

# UNIVERSIDADE TÉCNICA DO ATLÂNTICO ENGENHARIA INFORMÁTICA E TELECOMUNICAÇÕES SISTEMAS DE TELECOMUNICAÇÕES

# Trabalho prático sobre modulação FM

Walter dos Santos

21 Junho 2022

\_\_\_\_\_

Ferramentas usadas para realização do trabalho:





#### Conteúdo:

1.	Experiências							
	1.1.	Modulação FM (método direto)	.página 1					
	1.2.	Funções de Bessel e larguras de banda	. página 6					
	1 3	Modulação de FM usando o método de Armstrong (método indirecto)	nágina 10					

# **Objectivo**

O objetivo deste trabalho é estudar a modulação de sinais em frequência. Aplicando as diversas técnicas de modulação e demodulação, verifica-se algumas das propriedades dos sinais de FM, nomeadamente no que diz respeito ao respectivo espectro.

#### 1 Experiências

#### 1.1) Modulação FM (método direto)

# Enunciado:

Abra uma janela de simulação onde vai colocar os diversos blocos (grave com o nome fm.mdl, por exemplo).

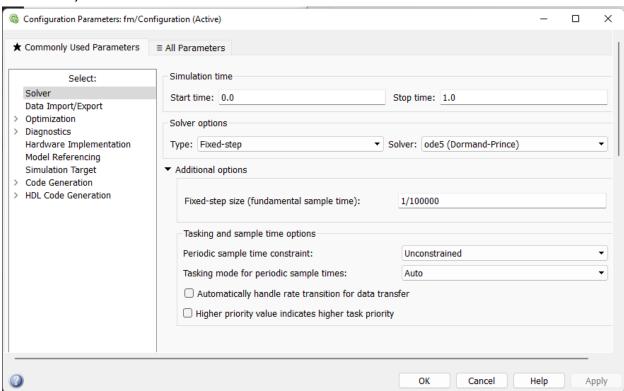
Os parâmetros de simulação a usar nesta experiência devem ser:

Start time: 0.0Stop time: 1.0

• Solver type: ode5(Dormand-Price), fixed step

Step size: 1/100000

# Resolução:



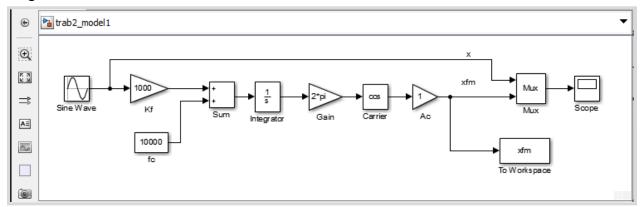
3 Crie um diagrama de blocos que realize um modulador de FM usando o método directo, ou seja, o método que implementa directamente a função:

$$x_{\text{FM}}(t) = A_c \cos \left[ 2\pi f_c t + 2\pi k_f \int_0^t x(t) dt \right]$$
$$= A_c \cos \left\{ 2\pi \int_0^t \left[ f_c + k_f x(t) \right] dt \right\}$$

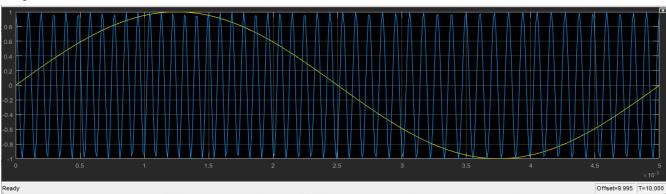
Um diagrama de blocos possível está representado na figura seguinte:

# Resolução:

#### Diagrama de blocos:



#### Scope:



Enunciado
Liluitolado

- 4 Configure os diversos blocos de modo a que o modulador de FM possua as seguintes características:
  - amplitude do sinal modulador:  $A_m = 1 \text{ V}$
  - frequência do sinal modulador:  $f_m = 200 \text{ Hz}$
  - amplitude da portadora:  $A_c = 1 \text{ V}$
  - $\bullet\,$ frequência da portadora:  $f_c=10~\mathrm{kHz}$
  - constante do modulador: k<sub>f</sub> = 2 kHz/V
- Resolução:

Estas configurações já foram feitas anteriormente:

amplitude do sinal modulador: Am =1V, frequência do sinal modulador: fm = 200 Hz, amplitude da portadora: Ac =1V, frequência da portadora: fc = 10 kHz,constante do modulador: kf = 2 kHz/V.

#### Enunciado:

- 5 Calcule o desvio de frequência e o índice de modulação correspondentes aos sinais anteriores:
  - desvio de frequência:  $\Delta f =$  Hz
  - índice de modulação:  $\beta = \underline{\hspace{1cm}}$ rad
- Resolução:

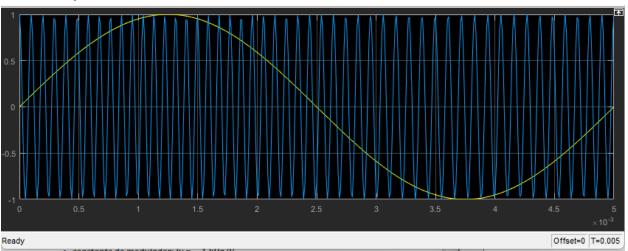
Cálculo do desvio de frequência e o índice de modulação correspondente aos sinais anteriores:

- Desvio de frequência:  $\triangle F = kf \times Am = 2000Hz \times 1v = 2000Hz$
- Índice de modulação :  $\beta = \Delta f fm = 2000Hz \ 200Hz = 20rad$

[6] Inicie a simulação e observe, no mesmo scope o sinal modulador e sinal de FM, numa gama temporal de 5 ms.

Repare que a frequência instantânea máxima no sinal de FM ocorre quando o sinal modulador atinge o valor máximo, e que a frequência instantânea mínima de xfm ocorre com valor mínimo de x.

# Resolução:



# Enunciado:

- Altere agora a constante do modulador,  $k_f$ , de modo que o índice de modulação seja  $\beta = 5$  rad e efectue nova simulação.
  - constante do modulador:  $k_f = \underline{\hspace{1cm}} kHz/V$

Estime a largura de banda ocupada pelo sinal de FM usando a regra de Carson:

- Largura de banda: B = H:
- Resolução:

<u>Constante de modulador kf</u> =  $\beta \times fm$   $Am = 5 \times 200$  1 = 1000Hz v/= 1kHz/v = 1000Hz Largura de banda (B):

$$\Delta f = 1000Hz$$

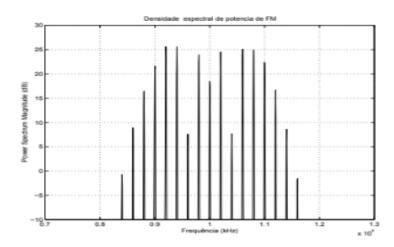
$$\beta = 5rad$$

$$\underline{BCarson} = 2 \times \Delta f (1 + 1 \beta) = 2 \times 1000 \times (1 + 1 5) = 2400 Hz = 2.4 kHz$$

Logo a largura de banda usando a regra de Carson é de 2.4 kHz.

8 Transfira para o workspace do Matlab  $2^{16}$  amostras do sinal xfm e faça a representação gráfica do espectro de amplitudes do vector xfm na gama  $f_c \pm 3$  kHz:

```
>> fs = 100000; fc = 10000;
>> psd(xfm,2^14,fs);
>> axis([fc-3000 fc+3000 -10 30])
>> xlabel('Frequência (kHz)')
>> title('Densidade espectral de potencia de FM')
```



Observe que o espectro do vector xfm é um espectro de riscas espaçadas de  $f_m$ .

A largura de banda que consegue estimar no gráfico tem um valor próximo do que tinha calculado?

# Resolução:

Podemos observar que o step entre as riscas do espectro é de 200Hz 0.2kHz  $0.02 \times 10 \ kHz$ , houve algum erro no gráfico as frequências não estão em kHz porque a base é de 104 mas sim em  $kHz \times 10$ . A largura de banda no gráfico pode ser calculada por:

$$Bgr\'{a}fico = (lsup = 1.16 \times 10kHz) - (linf = 0.84 \times 10kHz)$$
  
 $Bgr\'{a}fico = (1.16 - 0.84) \times 10 = 3.2kHz$ 

$$Bgr\'afico = 3.2kHz\ BCarson = 2.4kHz$$

$$Bgr\'afico - BCarson = 3.2 - 2.4 = 0.8kHz$$

Comparando com a largura de banda de Carson obtém-se: uma diferença de 0.8kHz.

- Enunciado:
  - 9 Repita o procedimento anterior quando a amplitude e a frequência do sinal modulador são variadas. O que acontece à densidade espectral de potência?
- Resolução: A densidade de potência varia proporcionalmente com a variação de amplitude e com a frequência do sinal modulador.

#### 1.2) Funções de Bessel e larguras de banda

Enunciado:

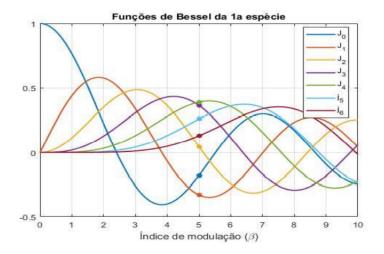
```
Represente graficamente as funções de Bessel de 1ª espécie, J_n(\beta), para n=0,1,\ldots 6 e \beta\leqslant 10. Sobreponha a este gráfico os valores das funções de Bessel para o caso \beta=5 que tem vindo a ser considerado.

>> beta = 0:0.01:10;
>> bj=besselj(0:6, beta');
>> bj5 = besselj(0:6,5);
>> plot(beta,bj,5,bj5,'*')

>> grid on
>> title('Funções de Bessel da 1ª espécie')
>> xlabel('Índice de modulação (\beta)')
```

Resolução:

```
beta = 0:0.01:10; bj = zeros(0,size(beta,2));
for i = 0:6
    bj(i+1,:) = besselj(i,beta);
end
bj5 = besselj(0:6,5);
plot(beta,bj,5,bj5,'*','LineWidth',1.5), grid on
legend('J_0','J_1','J_2','J_3','J_4','j_5','j_6','Location','Best')
title('Funções de Bessel da la espécie')
xlabel('Índice de modulação (\beta)')
```



- Calcule, analiticamente, a potência média do sinal de FM,  $P_{\textsc{fm}}$ , dissipada numa resistência de 1  $\Omega$  :
  - Potência média:  $P_{\scriptscriptstyle \mathrm{FM}} = \underline{\hspace{1cm}} \mathbf{W}$
- Resolução:

Pôtencia Média =  $(Ac)^2 / 2 = 1^2 / 2 = 0.5w$ 

Enunciado:

- 3 Estime a potência média do sinal de FM representado no vector xfm:
  - >> Pfm=mean(xfm.^2)
- Resolução:
- >> load('xfm.mat')
- >> Pfm=mean(xfm.^2)

Pfm = 0.5000

- Enunciado:
- 4 Determine, a partir das funções de Bessel e usando comandos MATLAB, a percentagem da potência total o sinal FM contida na banda definida pela regra de Carson.
  - Relação de potências:  $\frac{P_{B_{\text{Carson}}}}{P_{\text{FM}}} = _$ \_\_\_\_\_\_%
- Resolução:
- >> beta = [0.1 0.2 0.5 1.0 2.0 5.0 10.0 20.0 30.0];
- >> nmax = 2\*sum(abs(besselj(1:99,beta)) > 0.01)

Pb Carson / Pfm = %

- Enunciado:
  - 5 Repita o ponto anterior agora para o critério dos 99%. Pode obter o número de riscas a considerar para o cálculo da largura de banda através do comando:

```
>> beta = 5;
>> nmax = sum(abs(besselj(1:99,beta)) > 0.01);
```

Resolução:

nmax = 8

Pb 99% / Pfm = nmax \*0.99 / 0.5

Generalize a análise anterior para outros valores de β. Usando a função besselj(), complete a tabela seguinte, relativa ao critério de 99%:

β	0,1	0,2	0,5	1,0	2,0	5,0	10,0	20,0	30,0
$2n_{\text{max}}$									

Para preencher a tabela pode usar o seguinte código

```
>> beta = [0.1 0.2 0.5 1.0 2.0 5.0 10.0 20.0 30.0];
>> nmax = 2*sum(abs(besselj(1:99,beta')') >= 0.01)
```

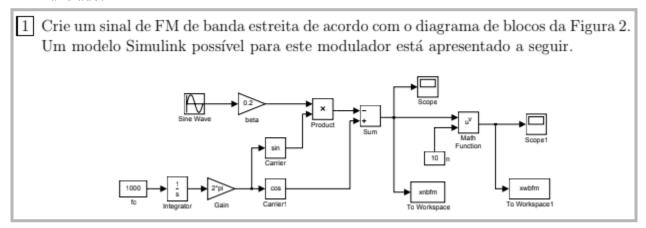
# Resolução:

В	0,1	0,2	0,5	0,1	2,0	5,0	10,0	20,0	30,0
2n <sub>max</sub>	2,0	2,0	4,0	6,0	8,0	16,0	28,0	46,0	66,0

#### Code usado:

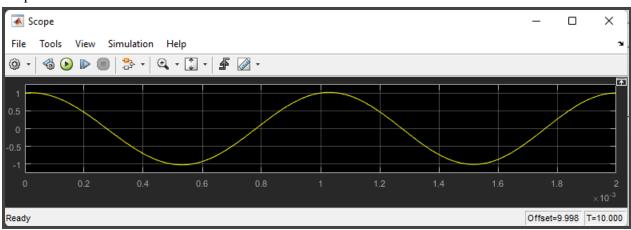
#### 1.5) Modulação de FM usando o método de Armstrong (método indirecto)

#### Enunciado:

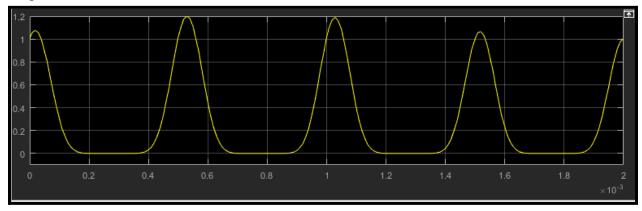


# Resolução:

#### Scope:



#### Scope1:



Enui	ncia	do
 Lilui	IIOIU	uv.

- 2 Configure os diversos blocos de modo a produzir um sinal de FM de banda estreita com as seguintes propriedades:
  - amplitude do sinal modulador:  $A_m = 1 \text{ V}$
  - frequência do sinal modulador:  $f_m = 200 \text{ Hz}$
  - amplitude da portadora:  $A_c = 1 \text{ V}$
  - frequência da portadora:  $f_c = 1 \text{ kHz}$
  - índice de modulação:  $\beta = 0.2$  rad

Quantas riscas espectrais laterais tem o espectro deste sinal de FM (xnbfm)? E qual a sua largura de banda?

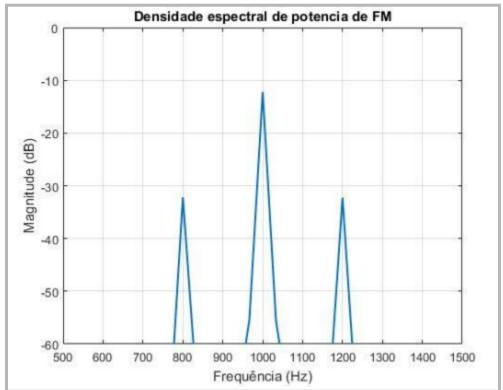
- Número de riscas laterais: 2n<sub>max</sub> =
- Largura de banda: B =\_\_\_\_\_Hz
- Resolução:
- >> 2nmax = 2\*sum(abs(besselj(1:99,0.2)') >= 0.01)

2nmax = 2

- *Número de riscas laterais*: 2nmax = 2.0
- *Largura de banda*:  $B = 2(\beta + 1) fm = 2(0.2 + 1) 200 = 480 Hz$

- Enunciado:
- 3 Represente os espectros de amplitude do sinal de FM de banda estreita (use escalas de frequência adequadas). Confirma os valores encontrados no ponto anterior?

# Resolução:



A amplitude do sinal de FM de banda estreita :

fmin = 800Hz

fmax = 1200Hz

B = fmax - fmin = 1200 - 800 = 400Hz

Tem um diferença de 80Hz em relação a BCarson

# Enunciado:

Multiplique em frequência, por 10, o sinal de FM de banda estreita. Para tal pode, por exemplo, elevar o sinal à décima potência e filtrá-lo com um filtro passa-banda (ou mesmo passa-alto) com largura de banda adequada.

Quais são agora os novos valores para os seguintes parâmetros:

- Frequência da portadora:  $f_c =$  Hz
- Desvio de frequência:  $\Delta f = \underline{\hspace{1cm}}$  Hz
- Índice de modulação:  $\beta = \underline{\hspace{1cm}}$ rad

Resolução:

- \* Frequência da portadora:  $fc = 10 \times 1000 = 10000Hz$
- \* Desvio de frequência:  $\Delta f = \beta \times fm = 0.2 \times 200 = 40Hz$

 $\Delta f_{x10} = 10 \times 40 = 400 Hz$ 

- \* índice de modulação:  $\beta = \Delta f_{x10} / fm = 400 \ 200 = 2rad$
- Enunciado:
- 5 Represente a densidade espectral de potência do sinal de FM de banda larga (xwbfm).
- Resolução:

Com a representação da densidade espectral de potência, verifica que, deixou-se de ter apenas duas riscas espectrais laterais, havendo agora várias componentes espectrais, como é típico num sinal de FM de banda larga.

# FIM