



# **Experimento 05**

## Laboratório de Princípios de Comunicação

<b>Autoria</b>	<b>Matrícula</b>
Pedro Henrique Dornelas Almeida	18/0108140

Engenharia de Redes de Comunicação  
Universidade de Brasília

29 de março de 2021

Versão do GNU Radio Companion: 3.8.1.0 (Python 3.8.5).

## 1 Introdução

Neste experimento o objetivo é explorar os conceitos de modulação em frequência(FM), modulação em fase(PM) e demodulação FM. Para isso iremos construir alguns circuitos que podem explorar esses conceitos, utilizando sempre da argumentação proporcionada pelo espectro de frequência que permitam modular os sinais a partir de mixers e filtros.

## 2 Desenvolvimento

### Calculos Teóricos

#### T1a)

Aqui devemos encontrar a sensibilidade  $k_f$  do modulador em Hz/V, para isso, basta fazermos:

$$\Delta f = k_f \cdot \max|m(t)|$$
$$k_f = \frac{75k}{7,5} = 10kHz/V$$

#### T1b)

Aqui devemos encontrar o  $f_{min}$  e  $f_{max}$  da frequência instantânea, para isso, faremos:

$$f_{min} = f_c + k_f \min|m(t)| = 96,3M - 10k \cdot 7,5 = 96,225MHz$$
$$f_{max} = f_c + k_f \max|m(t)| = 96,3M + 10k \cdot 7,5 = 96,375MHz$$

#### T1c)

Aqui faremos uma estimativa da largura de banda do sinal FM usando o método de *Carson*, assim:

$$B_{Carson} = 2(\Delta f + B_m) = 2(75k + 8k) = 166kHz$$

Após, devemos calcular as frequências extremas dessa banda, fazendo:

$$f_{inferior} = 96,3M - \frac{166k}{2} = 96,3M - 0,083M = 96,217MHz$$
$$f_{superior} = 96,3M + \frac{166k}{2} = 96,3M + 0,083M = 96,383MHz$$

T2a)

## AR 01

O objetivo aqui é construir um modulador em frequência, faremos isso utilizando de um VCO, assim como usado no experimento 4, para implementar um modulador em frequência, e assim, teremos a área de trabalho como a figura abaixo:

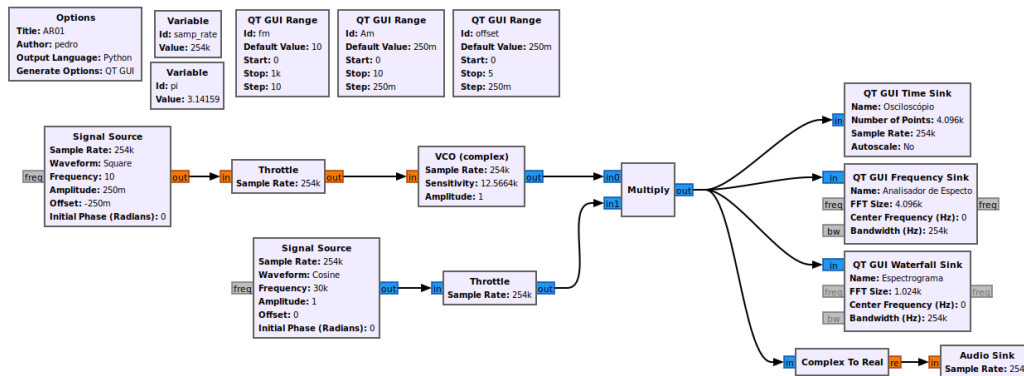


Fig. 1.1

Então passamos a testar o circuito, para isso, agora apresentaremos os gráficos no tempo e na frequência para os sinais modulante e modulado. Também apresentaremos o espectrograma do sinal modulado.

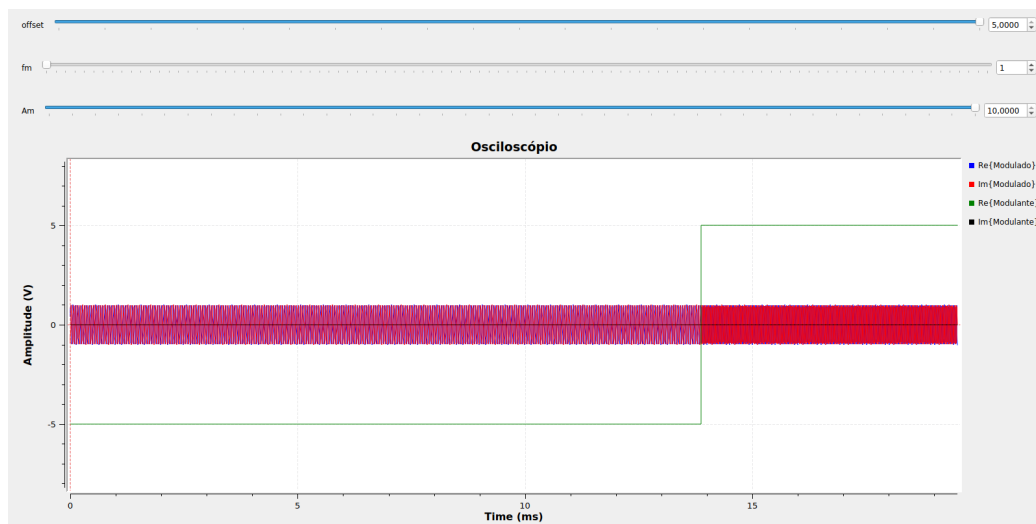


Fig. 1.2 - Osciloscópio

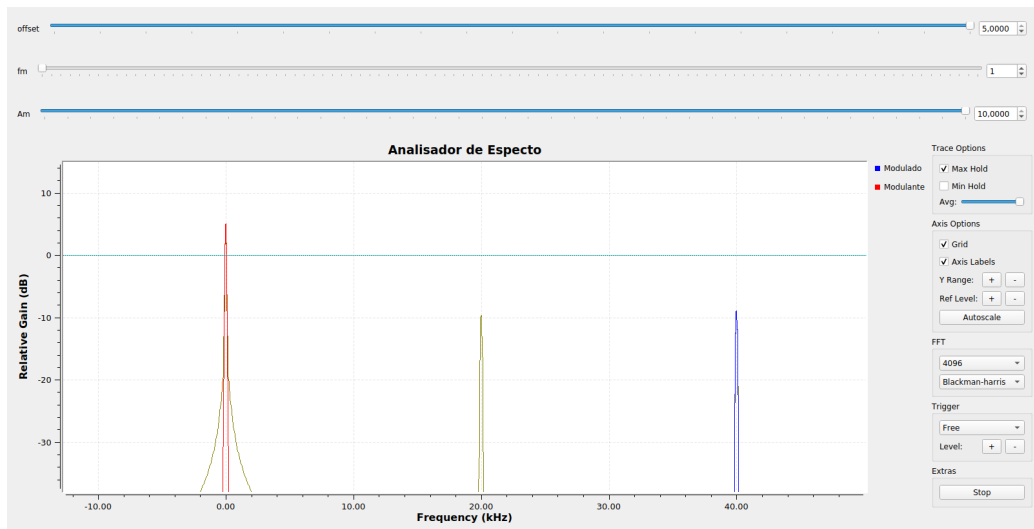


Fig. 1.3 - Analizador do Espectro

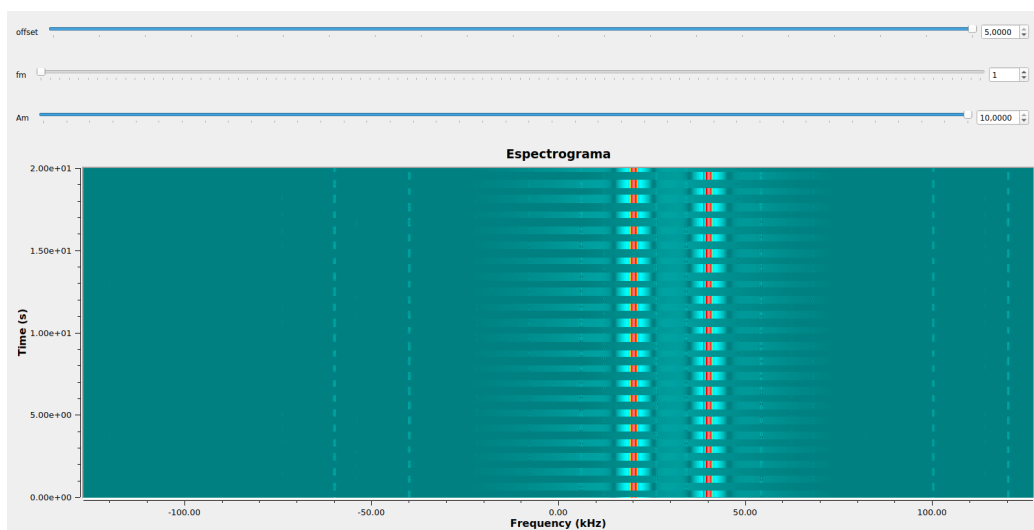


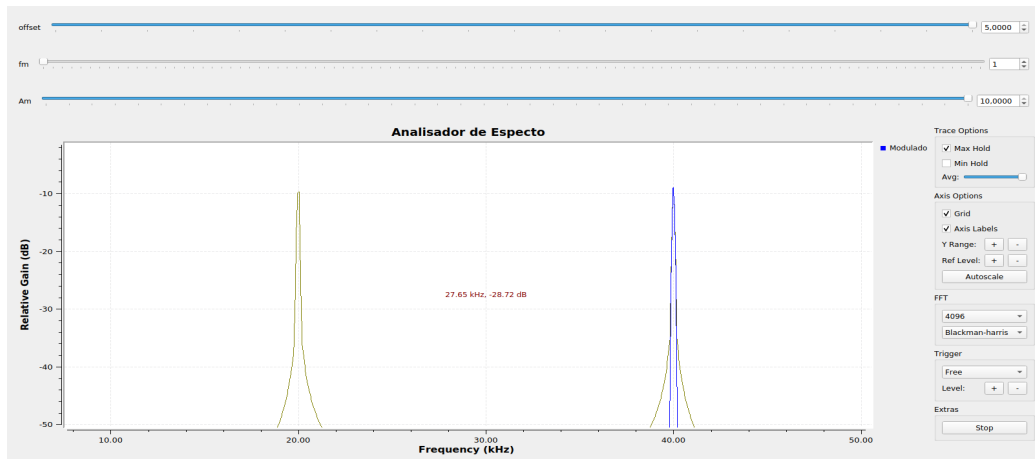
Fig. 1.4 - Espectrograma

Note que na figura 1.2 há uma alteração na cor a partir do momento que a onda quadrada altera sua amplitude, isto é justamente o que esperamos de uma modulação em frequência, fato que justifica a alteração de cor, passando a uma cor mais forte, o que indica que a frequência está maior. O que pode ser visto no espectro de frequência pelo "Max Hold" (Fig. 1.3) e no espectrograma (Fig. 1.4).

Passamos então para fazer algumas medições necessárias ao entendimento do experimento.

### E1a)

Aqui devemos medir o valor do desvio de frequência( $\Delta f$ ). Para obter esse valor, habilitamos o "Max Hold" para conseguir observar melhor em quais frequências o sinal se encontra. Então observamos no gráfico abaixo que a frequência máxima é de 40kHz e utilizando das fórmulas disponibilizadas no roteiro vemos que  $\Delta f = 10kHz$ .



E1a

### E1b)

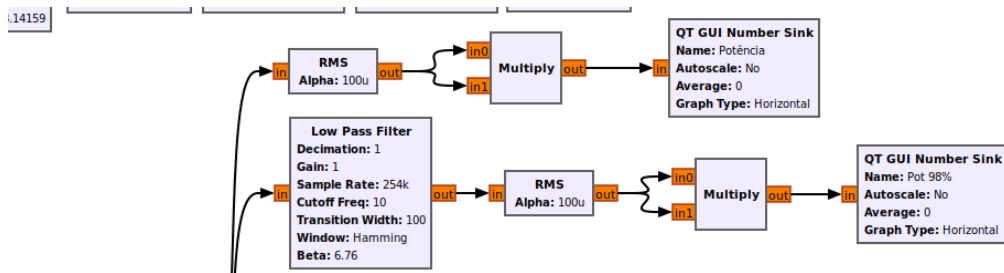
Com o valor de  $\Delta f$  podemos determinar experimentalmente a sensibilidade  $k_f$ , fazendo:

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

$$10000 = k_f \cdot 5$$

$$k_f = 2000 Hz/V^2$$

Agora podemos preencher as tabelas 1.1, 1.2 e 1.3 utilizando do  $k_f$  encontrado para a determinação do desvio de frequência. Para encontrar o  $B_{98\%}$  o sistema abaixo foi montado:



$B_{98\%}$

Em que calculamos a potência e através do filtro passa-baixas encontramos qual a frequência de corte que representa 98% da potência do sinal.

A1a)

AR 02 a

Aqui o objetivo é modular um sinal em fase(PM), iremos utilizar de um diferenciador para isso, junto ao circuito usado na atividade anterior para gerar este modulado, então o esquema montado ficou como a figura abaixo:

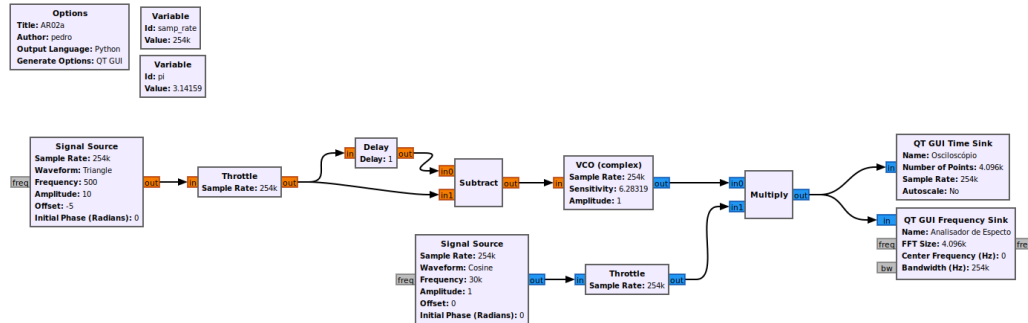


Fig. 2.1 - Área de Trabalho

Após configurar a área de trabalho, podemos observar o sinal modulante e o sinal modulado, e no domínio do tempo eles ficam:

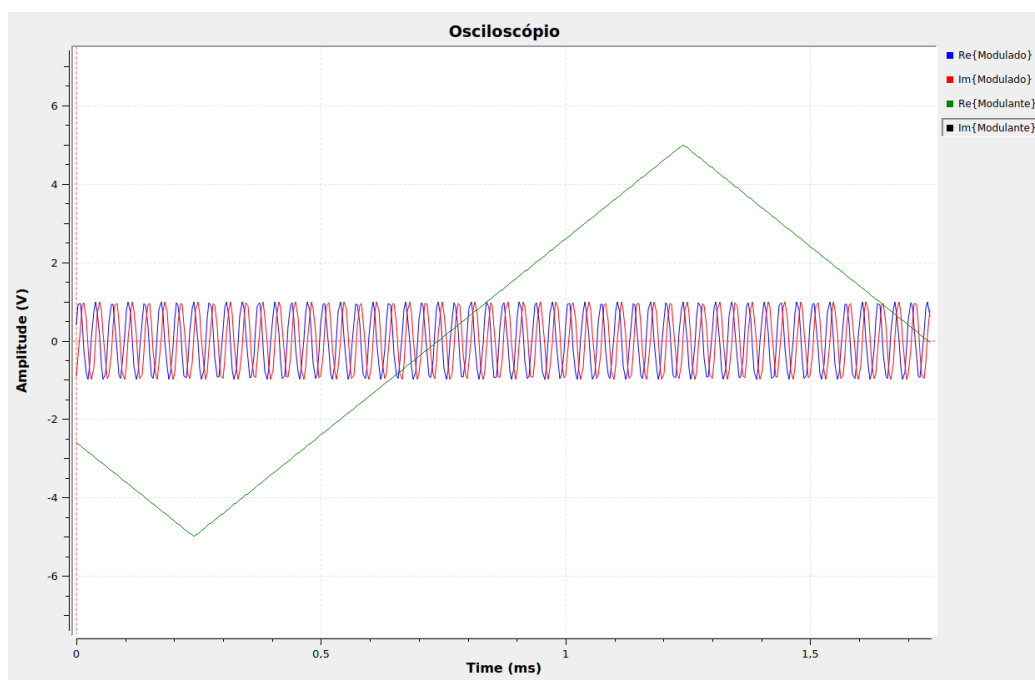


Fig. 2.2 - Osciloscópio

E no domínio da frequência é possível observar:

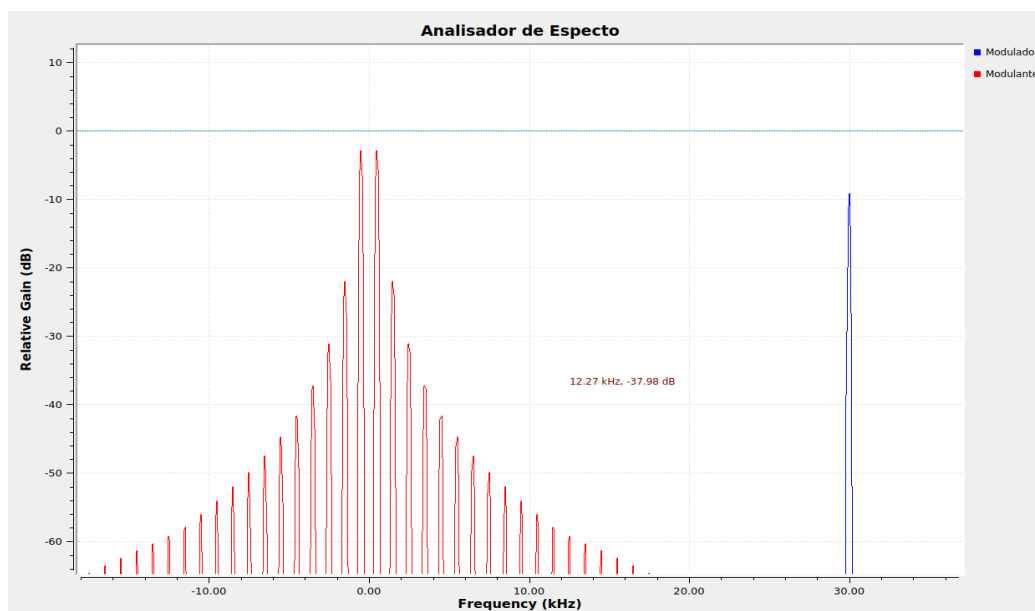


Fig. 2.3 - Analisador de Espectro

Note que aqui não é possível ver claramente no tempo e na frequência

a relação entre o sinal modulado e modulante, pois como a alteração é em fase, somente provoca um deslocamento das senóides no eixo horizontal, o que realmente é mais difícil de ser notado em software.

## AR 02 b

O objetivo desta parte do experimento é modular um sinal em fase, porém utilizando de uma técnica de chaveamento, em que geralmente é usada para a modulação de sinais digitais, em que a fase é alterada apenas em  $\pi/2$ , esta técnica de modulação é chamada de PSK(Phase Shift Keying). Para gerar este sinal foi usado o seguinte esquema:

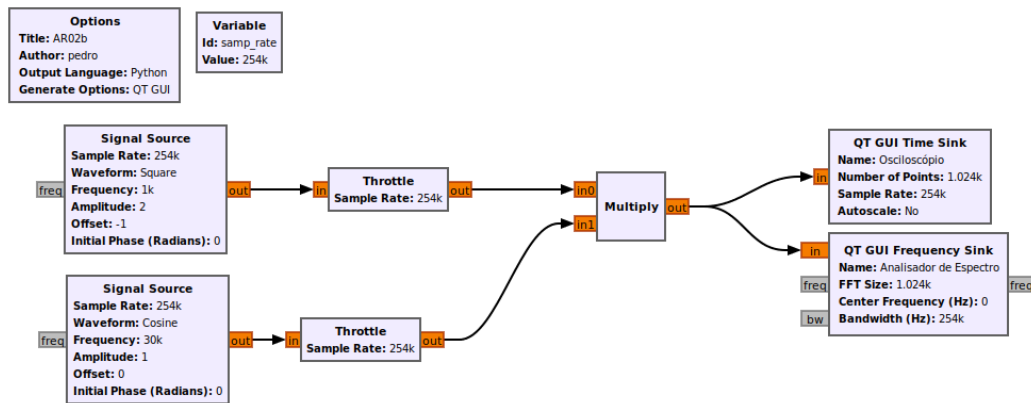


Fig. 2.4 - Área de Trabalho

Note que o esquema de modulação utilizado foi AM-DSB-SC.

E para a visualização no domínio do tempo, pôde ser observado os sinais modulado e modulante:



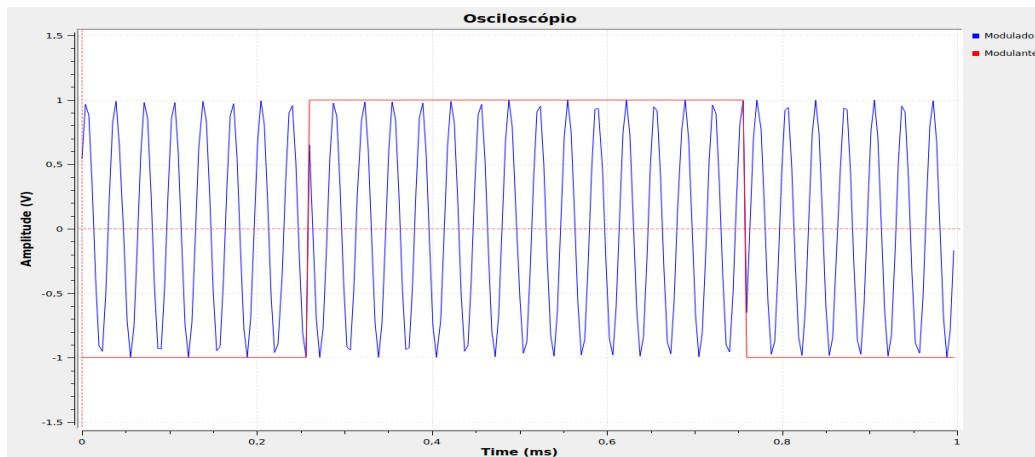


Fig. 2.5 - Osciloscópio

No domínio da frequência pôde ser observado:

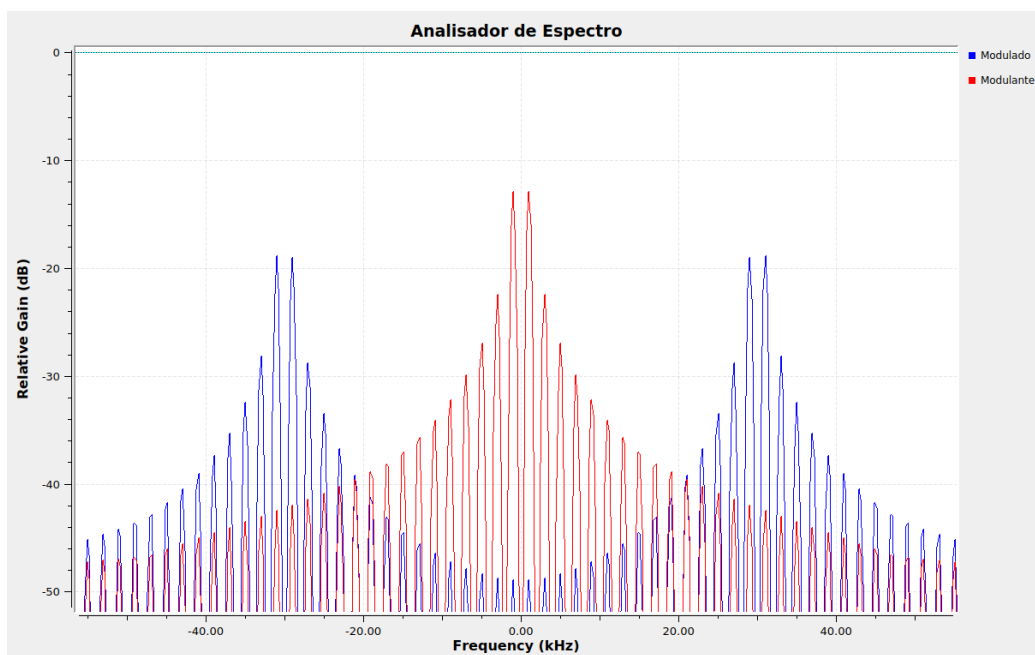


Fig. 2.6 - Analizador de Espectro

Note aqui que na figura 2.5 que é possível ver quando há uma alteração de fase nas senóides, provocadas pela alteração do sinal modulante, assim, é possível ver um pico menor, do sinal modulado, o que indica que ele trocou sua fase, e ainda podemos dizer que para sinais analógicos esta alteração está cravada em  $\pi/2$ , o que gera claramente uma alteração de fase, fazendo uma

AR 03

The image shows a GNU Radio Companion (GRC) interface for a software-defined radio (SDR) system. The system is divided into two main sections: 'Modulador' (Modulator) and 'Demodulador' (Demodulator).

**Options Panel:**

- File: FSK
- Author: jairo
- Output Language: Python
- Generate Options: QT GUI

**Variable Panel:**

- Variable: fs
- Value: 2.1433

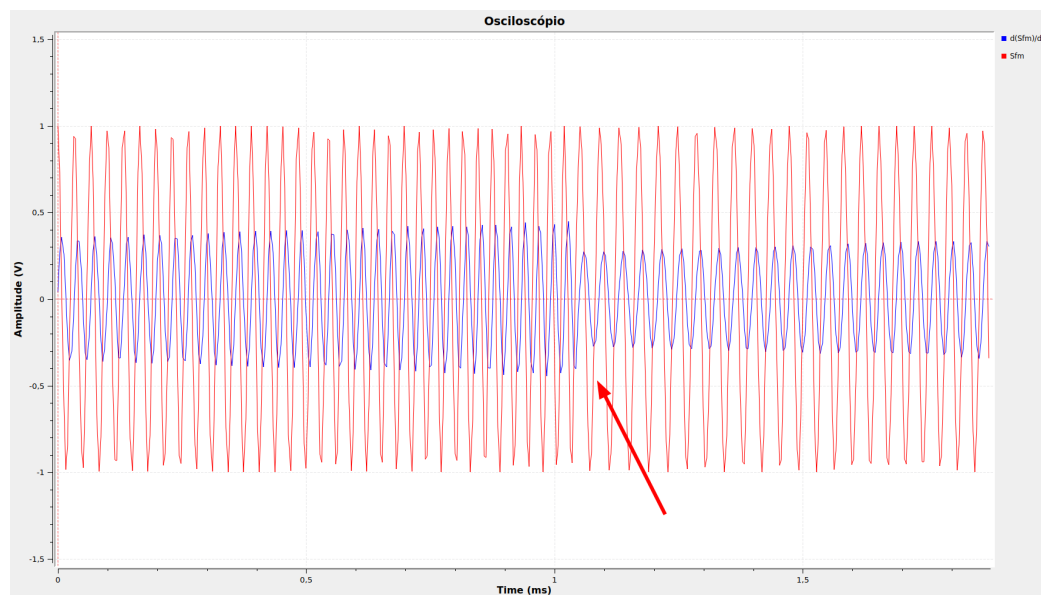
**Modulador (Modulator) Section:**

- Signal Source:** Sample Rate: 25k, Waveform: sine, Frequency: 500, Amplitude: 1.0, Initial Phase (Radians): 0.0.
- Threshold:** Sample Rate: 25k.
- VCO (complex):** Sample Rate: 25k, Frequency: 500, Amplitude: 1.0.
- Multiply:** Block connecting the output of the Threshold block to the output of the VCO block.

**Demodulador (Demodulator) Section:**

- Decimating FIR Filter:** Decimation: 1, Taps: 128,401, ..., 128,401.
- Complex to Real:** Block converting the complex output of the filter to a real signal.
- Abs:** Block calculating the absolute value of the real signal.
- Low Pass Filter:** Decimation: 1, Sample Rate: 25k, Cut Off Freq.: 1000, Transition Width: 100, Window: hamming, Beta: 0.75.
- DC Blocker:** Sample Rate: 25k, Long Period: True.
- QT GUI Time Sink:** Name: Analisador de Pico, Number of Points: 1,024,000, Sample Rate: 25k, Autoscale: On.
- QT GUI Frequency Sink:** Name: Analisador de Espectro, FFT Size: 1,024, Center Frequency: 10k, Resolutions: 100,000.

E como pode-se ver está identificado a parte que diz respeito a modulação do sinal enquanto na outra a parte que diz respeito a demodulação do sinal. O próximo passo foi comparar os sinais, o sinal modulado ( $S_{FM}(t)$ ) e após fazer a diferenciação para a demodulação ( $\frac{dS_{FM}(t)}{dt}$ ), e podemos ver:



10

Note que a partir do momento em que o sinal modulado varia a sua frequência, a derivada vai alterando seu valor em amplitude, fazendo o processo de transformar uma variação em frequência em uma variação de amplitude, por isso, o próximo passo do demodulador deve então recuperar a envoltória desse sinal diferencial.

O próximo ponto de análise então é justamente este, e comparar os sinais  $\tilde{m}(t)$  e  $m(t)$ . Para isto, foi necessário ajustar uma frequência de corte no filtro passa-baixas, aqui usamos 5kHz, e também foi necessário dar um ganho de 83 neste filtro para que a amplitude ficasse parecida com o sinal mensagem e fosse possível compará-los. Assim, temos os sinais:

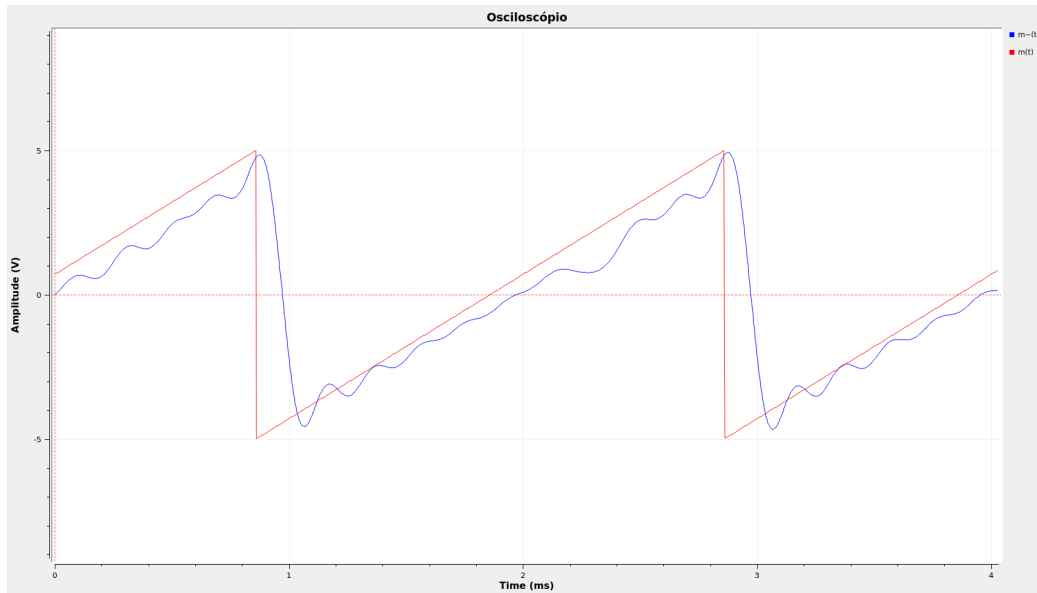


Fig. 3.3 -  $\tilde{m}(t)$  e  $m(t)$

Também temos seus respectivos espectros de frequência:

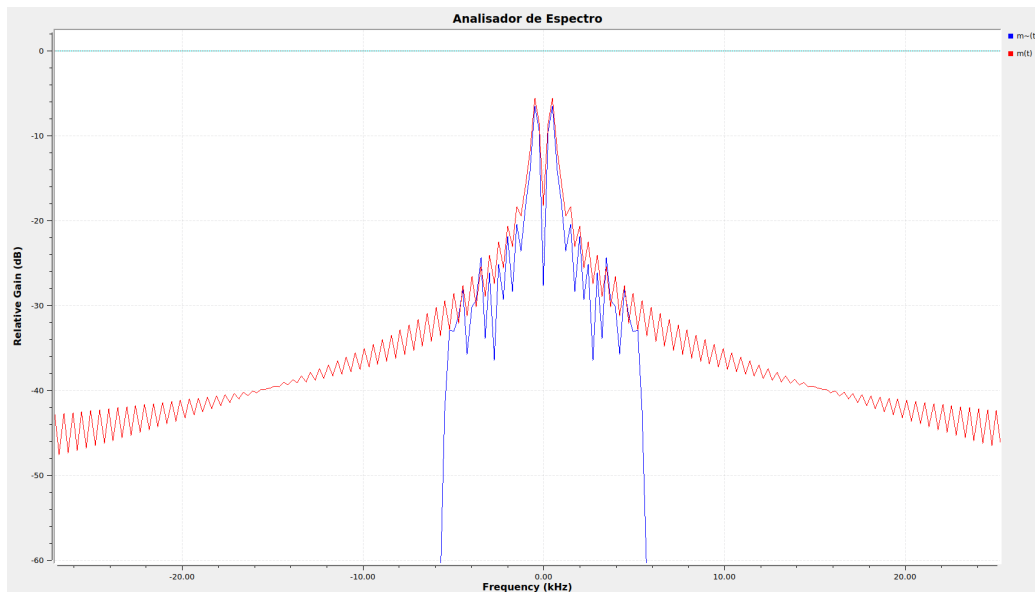


Fig. 3.4 - Espectro de Frequência

E aqui cabe a análise:

### A3a)

Os sinais  $\tilde{m}(t)$  e  $m(t)$  são diferentes pela composição destes, pois a onda dente de serra, sinal mensagem é um sinal com infinitas componentes de frequência, enquanto para obter o sinal  $\tilde{m}(t)$  foi necessário passar por um passa-baixas para filtrar frequências da portadora, então, os sinais se diferenciam pois  $\tilde{m}(t)$  não tem todas as componentes de frequência que  $m(t)$  tem.

## Tabelas

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

$f_m[Hz]$	$m_p[V]$	$\Delta f[kHz]^3$	$B_m[Hz]^4$	$\beta_f$	$B_{Cars}[kHz]$	$B_{98\%}[kHz]$
10	0,25	0,5				0,01
10	1	2				0,01
10	5	10				0,01
100	0,25	0,5				0,16
100	1	2				0,165
100	5	10				0,165
1000	0,25	0,5				1,065
1000	1	2				1,065
1000	5	10				1,065

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	0,5				0,01
10	1	2				0,1
10	5	10				0,1
100	0,25	0,5				0,305
100	1	2				0,305
100	5	10				0,305
1000	0,25	0,5				1,070
1000	1	2				1,070
1000	5	10				1,070

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	0,5				0,3
10	1	2				0,3
10	5	10				0,3
100	0,25	0,5				2
100	1	2				2,150
100	5	10				2,150
1000	0,25	0,5				19,030
1000	1	2				19,1
1000	5	10				20

### 3 Conclusão

Aqui concluímos que os conceitos de modulação em frequência(FM) e em fase(PM) puderam ser explorados e estudados, sabendo agora lidar com sistemas que introduzem este tipo de modulação em sinais. Também foi necessário explorar conceitos de diferenciação para demodular um sinal FM e por meio da variação em amplitude provocada pela variação em frequência que este diferenciador capta foi possível recuperar a envoltória do sinal e capturar uma versão do sinal mensagem na saída. Então assim foi possível observar e visualizar os efeitos dessas técnicas de modulação.