

## Laboratório de Princípios de Comunicação

Aulas Remotas - 2020.1

## Experimento 05 – Modulação Angular

Data: 05/10/2020

**Pré-requisitos**

1. Uso de sinais complexos no GRC e do bloco VCO
2. Uso de filtro passa alta, defasador e ponte retificadora

**Instruções gerais**

- Organize os arquivos em um diretório específico para o laboratório em seu computador. Em caso de necessidade, os arquivos serão usados como evidência da participação em sala. Use nomes de arquivos do GRC com o formato

Matricula\_ExpXX\_ARYY.grc → Exemplo: 12345678\_Exp01\_AR03.grc

- O relatório será enviado em formato “.pdf” usando a nomenclatura

Matricula\_ExpXX\_Rel.pdf → Exemplo: 12345678\_Exp03\_Rel.pdf

- Quando solicitado, envie um arquivo compactado com o formato “.zip” com todos os arquivos relacionados ao experimento, contendo os arquivos “.grc” e “.pdf”.

Matricula\_ExpXX.zip → Exemplo: 12345678\_Exp03.zip

- Preferencialmente (mas não obrigatoriamente) use GUI do tipo “QT”.
- Apresente no início do relatório todos os cálculos teóricos solicitados ao longo do roteiro, e coloque as tabelas no final.

## Atividade 01 – Modulador FM

### Conceitos preliminares

Na modulação angular seja ela em frequência (frequency modulation – FM) ou em fase (phase modulation - PM), uma onda portadora cossenoidal tem sua frequência (ou fase) alterada (modulada) pelo sinal-mensagem  $m(t)$ . Considerando um sinal modulante  $m(t)$  que varie linearmente com o ângulo  $\theta(t)$ , o sinal modulado

$$s(t) = A_c \cos(\theta\{m(t)\}) \quad (1)$$

não varia linearmente com  $m(t)$  devido à natureza da função cosseno. A relação entre o ângulo e a frequência instantâneas de  $s(t)$  é dada por  $f_i(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d}{dt} \theta\{m(t)\}$ , sendo

$$\theta_{PM}(t) = 2\pi f_c t + k_p m(t), \quad (2)$$

para modulação PM, com  $k_p$  em rads/Volts, e

$$\theta_{FM}(t) = 2\pi f_c t + 2\pi k_f \int_{-\infty}^t m(\tau) d\tau, \quad (3)$$

para modulação FM, com  $k_f$  em Hz/Volts. A forma de onda do sinal FM e sua frequência instantânea são dados, respectivamente, por:

$$s_{FM}(t) = A_c \cos\left(2\pi f_c t + 2\pi k_f \int_{-\infty}^t m(\tau) d\tau\right), \quad (4)$$

$$f_i(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d}{dt} \theta_{FM}(t) = f_c + k_f m(t). \quad (5)$$

A Figura 1 mostra um exemplo ilustrativo de modulação FM. Note que uma variação de  $V$  volts no sinal modulante  $m(t)$  produzirá uma variação  $k_f V$  (em Hz) na frequência instantânea de  $s(t)$ .

A função do tempo dada por

$$f_d(t) = f_i(t) - f_c = k_f m(t) \quad (6)$$

é denominada desvio instantâneo de frequência e

$$\Delta f = \max|f_d(t)| = k_f \max|m(t)| \quad (7)$$

é denominado desvio máximo (ou de pico) de frequência ou, simplesmente, desvio de frequência. Define-se, ainda, a razão de desvio de frequência como sendo a seguinte razão:

$$\beta_f = \frac{\Delta f}{B_m}, \quad (8)$$

onde  $B_m$  é a largura de banda do sinal modulante  $m(t)$ . Os parâmetros  $\beta_f$  e  $\Delta f$  são usados para indicar a intensidade (ou profundidade) da modulação de frequência. Quanto maior  $\beta_f$  e  $\Delta f$ , para uma dada  $B_m$ , maior é a intensidade da modulação e a largura de banda do sinal FM.

Uma estimativa prática usual para a largura de banda do sinal FM,  $B_{FM}$ , é dada pela regra de Carson, segundo a qual

$$B_{FM} \approx B_{Carson} = 2(\Delta f + B_m) = 2B_m(1 + \beta_f). \quad (9)$$

A banda de largura  $B_{Carson}$  centrada em  $f_c$  contém, geralmente, mais de 98% da potência do sinal FM.

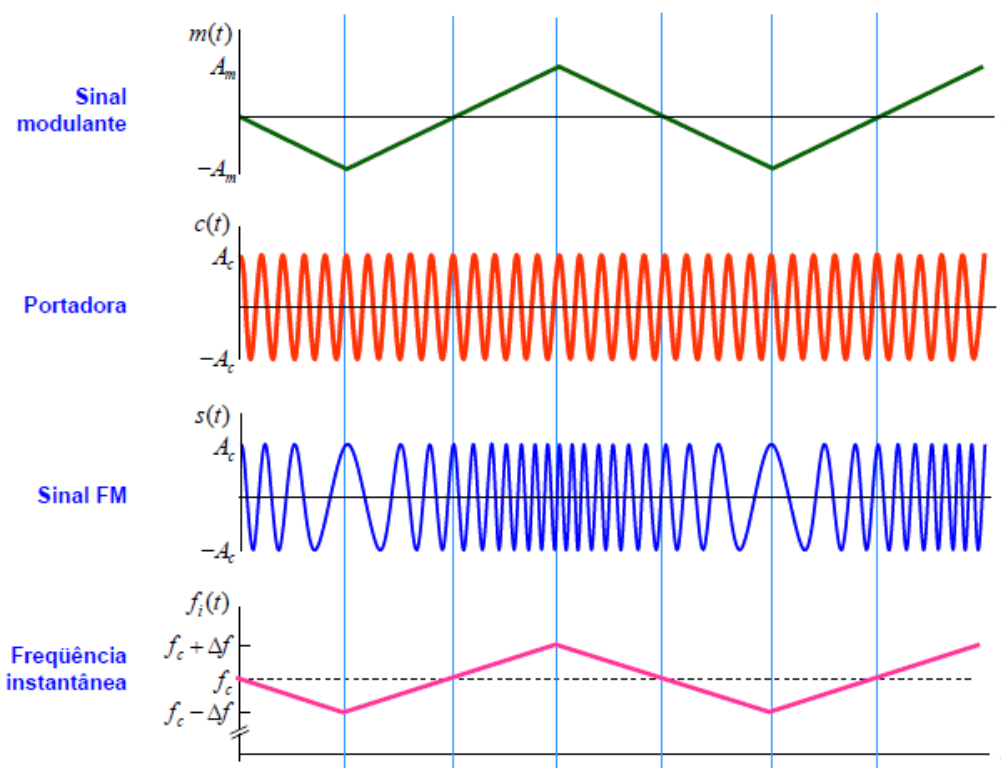


Figura 1 - Exemplo de modulação de frequência: (a) sinal modulante, (b) sinal FM (modulado), e (c) frequência instantânea do sinal FM.

### Construção do modulador

A Figura 2 do roteiro do Experimento 4 pode inspirar a construção do modulador FM ou outro esquema que preferir, como o modulador de Armstrong.

O sinal FM modulado por sinais periódicos deverá ser observado nos domínios do tempo, frequência (FFT) e no espectrograma (Waterfall Sink), variando-se frequência e amplitude dos modulantes.

Utilizando uma caixa de som (Audio Sink), escute o sinal FM variando  $f_c$ ,  $\Delta f$  e o tipo de função do sinal modulante.

Calcule e meça o desvio de frequência  $\Delta f$  seguido da banda de Carson  $B_{carson}$ . Use um filtro passa faixa de largura de banda variável e um medidor de tensão RMS (ou potência) para encontrar a largura de banda que concentre 98% da potência de  $s(t)$  e compare com  $B_{carson}$ .

## Atividade 02 – Modulação PM

### Conceitos preliminares e construção do modulador

A partir de (1) e (2) podemos encontrar a forma de onda e a frequência instantânea do sinal PM:

$$s_{PM}(t) = A_c \cos(2\pi f_c t + k_p m(t)), \quad (10)$$

$$f_i(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d}{dt} \theta_{PM}(t) = f_c + \frac{k_p}{2\pi} \frac{d}{dt} m(t), \quad (11)$$

com  $k_p$  em rads/Volts. Um sinal PM pode ser claramente obtido através de um modulador FM com o auxílio de diferenciador sobre o sinal modulante  $m(t)$  antes dos blocos de modulação. A diferenciação será feita com o auxílio dos blocos <Delay> e <Substract>. Basta subtrair de  $m(t)$  sua versão atrasada de 1 amostra. Deduzindo o desvio máximo de frequência do sinal PM como:

$$\Delta f = \frac{k_p}{2\pi} \max \left| \frac{d}{dt} m(t) \right|, \quad (12)$$

temos que a sensibilidade do VCO deve ser  $k_{VCO} = \frac{k_p}{2\pi}$ . Como esta é considerada em rads/s no GRC, pode-se ignorar a divisão por  $2\pi$  no preenchimento do campo.

### Modulação PSK

Para sinais modulantes em que  $\frac{d}{dt} m(t) \rightarrow \infty$ , a solução de sinais PM se dá de forma direta. Considere  $m(t)$  uma onda quadrada de média nula variando entre -1 e +1 modulando em fase uma portadora:

$$s_{PM}(t) = A_c \cos(2\pi f_c t + k_p m(t)), \quad (13)$$

$$s_{PM}(t) = A_c \cos(2\pi f_c t + k_p), \text{ quando } m(t) > 0, \text{ e} \quad (14)$$

$$s_{PM}(t) = A_c \cos(2\pi f_c t - k_p), \text{ quando } m(t) < 0. \quad (15)$$

A modulação cuja portadora é chaveada em fase é chamada de PSK (Phase Shift Keying), muito usada em comunicação digital e, para  $k_p = \frac{\pi}{2}$ , o chaveamento é de 180 graus (Figura 2) e o sinal modulado dado por:

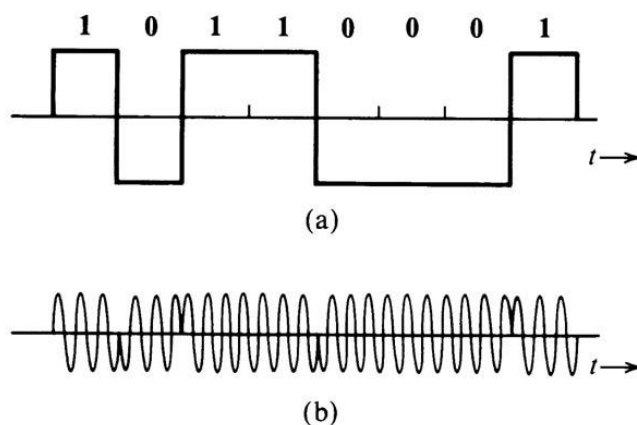


Figura 2 – (a) sinal mensagem digital. (b) sinal modulado digital PSK.

$$s_{PSK}(t) = \pm A_c \sin(2\pi f_c t). \quad (16)$$

O sinal pode ser produzido por um modulador AM-DSB-SC, e possui largura de banda duas vezes a do sinal mensagem.

### Atividade 03 – Demodulação FM

#### Conceitos preliminares

Um demodulador (ou detector) ideal de sinais FM é um dispositivo que produz um sinal de saída cuja amplitude é linearmente proporcional à frequência instantânea do sinal de entrada. Existem muitas formas de construir um detector FM, uma delas é um discriminador de frequência construído com um circuito cujo ganho varia linearmente com a frequência, na faixa ocupada pelo sinal FM: ou seja, um circuito cuja resposta de amplitude nessa faixa é idealmente uma reta, como ilustrado na Figura 3. Este circuito converte as variações de frequência do sinal FM também em variações de amplitude, convertendo o sinal FM em um sinal híbrido FM-AM, que pode ser demodulado por um detector de envoltória. Esta combinação de circuitos é denominada detector de inclinação.

$$\frac{d}{dt} s_{FM}(t) = -2\pi A_c (f_c + k_f m(t)) \sin\left(2\pi f_c t + 2\pi k_f \int_{-\infty}^t m(\tau) d\tau\right). \quad (17)$$

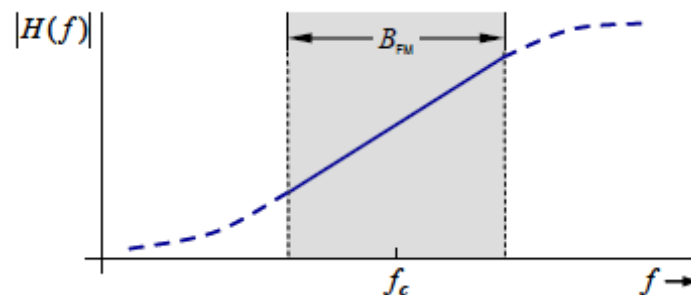


Figura 3 - Resposta de amplitude de um discriminador de frequência ideal.

#### Construção do demodulador

Um bloco de filtro passa altas (FPA) de primeira ordem de frequência de corte  $f_{corte} \gg f_c$  pode ser usado como discriminador de frequência. Para definir um filtro de primeira ordem, use o bloco <Decimating FIR Filter> com um vetor de *Taps* definido em AR3.

Um detector de envoltória pode ser usado para a recuperação de  $\tilde{m}(t)$  a partir do sinal em (17). Se inspire na ponte retificadora do roteiro do Experimento 2 para extrair  $\tilde{m}(t)$  de  $\frac{d}{dt} s_{FM}(t)$ .

## Relatório – Entregar até 08/10/2020

Faça um relatório descrevendo as sequencias de passos e análises pertinentes para chegar aos resultados das atividades remotas (ARs). Ilustre com as telas do GRC.

Apresente no início do relatório todos os cálculos e respostas a questões teóricas solicitadas e as tabelas no final.

### AR 01 – Modulação FM

#### Setup da simulação AR01

Taxa de amostragem	254 ksps
Instrumentos virtuais	Osciloscópio com FFT size de 4096 Analisador de Espectro com FFT size de 4096 Espectrograma (<Waterfall Sink>) Caixa de som (<Audio Sink>) VCO
Observações adicionais	Utilizar bloco “Throttle”

Implemente o modulador FM com as configurações detalhadas a seguir:

Sinal / bloco	Descrição
$m(t)$	Ondas quadrada <sup>1</sup> , triangular e senoidal de média nula, frequência $f_m$ igual a 10, 100 e 1000 Hz; Amplitude $m_p$ (pico) igual 0.25, 1 e 5 V
$f_c$	30 kHz
VCO	Sensibilidade de frequência: $k_f = k_{VCO} = 2 \text{ kHz/V}^2$

Considerando inicialmente a onda quadrada no gerador com  $f_m = 1 \text{ Hz}$  e  $m_p = 5 \text{ V}$ , faça um *print* do diagrama (**Fig. 1.1**) e apresente os gráficos no tempo (**Fig. 1.2**) e na frequência (**Fig. 1.3**) simultaneamente para os sinais modulante e modulado, sempre ajustando as escalas em X e Y para melhor observar as curvas. E observe, apenas para  $s_{FM}(t)$ , o espectro variando com o tempo no espectrograma (**Fig. 1.4**).

**E1a)** Meça o valor do desvio de frequência e compare com o valor esperado na teoria. Use “Max Hold” na interface da FFT para facilitar a medida.

**E1b)** Encontre o valor experimental da sensibilidade  $k_f$  e compare com o ajustado no VCO. Use este valor para calcular  $\Delta f_{\text{experimental}}$  quando pedido nas tabelas.

Observe o espectro FFT para todas as combinações apresentadas na tabela descrição acima, e complete as tabelas 1.1 a 1.3. Para a medida da largura de banda  $B_{98\%}$ , use um filtro passa faixa comum com banda de transição de 100 Hz.

**A1a)** Analise os resultados a partir da variação dos parâmetros e tipos de sinais, comparando os valores de  $\beta_f$  e refletindo sobre o conceito de sinais FM banda estreita e banda larga.

<sup>1</sup> Para ondas quadradas ou triangulares a voltagem do bloco <Signal Source> varia de 0 a Amplitude + offset, enquanto que para ondas senoidais de -Amplitude a +Amplitude + offset.

<sup>2</sup> Converter para rads/(s Volts) no campo do VCO do GRC.

Para fins didáticos, utilize uma caixa de som (Audio Sink) e escute o sinal FM. Use uma senoide como  $m(t)$ , e varie  $f_c$  (entre 1 e 5 kHz),  $m_p$  (entre 0 e 2V) e  $f_m$  (entre 0.5 e 5 Hz). Salve este esquema .grc num arquivo à parte e analise o efeito **(A1b)**.

**T1)** Um sinal FM transmitido com portadora de frequência  $f_c = 96,3$  MHz e amplitude  $A_c = 100$  V tem  $m(t)$  como sinal modulante de largura de banda  $B_m = 8$  kHz e  $m_p = \max[m(t)] = -\min[m(t)] = 7,5$  V. O sinal FM transmitido deverá ter desvio máximo de frequência ( $\Delta f$ ) igual a 75 kHz.

**T1a)** Determine qual deverá ser a sensibilidade  $k_f$  do modulador, em Hz/V.

**T1b)** Determine o valor mínimo ( $f_{\min}$ ) e o máximo ( $f_{\max}$ ) da frequência instantânea do sinal FM que será transmitido.

**T1c)** Determine, utilizando a regra de Carson, um valor prático aproximado para a largura  $B_{\text{Carson}}$  da banda ocupada pelo sinal FM que será transmitido. Determine as frequências extremas ( $f_{\text{inferior}}$  e  $f_{\text{superior}}$ ) dessa banda ocupada.

## AR 02 a – Modulação PM

### Setup da simulação AR02a

Taxa de amostragem	254 ksps
Instrumentos virtuais	Osciloscópio Analisador de Espectro VCO Defasador e Subtrator Misturador

Implemente o modulador PM com as configurações detalhadas a seguir:

Sinal / bloco	Descrição
$m(t)$	Onda triangular de média nula, frequência $f_m$ de 500 Hz; Amplitude $m_p$ de 5 V
$f_c$	30 kHz
VCO	Sensibilidade de frequência: $k_p = 2\pi k_{VCO} = 2\pi$

**T2a)** Calcule a função  $\frac{d}{dt}m(t)$ , e os valores de  $\Delta f$ ,  $\beta_f$  e  $B_{PM}$ .

Monte o diagrama utilizando o Defasador (bloco <Delay> com atraso de 1 amostra), o Subtrator e o modulador FM. Faça um *print* do esquema do modulador (**Fig. 2.1**) e apresente os gráficos no tempo (**Fig. 2.2**) e na frequência (**Fig. 2.3**) simultaneamente para os sinais modulante e modulado, sempre ajustando as escalas em X e Y para melhor observar as curvas.

## AR 02 b – Modulação PSK

### Setup da simulação AR02b

Taxa de amostragem	254 ksps
Instrumentos virtuais	Osciloscópio Analisador de Espectro Oscilador e Misturador

Implemente o modulador PSK utilizando um modulador AM-DSB-SC, tendo uma onda quadrada como sinal modulante, simulando uma sequência de pulsos de um sinal digital.

Sinal / bloco	Descrição
$m(t)$	Onda quadrada de média nula, frequência $f_m$ de 1000 Hz; Amplitude $m_p$ de 1 V
$f_c$	30 kHz

Faça um *print* do esquema do modulador PSK (**Fig. 2.4**) e apresente os gráficos no tempo (**Fig. 2.5**) e na frequência (**Fig. 2.6**). Perceba que o padrão de modulação observado no tempo e frequência difere daquela vista anteriormente em PM e FM. Apesar de ser modulado em fase, o sinal  $s_{PSK}(t)$  varia linearmente com  $m(t)$ .

### AR 03 – Demodulação FM

#### Setup da simulação AR03

Taxa de amostragem	254 ksp/s
Instrumentos virtuais	Osciloscópio Analisador de Espectro VCO Filtros Ponte retificadora

Implemente o demodulador FM com as configurações detalhadas a seguir:

Sinal / bloco	Descrição
$m(t)$	Onda dente de serra de média nula, frequência $f_m$ de 500 Hz; Amplitude $m_p$ de 5 V
$f_c$	30 kHz
VCO	Sensibilidade de frequência: $k_f = k_{VCO} = 1000$ Hz/Volts
Taps do Filtro FIR	[-0.1044, -0.2268, 0.7116, -0.2268, -0.1044]

Para a construção do discriminador de frequência, utilize o bloco <Decimating FIR Filter> como um filtro passa alta de primeira ordem capaz de funcionar como um diferenciador, seguido da ponte retificadora, filtro passa baixos e bloqueador DC, usados no Experimento 2.

Faça um *print* do esquema (**Fig. 3.1**) e apresente os gráficos no tempo dos sinais  $s_{FM}(t)$  e  $\frac{d}{dt}s_{FM}(t)$  (**Fig. 3.2**), simultaneamente, e dos sinais  $m(t)$  e  $\tilde{m}(t)$  recuperado (**Fig. 3.3**). Compare também os espectros de  $m(t)$  e  $\tilde{m}(t)$  (**Fig. 3.4**).

**A3a)** Analise os resultados e justifique a diferença entre  $m(t)$  e  $\tilde{m}(t)$ .

Forneça conclusões gerais do trabalho.



## Experimento 5: Modulação Angular

### Identificação

Turma	Matrícula	Nome

Tabela 1.1 – Parâmetros da modulação FM para  $m(t)$  **senoidal**

$f_m$ [Hz]	$m_p$ [V]	$\Delta f$ [kHz] <sup>3</sup>	$B_m$ [Hz] <sup>4</sup>	$\beta_f$	$B_{cars}$ [kHz]	$B_{98\%}$ [kHz]
10	0.25					
	1					
	5					
100	0.25					
	1					
	5					
1000	0.25					
	1					
	5					

Tabela 1.2 – Parâmetros da modulação FM para  $m(t)$  **triangular**

$f_m$ [Hz]	$m_p$ [V]	$\Delta f$ [kHz]	$B_m$ [Hz]	$\beta_f$	$B_{cars}$ [kHz]	$B_{98\%}$ [kHz]
10	0.25					
	1					
	5					
100	0.25					
	1					
	5					
1000	0.25					
	1					
	5					

Tabela 1.3 – Parâmetros da modulação FM para  $m(t)$  **quadrada**

$f_m$ [Hz]	$m_p$ [V]	$\Delta f$ [kHz]	$B_m$ [Hz]	$\beta_f$	$B_{cars}$ [kHz]	$B_{98\%}$ [kHz]
10	0.25					
	1					
	5					
100	0.25					
	1					
	5					
1000	0.25					
	1					
	5					

<sup>3</sup> Valor experimental

<sup>4</sup> Valor teórico