parameters: [x] Ensure data integrity.....[x] Ensure deterministic.....; Initial conditions: 0; Output ort samples time options: Specify; Output port sample time: 2e-6.

**D – FM Modulator Passband** – Communications blockset; Modulation

**PARÂMETROS:** - Carrier Frequency (Hz): 20000; Initial phase (rad):  $-\pi/2$ ; Frequency deviation (Hz): 1000.

**E – Error Rate Calculation** – Communications Blockset – Comm Sinks

**PARÂMETROS:** Receive Delay: 6; Computation delay: 0; Computation mode: Entire frame; Output data: Port.

**F – Display** – Simulink, Sinks Blockset.

**PARÂMETROS:** - Format: long; Decimation: 1.

**G – Gain** – Simulink blockset; Math Operations

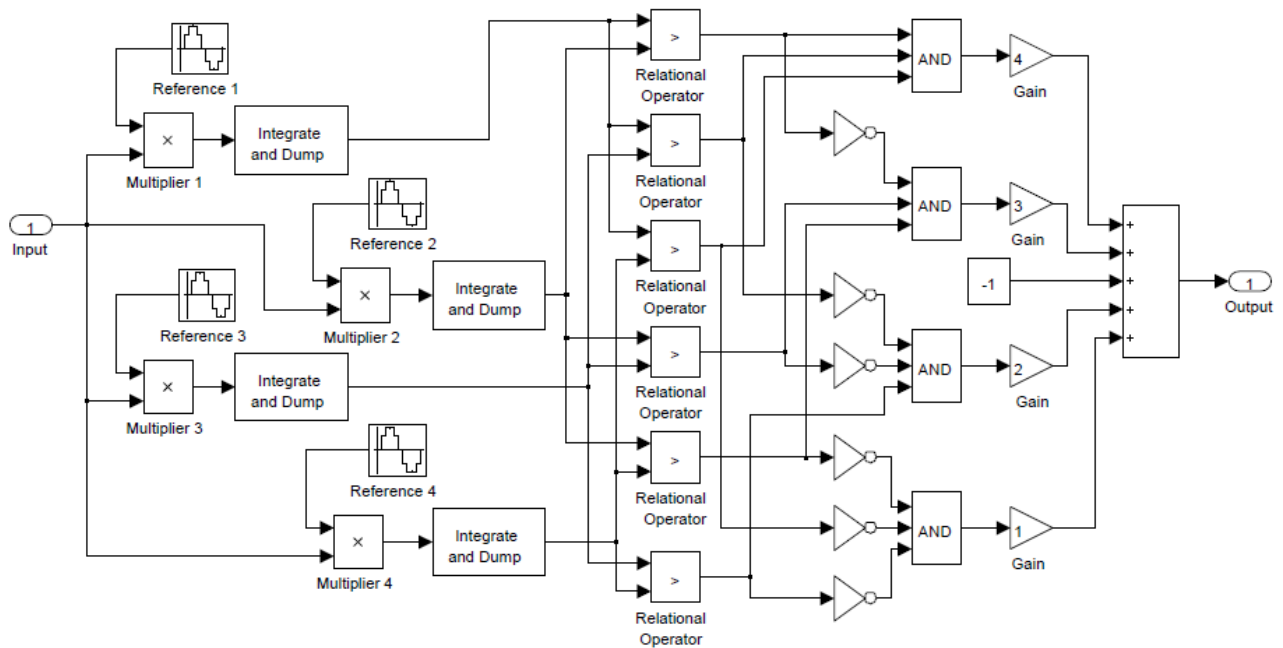
**PARÂMETROS:** - Main: Gain: 5; Multiplication: Element-wise( $k \cdot u$ ); Sample time (-1 for inherited): -1.

**H – AWGN** – Communications Blockset; Channels

**PARÂMETROS:** Input processing: Columns as channels (frame based); Initial seed: randseed; Mode: Signal to noise ratio ( $E_b/N_0$ );  $E_b/N_0$  (dB): 50; Number of bits per symbol: 2; Input signal power, referenced to 1 ohm (watts): 12.5; Symbol period (s): 2e-3.

**I – Receptor de Correlação 4-FSK**





### I-1 – Sine Wave – Simulink blockset; Sources

PARÂMETROS: - Sine type: Time based; Time(t): Use simulation time; Amplitude: 5; Bias: 0; Frequency: (rad/sec):  $46000\pi$ ; Phase (rad): 0; Sample time:  $2e-6$ ; [x] Interpret vector parameters as 1-D.

### I-2 – Product – Simulink blockset; Math Operations

PARÂMETROS: - Main: Number of inputs: 2; Multiplication: Element-wise(.\*); Sample time (-1 for inherited): -1.

### I-3 – Sine Wave – Simulink blockset; Sources

PARÂMETROS: - Sine type: Time based; Time(t): Use simulation time; Amplitude: 5; Bias: 0; Frequency: (rad/sec):  $38000\pi$ ; Phase (rad): 0; Sample time:  $2e-6$ ; [x] Interpret vector parameters as 1-D.

### I-4 – Integrate and Dump – Communications blockset; Comm Filters

PARÂMETROS: - Main: Integration period (number of samples): 1000; Offset (number of samples): 0.

### I-5 – Sine Wave – Simulink blockset; Sources

PARÂMETROS: - Sine type: Time based; Time(t): Use simulation time; Amplitude: 5; Bias: 0; Frequency: (rad/sec):  $42000\pi$ ; Phase (rad): 0; Sample time:  $2e-6$ ; [x] Interpret vector parameters as 1-D.

### I-6 – Sine Wave – Simulink blockset; Sources

PARÂMETROS: - Sine type: Time based; Time(t): Use simulation time; Amplitude: 5; Bias: 0; Frequency: (rad/sec):  $34000\pi$ ; Phase (rad): 0; Sample time:  $2e-6$ ; [x] Interpret vector parameters as 1-D.

### **I-7 – Relational Operator** – Simulink blockset; Logical and Bit Operations

PARÂMETROS: - Main: Relational operator: >; Sample time (-1 for inherited): -1.

### **I-8 – Logical Operator** – Simulink blockset; Logical and Bit Operations

PARÂMETROS: - Main: Operator: NOT; Icon shape: distinctive; Sample time (-1 for inherited): -1.

### **I-9 – Logical Operator** – Simulink blockset; Logical and Bit Operations

PARÂMETROS: - Main: Operator: AND; Number of input ports: 3; Icon shape: rectangular; Sample time (-1 for inherited): -1.

### **I-10 – Gain** – Simulink blockset; Math Operations

PARÂMETROS: - Main: Gain: 4; Multiplication: Element-wise( $k \cdot u$ ); Sample time (-1 for inherited): -1.

### **I-11 – Gain** – Simulink blockset; Math Operations

PARÂMETROS: - Main: Gain: 3; Multiplication: Element-wise( $k \cdot u$ ); Sample time (-1 for inherited): -1.

### **I-12 – Constant** – Simulink blockset; Math Operations

PARÂMETROS: - Main: Constant value: -1; [x] Interpret vector parameters as 1-D; Sampling mode: Sample based; Sample time: inf.

### **I-13 – Gain** – Simulink blockset; Math Operations

PARÂMETROS: - Main: Gain: 2; Multiplication: Element-wise( $k \cdot u$ ); Sample time (-1 for inherited): -1.

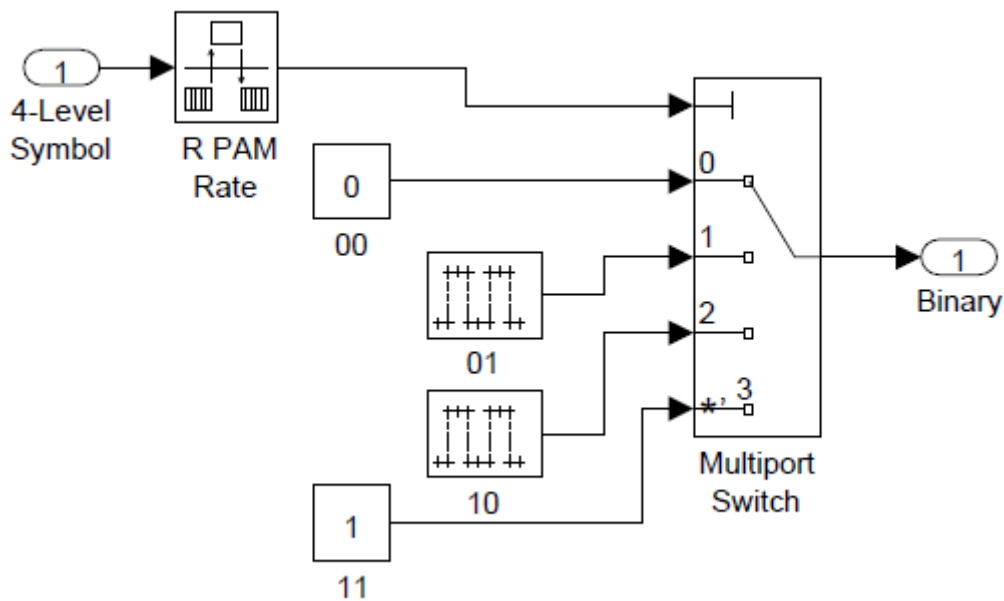
### **I-14 – Gain** – Simulink blockset; Math Operations

PARÂMETROS: - Main: Gain: 1; Multiplication: Element-wise( $k \cdot u$ ); Sample time (-1 for inherited): -1.

### **I-15 – Sum** – Simulink blockset; Math Operations

PARÂMETROS: - Main: Icon shape: rectangular; List of signs: +++++; Sample time (-1 for inherited): -1.

## **J – 4-Level Symbol to Bit**



### J-1 – Rate Transition – Simulink Blockset; Signal Attributes

PARÂMETROS: [x] Ensure data .....; [x] Ensure deterministic...; Initial Conditions: 0; Output port sample time options: Specify; Output port Sample time: 2e-6.

### J-2 – Multiport Switch – Simulink Blockset; Signal Routing

PARÂMETROS: Main: Data port order: Zero-based contiguous; Number of data ports: 4; Data port for default case: Last data port; Diagnostic for default case: Error; Sample time (-1 for inherited): -1.

### J-3 - Constant – Simulink blockset; Source

PARÂMETROS: - Main: Constant value: 0; [x] Interpret vector parameters as 1-D; Sample time: inf.

### J-4 – Pulse Generator – Simulink Blockset; Sources

PARÂMETROS: Pulse type: Sample based; Time (t): Use simulation time; Amplitude: 1; Period (number of samples): 1000; Pulse Width(% of period): 500; Phase Delay(s): 500; Sample time: 2e-6; [x] Interpret vector parameters as 1-D.

### J-5 – Pulse Generator – Simulink Blockset; Sources

PARÂMETROS: Pulse type: Sample based; Time (t): Use simulation time; Amplitude: 1; Period (number of samples): 1000; Pulse Width(% of period): 500; Phase Delay(s): 0; Sample time: 2e-6; [x] Interpret vector parameters as 1-D.

### J-6 - Constant – Simulink blockset; Source

PARÂMETROS: - Main: Constant value: 1; [x] Interpret vector parameters as 1-D; Sample time: inf.

### K – Rate Transition – Simulink Blockset; Signal Attributes

PARÂMETROS: [x] Ensure data .....; [x] Ensure deterministic...; Initial Conditions: 0; Output port sample time options: Specify; Output port Sample time: 1e-3.

## 5.2 – Simulações

Configuration Parameters: Start time: 0; Stop time: 10.005; Type: Fixed-step; Solver: ode3; Fixed-step size: 2e-6; Periodic sample time constraint: Unconstrained; Tasking mode for periodic sample times: Auto.

## 5.3 – Gráficos a serem obtidos:

- 1 – Comparar o sinal modulado no osciloscópio 4-FSK com o sinal original no 4-FSK4.
- 2 – Comparar o sinal com ruído nos osciloscópios: 4-FSK1 e 4-FSK2.
- 3 – Verificar o atraso do sinal na saída através dos osciloscópios: 4-FSK4, 4-FSK3.
- 4 – Gerar o Gráfico BERx $E_b/N_0$  a partir dos dados abaixo. Usar a fórmula da  $P_b$  para sinais com código Gray do sistema de comunicação digital 4-FSK com receptor ótimo.

$$P_{b,4\text{bits,códigoGray}} = \frac{M}{2} Q \left( \sqrt{\log_2 M \left[ \frac{E_b}{N_0} \right]} \right) \text{ para } M \geq 4.$$

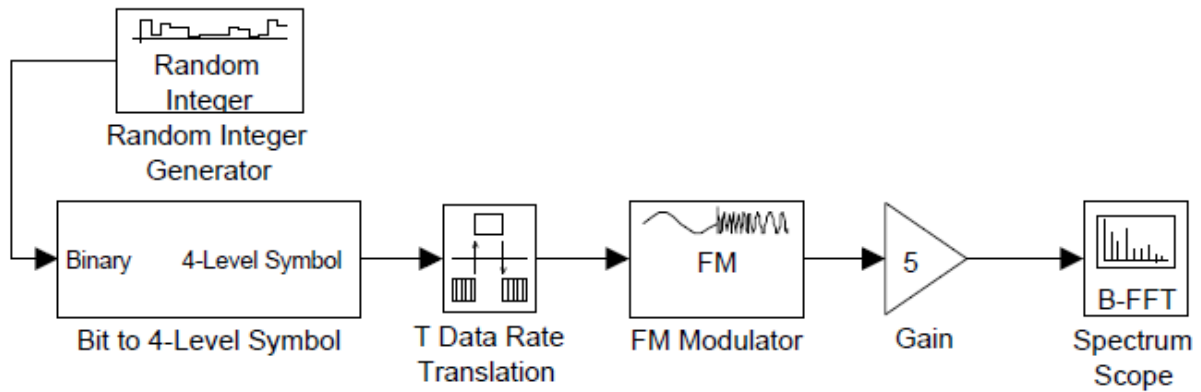
Ed/No (dB)	BER	$P_b$
8	$1 \times 10^{-4}$	
6		$4,8 \times 10^{-3}$
4		
2		
0		

## 6 – Densidade Espectral de Potência do FSK Multinível

O FSK M-ário transmite N bits por símbolo ( $N = \log_2(M)$ ), mas mantém a mesma portadora e a forma do pulso retangular  $s_{PAM}(t)$ , com FSK binário. A densidade espectral de potência (PSD) para o FSK M-ário segue a análise do FSK binário e resulta na PSD similar. A PSD de banda única  $PSD_{\text{FSK M-ário ss}}(f)$ , (há oito componentes a mais na PSD de banda dupla) para o sinal 4-FSK que substitui o tempo de bit  $T_b$  pelo tempo de símbolo  $T_s = 2T_b$  e tem 8 componentes espectrais, como mostra a equação abaixo.

$$PSD_{\text{M-ário FSK ss}}(f) = \left( \begin{aligned} & \frac{A^2 T_b}{8R_L} \text{sinc}^2 \left( 2\pi \left( \frac{T_b}{2} \right) (f - f_c - \Delta f) \right) + \frac{A^2}{8R_L} \delta(f - f_c - \Delta f) + \\ & + \frac{A^2 T_b}{8R_L} \text{sinc}^2 \left( 2\pi \left( \frac{T_b}{2} \right) (f - f_c + \Delta f) \right) + \frac{A^2}{8R_L} \delta(f - f_c + \Delta f) + \\ & \frac{A^2 T_b}{8R_L} \text{sinc}^2 \left( 2\pi \left( \frac{T_b}{2} \right) (f - f_c - 3\Delta f) \right) + \frac{A^2}{8R_L} \delta(f - f_c - 3\Delta f) + \\ & + \frac{A^2 T_b}{8R_L} \text{sinc}^2 \left( 2\pi \left( \frac{T_b}{2} \right) (f - f_c + 3\Delta f) \right) + \frac{A^2}{16R_L} \delta(f - f_c + 3\Delta f) \end{aligned} \right)$$

## 7 – Gráfico da Densidade Espectral de Potência da Modulação FSK Multinível



### 7.1 – Descrição dos blocos

**A – Spectrum Scope** – Signal Processing blockset; Signal Processing Sinks.

PARÂMETROS: - Scope Properties: Spectrum units: dBW/Hertz; Spectrum type: One-sided ([0...Fs/2]); [x] Buffer input; Buffer size: 524288; Buffer overlap: 0; Treat Mx1...: M channels; Window: Boxcar; [x] Specify FFT length; Number of spectral averages: 1; FFT length: 524288. Axis Properties: Minimum Y-limit: -50; Maximum Y-limit: 60; Y-axis label: Magnitude-squared, dB.

### 7.2 – Simulações

Configuration Parameters: Start time: 0; Stop time: 5.24288; Type: Fixed-step; Solver: ode3; Fixed-step size: 2e-6; Periodic sample time constraint: Unconstrained; Tasking mode for periodic sample times: Auto.

### 7.3 – Gráficos a serem obtidos:

1 – Obter a PSD do sinal de saída do circuito. Mostrar o resultado para frequência entre 0 e 50 kHz.

### Chaveamento por Deslocamento de Fase Multinível (M-ário)

Um sinal chaveamento por deslocamento em fase multinível (M-PSK) desloca o ângulo da fase da frequência da portadora para um dos valores do tempo de símbolo  $T_s$  para a representação de  $N = \log_2(M)$  sinais de lógica binária para a transmissão da informação. O sinal senoidal da portadora modulada tem uma amplitude constante de  $A$  V, uma frequência de portadora de  $f_c$  Hz e um ângulo de fase como referência de  $0^\circ$ , como dado pela expressão analítica abaixo

$$s_j(t) = A \cos(2\pi f_c t + k_p m_j(t)) \quad (i-1)T_s \leq t \leq iT_s \quad j = 0, 1, \dots, M$$

Um conjunto conveniente de ângulos de fase espaçados igualmente  $k_p m_j(t)$  para  $M=4$  PSK ou 4-PSK, também conhecido como PSK quaternário QPSK, é  $\pm 45^\circ$  e  $\pm 135^\circ$  para um tempo de símbolo  $T_s$ . QPSK é uma terminologia frequentemente usada para 4-PSK e o sinal é então dado pela equação

$$s_1(t) = A \cos(2\pi f_c t + 45^\circ) \quad \text{di-bit } 00 \quad b_{2i}b_{2i+1} = 00$$

$$s_2(t) = A \cos(2\pi f_c t + 135^\circ) \quad \text{di-bit } 01 \quad b_{2i}b_{2i+1} = 01$$

$$s_3(t) = A \cos(2\pi f_c t + 225^\circ) \quad \text{di-bit } 10 \quad b_{2i}b_{2i+1} = 11$$

$$s_4(t) = A \cos(2\pi f_c t + 315^\circ) \quad \text{di-bit } 11 \quad b_{2i}b_{2i+1} = 10 \quad (i-1)T_s \leq t \leq iT_s$$

A informação de entrada são dados binários codificados  $b_{2i}b_{2i+1}$ , mas é um di-bit com codificação Gray de modo que se erroneamente um símbolo é interpretado como um símbolo adjacente, isto produz somente um bit errado. O código Gray melhora o desempenho BER do sistema de comunicação digital M-ário.

Usando a identidade trigonométrica  $A \cos(u + v) = A \cos(u) \cos(v) - A \sin(u) \sin(v)$ , na equação anterior para o QPSK pode ser descrito em termos de uma componente em fase (I, cosseno) e em quadratura (Q, seno), como dado na equação

$$s_1(t) = A_v \cos(2\pi f_c t) - A_v \sin(2\pi f_c t) \quad \text{di-bit } 00 \quad b_{2i}b_{2i+1} = 00$$

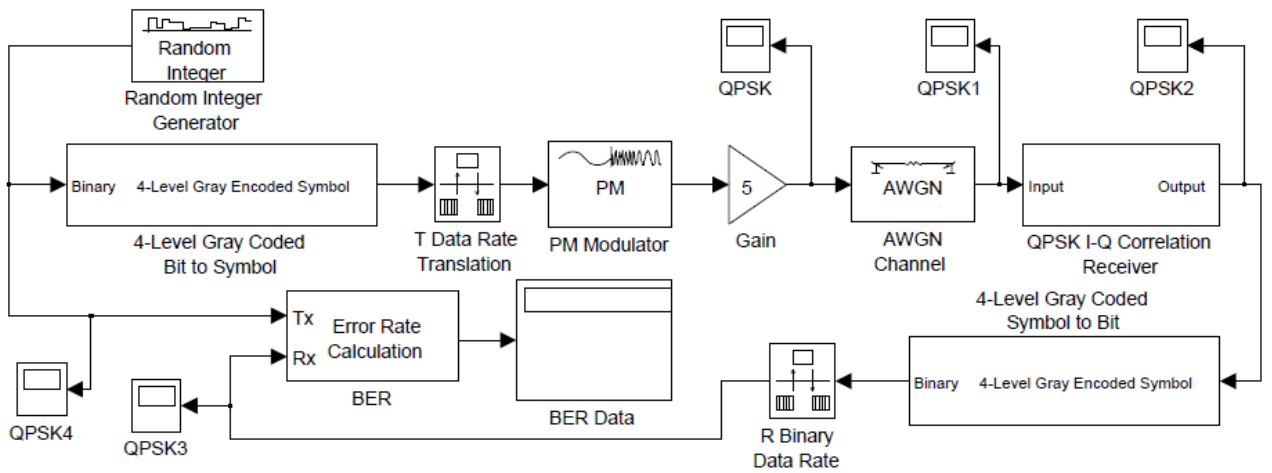
$$s_2(t) = -A_v \cos(2\pi f_c t) - A_v \sin(2\pi f_c t) \quad \text{di-bit } 01 \quad b_{2i}b_{2i+1} = 01$$

$$s_3(t) = -A_v \cos(2\pi f_c t) + A_v \sin(2\pi f_c t) \quad \text{di-bit } 10 \quad b_{2i}b_{2i+1} = 11$$

$$s_4(t) = A_v \cos(2\pi f_c t) + A_v \sin(2\pi f_c t) \quad \text{di-bit } 11 \quad b_{2i}b_{2i+1} = 10 \quad (i-1)T_s \leq t \leq iT_s$$

Da equação anterior a essa, a amplitude da portadora  $A_v = 0,707 \text{ V}$  na equação acima. O sinal QPSK pode ser decomposto em dois sinais binários PSK com a mesma frequência de portadora  $f_c$ , com uma correspondendo a portadora do cosseno (componente I) e a outra correspondente a portadora seno (componente Q), como dado na equação acima. Por causa da decomposição I-Q do sinal quaternário PSK, esta modulação em banda passante é também chamada de QPSK ou PSK quaternário.

## 8 – Simulação do PSK Multinível

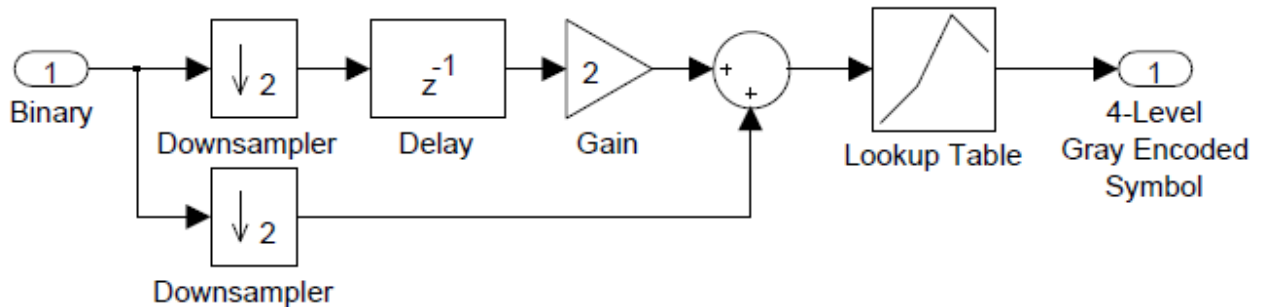


### 8.1 – Descrição dos blocos

**A – Random Integer Generator** – Communications Blockset; Comm Sources.

PARÂMETROS: M-ary number: 2; Initial seed: randseed; Sample time: 1e-3; Output data type: double.

## B – Bit to 4-Level Symbol



### B-1 – Downsampler – Signal Processing blockset; Signal Operations

PARÂMETROS: - Downsample factor, K: 2; Sample offset (0 to K-1): 0; Input processing: Inherited; Sample-based mode: Force single rate; Frame-based mode: Maintain input frame rate; Initial conditions: 0.

### B-2 – Downsampler – Signal Processing blockset; Signal Operations

PARÂMETROS: - Downsample factor, K: 2; Sample offset (0 to K-1): 1; Input processing: Inherited; Sample-based mode: Force single rate; Frame-based mode: Maintain input frame rate; Initial conditions: 0.

### B-3 – Delay – Signal Processing blockset; Signal Operations

PARÂMETROS: - Input processing: Inherited; Delay units: Samples; Delay (samples): 1; Initial conditions: 0; Reset port: None.

### B-4 – Gain – Simulink blockset; Math Operations

PARÂMETROS: - Main: Gain: 2; Multiplication: Element-wise( $k \cdot u$ ); Sample time (-1 for inherited): -1.

### B-5 – Sum – Simulink blockset; Math Operations

PARÂMETROS: - Main: Icon shape: round; List of signs: I++; Sample time (-1 for inherited): -1.

### B-6 – Lookup Table – Simulink blockset; Lookup Tables

PARÂMETROS: - Main: Vector of input values: [0,1,2,3]; Table data: [0,1,3,2]; Lookup method: Use Input Nearest; Sample time (-1 for inherited): -1.

## C – Rate Transition Block – Simulink Blockset; Attributes.

PARÂMETROS: Parameters: [x] Ensure data integrity.....[x] Ensure deterministic.....; Initial conditions: 0; Output ort samples time options: Specify; Output port sample time: 2e-6.

## D – PM Modulator Passband – Communications blockset; Modulation

PARÂMETROS: - Carrier Frequency (Hz): 20000; Initial phase (rad):  $\pi/4$ ; Fase deviation (rad):  $\pi/2$ .

#### **E – Error Rate Calculation** – Communications Blockset – Comm Sinks

PARÂMETROS: Receive Delay: 6; Computation delay: 0; Computation mode: Entire frame; Output data: Port.

#### **F – Display** – Simulink, Sinks Blockset.

PARÂMETROS: - Format: long; Decimation: 1.

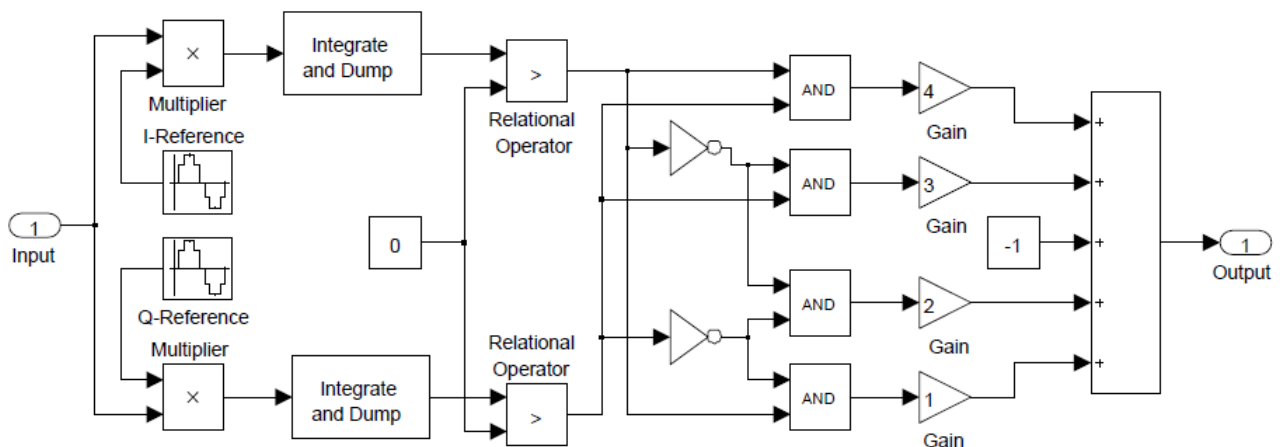
#### **G – Gain** – Simulink blockset; Math Operations

PARÂMETROS: - Main: Gain: 5; Multiplication: Element-wise( $k \cdot u$ ); Sample time (-1 for inherited): -1.

#### **H – AWGN** – Communications Blockset; Channels

PARÂMETROS: Input processing: Inherited; Initial seed: randseed; Mode: Signal to noise ratio ( $E_b/N_0$ );  $E_b/N_0$  (dB): 10; Number of bits per symbol: 2; Input signal power, referenced to 1 ohm (watts): 12.5; Symbol period (s):  $2e-3$ .

#### **I – Receptor de Correlação 4-PSK**



##### **I-1 – Sine Wave** – Simulink blockset; Sources

PARÂMETROS: - Sine type: Time based; Time(t): Use simulation time; Amplitude: 5; Bias: 0; Frequency: (rad/sec):  $40000 \cdot \pi$ ; Phase (rad):  $\pi/2$ ; Sample time:  $2e-6$ ; [x] Interpret vector parameters as 1-D.

##### **I-2 – Product** – Simulink blockset; Math Operations

PARÂMETROS: - Main: Number of inputs: 2; Multiplication: Element-wise( $\cdot$ ); Sample time (-1 for inherited): -1.

##### **I-3 – Sine Wave** – Simulink blockset; Sources



PARÂMETROS: - Sine type: Time based; Time(t): Use simulation time; Amplitude: 5; Bias: 0; Frequency: (rad/sec):  $40000\pi$ ; Phase (rad): 0; Sample time:  $2e-6$ ; [x] Interpret vector parameters as 1-D.

**I-4 – Integrate and Dump** – Communications blockset; Comm Filters

PARÂMETROS: - Main: Integration period (number of samples): 1000; Offset (number of samples): 0.

**I-5 – Constant** – Simulink blockset; Math Operations

PARÂMETROS: - Main: Constant value: 0; [x] Interpret vector parameters as 1-D; Sampling mode: Sample based; Sample time: inf.

**I-6 – Relational Operator** – Simulink blockset; Logical and Bit Operations

PARÂMETROS: - Main: Relational operator: >; Sample time (-1 for inherited): -1.

**I-7 – Logical Operator** – Simulink blockset; Logical and Bit Operations

PARÂMETROS: - Main: Operator: NOT; Icon shape: distinctive; Sample time (-1 for inherited): -1.

**I-8 – Logical Operator** – Simulink blockset; Logical and Bit Operations

PARÂMETROS: - Main: Operator: AND; Number of input ports: 2; Icon shape: rectangular; Sample time (-1 for inherited): -1.

**I-9 – Gain** – Simulink blockset; Math Operations

PARÂMETROS: - Main: Gain: 4; Multiplication: Element-wise( $k \cdot u$ ); Sample time (-1 for inherited): -1.

**I-10 – Gain** – Simulink blockset; Math Operations

PARÂMETROS: - Main: Gain: 3; Multiplication: Element-wise( $k \cdot u$ ); Sample time (-1 for inherited): -1.

**I-11 – Constant** – Simulink blockset; Math Operations

PARÂMETROS: - Main: Constant value: -1; [x] Interpret vector parameters as 1-D; Sampling mode: Sample based; Sample time: inf.

**I-12 – Gain** – Simulink blockset; Math Operations

PARÂMETROS: - Main: Gain: 2; Multiplication: Element-wise( $k \cdot u$ ); Sample time (-1 for inherited): -1.

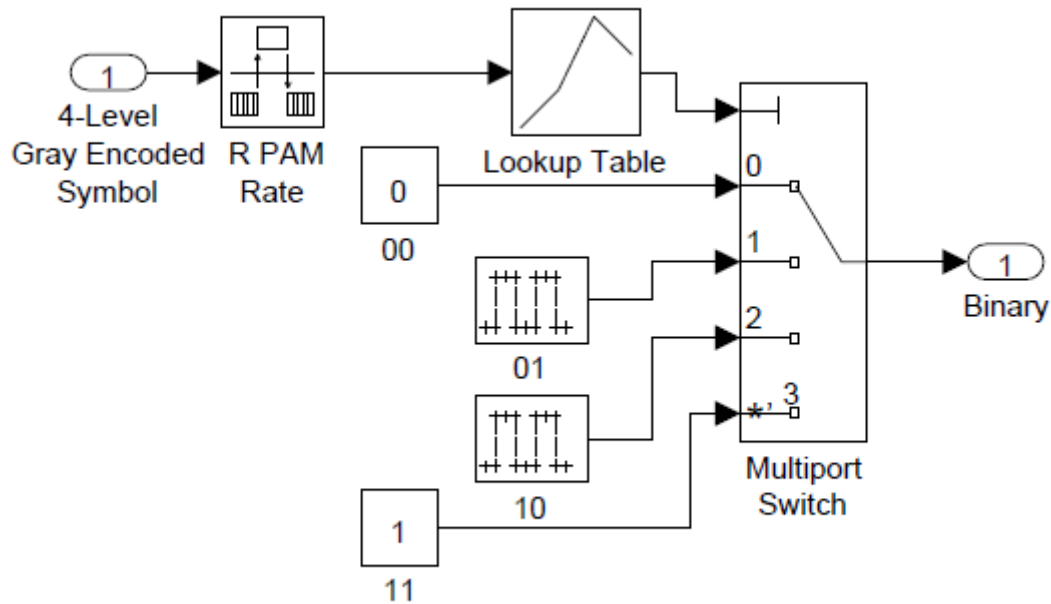
**I-13 – Gain** – Simulink blockset; Math Operations

PARÂMETROS: - Main: Gain: 1; Multiplication: Element-wise( $k \cdot u$ ); Sample time (-1 for inherited): -1.

**I-14 – Sum** – Simulink blockset; Math Operations

PARÂMETROS: - Main: Icon shape: rectangular; List of signs: +++++; Sample time (-1 for inherited): -1.

## J – 4-Level Symbol to Bit



### J-1 – Rate Transition – Simulink Blockset; Signal Attributes

PARÂMETROS: [x] Ensure data .....; [x] Ensure deterministic...; Initial Conditions: 0; Output port sample time options: Specify; Output port Sample time: 2e-6.

### J-2 – Lookup Table – Simulink blockset; Lookup Tables

PARÂMETROS: - Main: Vector of input values: [0,1,2,3]; Table data: [0,1,3,2]; Lookup method: Use Input Nearest; Sample time (-1 for inherited): -1.

### J-3 – Multiport Switch – Simulink Blockset; Signal Routing

PARÂMETROS: Main: Data port order: Zero-based contiguous; Number of data ports: 4; Data port for default case: Last data port; Diagnostic for default case: Error; Sample time (-1 for inherited): -1.

### J-4 - Constant – Simulink blockset; Source

PARÂMETROS: - Main: Constant value: 0; [x] Interpret vector parameters as 1-D; Sample time: inf.

### J-5 – Pulse Generator – Simulink Blockset; Sources

PARÂMETROS: Pulse type: Sample based; Time (t): Use simulation time; Amplitude: 1; Period (number of samples): 1000; Pulse Width(% of period): 500; Phase Delay(s): 500; Sample time: 2e-6; [x] Interpret vector parameters as 1-D.

### J-6 – Pulse Generator – Simulink Blockset; Sources

PARÂMETROS: Pulse type: Sample based; Time (t): Use simulation time; Amplitude: 1; Period (number of samples): 1000; Pulse Width(% of period): 500; Phase Delay(s): 0; Sample time: 2e-6; [x] Interpret vector parameters as 1-D.

### J-7 - Constant – Simulink blockset; Source

PARÂMETROS: - Main: Constant value: 1; [x] Interpret vector parameters as 1-D; Sample time: inf.

### K – Rate Transition – Simulink Blockset; Signal Attributes

PARÂMETROS: [x] Ensure data .....; [x] Ensure deterministic...; Initial Conditions: 0; Output port sample time options: Specify; Output port Sample time: 1e-3.

## 8.2 – Simulações

Configuration Parameters: Start time: 0; Stop time: 10.005; Type: Fixed-step; Solver: ode3; Fixed-step size: 2e-6; Periodic sample time constraint: Unconstrained; Tasking mode for periodic sample times: Auto.

### 8.3 – Gráficos a serem obtidos:

- 1 – Comparar o sinal modulado no osciloscópio 4-PSK com o sinal original no 4-PSK4.
- 2 – Comparar o sinal com ruído nos osciloscópios: 4-PSK1 e 4-PSK2.
- 3 – Verificar o atraso do sinal na saída através dos osciloscópios: 4-PSK4, 4-PSK3.
- 4 – Gerar o Gráfico BERx $E_b/N_0$  a partir dos dados abaixo. Usar a fórmula da  $P_b$  para sinais com código Gray do sistema de comunicação digital 4-PSK com receptor ótimo.

$$P_{b,4\text{bits, código Gray}} = \frac{M}{M-1} Q \left( \sqrt{2 \log_2 M \left[ \frac{E_b}{N_0} \right] \sin^2 \frac{\pi}{M}} \right) \text{ (limite superior } M \geq 4 \text{)}.$$

Ed/No (dB)	BER	P <sub>b</sub> (limite superior)
8	2x10 <sup>-4</sup>	
6		2,4x10 <sup>-3</sup>
4		
2		
0		

- 5 – Plotar os 3 resultados em um mesmo gráfico e comentar os resultados.

## 9 – Densidade Espectral de Potência do 4-PSK ou QPSK

O sinal 4-PSK ou QPSK pode ser decomposto em um sinal PSK binário em fase (I) e em quadratura (Q). Cada sinal PSK binário decomposto tem um PSD, PSD<sub>QPSK I,Q</sub>(f), dado na equação abaixo

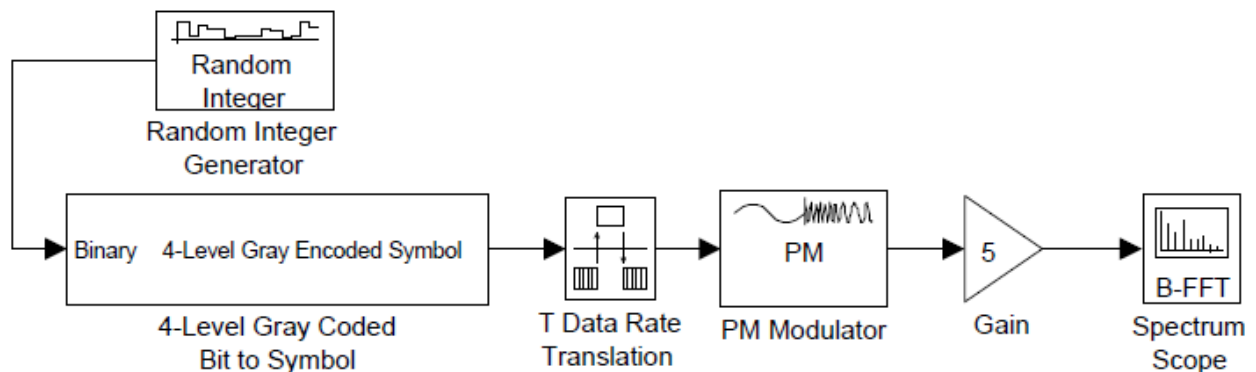
$$P_{\text{QPSK I,Q}}(f) = \frac{1}{4R_L} \left[ \frac{A^2 T_s}{4} \text{sinc}^2 \left( 2\pi \left( \frac{T_s}{2} \right) (f - f_c) \right) + \frac{A^2 T_s}{4} \text{sinc}^2 \left( 2\pi \left( \frac{T_s}{2} \right) (f + f_c) \right) \right]$$

Já que  $T_s = 2T_b$ , a largura de banda do sinal QPSK requer somente a largura de banda de um sinal PSK binário com a mesma taxa de bit  $r_b$  bits/seg.

A potência do sinal é dada por

$$P = \frac{A^2}{T_s R_L} \int_{(i-1)T_s}^{iT_s} \sin^2(2\pi f_c t + k_p m_j(t)) dt = \frac{A^2}{2R_L} \quad (i-1)T_s \leq t \leq iT_s \quad j = 1, 2, 3, 4$$

## 10 – Gráfico da Densidade Espectral de Potência da Modulação QPSK



### 10.1 – Descrição dos blocos

**A – Spectrum Scope** – Signal Processing blockset; Signal Processing Sinks.

PARÂMETROS: - Scope Properties: Spectrum units: dBW/Hertz; Spectrum type: One-sided ([0...Fs/2]); [x] Buffer input; Buffer size: 524288; Buffer overlap: 0; Treat Mx1...: M channels; Window: Boxcar; [x] Specify FFT length; Number of spectral averages: 1; FFT length: 524288. Axis Properties: [x] Inherit sample time from input; Frequency display offset (Hz): 0; Frequency display limits: Auto; Minimum Y-limit: -50; Maximum Y-limit: 60; Y-axis label: Magnitude-squared, dB.

### 10.2 – Simulações

Configuration Parameters: Start time: 0; Stop time: 5.24288; Type: Fixed-step; Solver: ode3; Fixed-step size: 2e-6; Periodic sample time constraint: Unconstrained; Tasking mode for periodic sample times: Auto.

### 10.3 – Gráficos a serem obtidos:

1 – Obter a PSD do sinal de saída do circuito. Mostrar o resultado para frequência entre 0 e 50 kHz.

2 – Comparar os 3 gráficos das PSDs obtidos e comentar os resultados.