



## EXPERIMENTO 3: MODULAÇÃO EM AMPLITUDE

*Gustavo Fraidenraich, Levy Boccato, Max Henrique Machado Costa, Michel Daoud Yacoub*

*2º Semestre de 2018*

### Parte Teórica

#### 1 Introdução

Modulação é definida como a alteração sistemática de uma forma de onda, chamada portadora ou sinal modulado, de acordo com as características de outra forma de onda, chamada de sinal modulante ou mensagem. O objetivo fundamental da modulação é produzir uma onda modulada, portadora de informação, cujas propriedades sejam mais adequadas para a transmissão da informação através de um canal de comunicações. Os tipos mais comuns de modulação são mostrados na fig. 1

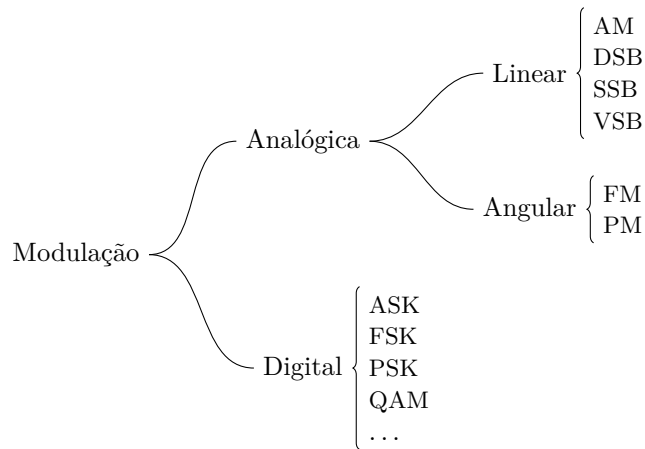


Figura 1: Tipos mais comuns de modulação.

A transmissão de informação utilizando-se de modulação possui várias vantagens, tais como: (i) mais fácil radiação do sinal de informação que se deseja transmitir; (ii) maior número de sinais que podem ser transmitidos simultaneamente através de um mesmo meio de transmissão; (iii) recepção destes sinais sem que haja interferência entre eles; (iv) redução de interferências, entre outras. Dentre os vários tipos de modulações analógicas empregadas na prática, o esquema AM (*amplitude modulation*) ainda é uma das mais utilizadas e difundidas. A modulação em amplitude consiste em se transmitir a informação através da variação da amplitude de uma onda portadora. Assim, o sinal de informação (onda modulante) tem seu espectro de frequência deslocado para uma região em torno da frequência da portadora. Pode-se, então, concluir que a frequência da portadora deve ser bem maior que a variação máxima de frequência do sinal de informação para que não haja sobreposição de espectros.

## 2 Processo AM

Em AM, a envoltória da portadora modulada possui o mesmo formato do sinal de informação. A expressão geral de uma onda modulada em amplitude é dada por

$$x_c(t) = A_c[1 + mx(t)] \cos(\omega_c t) = A(t) \cos(\omega_c t) \quad (1)$$

em que  $A_c \cos(\omega_c t)$  é a portadora não-modulada,  $\omega_c = 2\pi f_c$  é a frequência angular da portadora,  $A_c$  é uma constante,  $x(t)$  é o sinal modulante (informação) e  $m$  é uma constante denominada índice de modulação.

Observe que  $x_c(t)$  é uma cossenoide cuja amplitude  $A(t) = A_c[1 + mx(t)]$  varia linearmente com o sinal  $x(t)$ . Para efeito de análise, vamos considerar que a máxima variação de amplitude do sinal  $x(t)$  seja igual à unidade, isto é,  $|x(t)| \leq 1$ . A fig. 2 mostra o diagrama básico de um modulador AM, a forma de onda do sinal de informação  $x(t)$  e a onda modulada  $x_c(t)$ . Note que a onda modulada  $x_c(t)$  é obtida pela multiplicação direta da portadora por  $E + x(t)$ . Deve-se fazer com que a constante  $E$  seja sempre maior ou igual à máxima variação de amplitude do sinal modulante. Neste caso particular,  $E \geq 1$ .

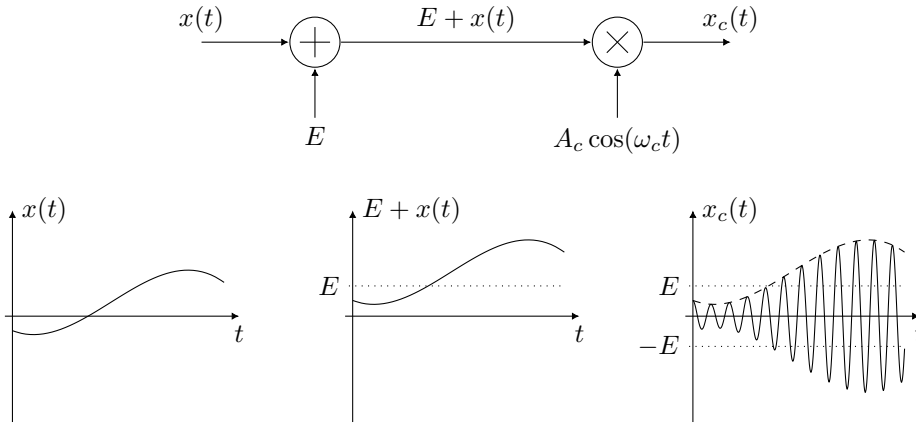


Figura 2: Diagrama básico de um modulador AM.

A multiplicação mostrada na fig. 2 é realizada, na prática, através da utilização de elementos não-lineares, tais como chaves, dispositivos de lei quadrática e multiplicadores analógicos.

### 2.1 Modulador AM por Chaveamento

O esquema básico do modulador AM por chaveamento é mostrado na fig. 3. O chaveamento é essencialmente uma operação não-linear que gera componentes espúrias de frequência adicionais àquelas do sinal de entrada. A chave S abre e fecha com frequência  $f_c$ , a frequência da portadora. Quando a chave S está fechada,  $x_s(t) = 0$ , enquanto que, quando S está aberta,  $x_s(t)$  acompanha a variação do sinal de entrada  $E + x(t)$ , a menos de uma queda de tensão provocada pelo resistor  $R$ . A presença do resistor  $R$  no circuito impede que se dê um curto na fonte quando S encontra-se fechada. Para efeito de análise, assumimos que a impedância de entrada do filtro passa-faixa é muito maior que o valor de  $R$ . Podemos, então, considerar que a queda tensão sobre o resistor seja desprezível.

A fig. 4 mostra como o sinal  $x_s(t)$  é obtido a partir do chaveamento do sinal  $E + x(t)$ . O sinal  $x_s(t)$  pode ser visualizado como a multiplicação do sinal  $E + x(t)$  por uma onda  $s(t)$ , que representa a função desempenhada pela chave S. A função  $s(t)$  assume o valor 1 se a chave está

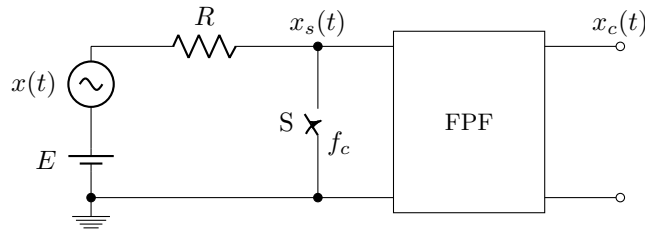


Figura 3: Modulador por chaveamento.

aberta e 0 se a chave está fechada. Assim,  $x_s(t)$  é dado por

$$x_s(t) = [E + x(t)]s(t) \quad (2)$$

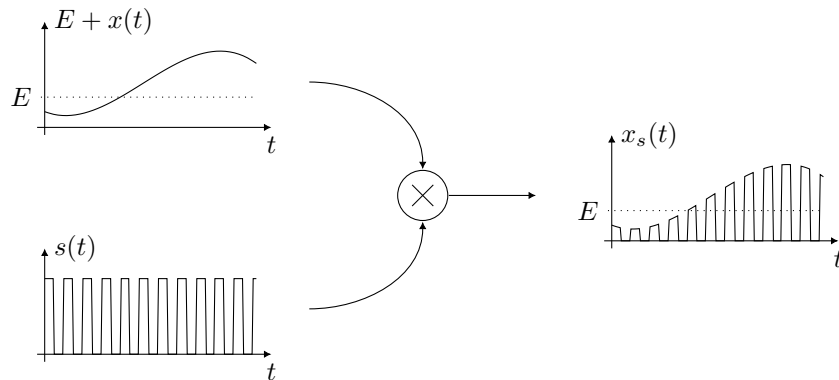


Figura 4: Sinal  $x_s(t)$  obtido a partir da multiplicação de  $[E + x(t)]$  por  $s(t)$ .

Como  $s(t)$  é periódica, ela pode ser desenvolvida em série de Fourier, onde a simetria escolhida é par:

$$s(t) = \frac{1}{2} + \frac{2}{\pi} \cos(\omega_c t) - \frac{2}{3\pi} \cos(3\omega_c t) + \frac{2}{5\pi} \cos(5\omega_c t) - \dots \quad (3)$$

Substituindo (3) em (2), temos

$$x_s(t) = \frac{1}{2}[E + x(t)] + \frac{2}{\pi}[E + x(t)] \cos(\omega_c t) - \frac{2}{3\pi}[E + x(t)] \cos(3\omega_c t) + \dots \quad (4)$$

cujo espectro é mostrado na fig. 5. Se utilizarmos um filtro passa-faixa centrado na frequência de portadora  $f_c$  e largura de faixa conveniente, obtemos o sinal modulado AM. Note que na saída do filtro passa-faixa, as componentes situadas fora da faixa do filtro são suprimidas. Assim, o sinal resultante na saída do filtro é dado por

$$x_c(t) = \frac{2}{\pi}[E + x(t)] \cos(\omega_c t) = A_c[1 + mx'(t)] \cos(\omega_c t) \quad (5)$$

com  $A_c = \frac{2E}{\pi}$ ,  $m = \frac{\max|x(t)|}{E}$  e  $x'(t) = \frac{x(t)}{\max|x(t)|}$ .

## 2.2 Índice de Modulação de Onda AM

O índice de modulação  $m$  de uma onda AM é definido como

$$m = \frac{\Delta A}{A} \quad (6)$$

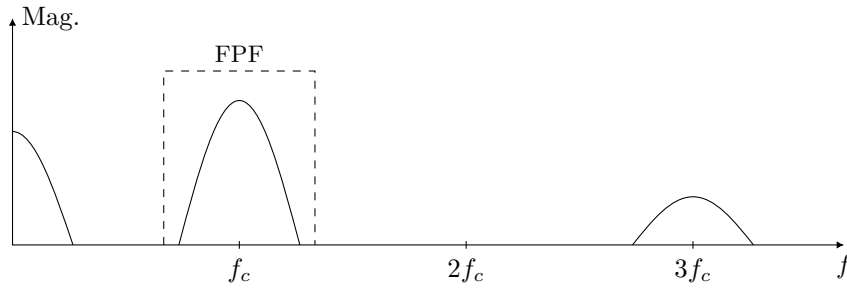


Figura 5: Espectros do sinal  $x_s(t)$  (linha contínua) e filtro passa-faixa (tracejado).

onde  $\Delta A$  é a variação do sinal modulante em torno da amplitude da onda portadora e  $A_c$  é a amplitude da onda portadora sem modulação. Outra maneira de se obter o índice de modulação é

$$m = \frac{A_{\max} - A_{\min}}{A_{\max} + A_{\min}} \quad (7)$$

em que  $A_{\max}$  e  $A_{\min}$  são as amplitudes máxima e mínima da onda modulada, respectivamente.

### 2.3 Medida do Índice de Modulação para Modulação Tonal

Considere uma portadora modulada por um sinal senoidal  $x(t) = A_m \cos(\omega_m t)$ . Por simplicidade, seja  $A_m = 1$ . No analisador de espectro, o índice de modulação  $m$  é obtido medindo-se a amplitude de uma das raias laterais  $m \frac{A_c}{2}$  e a amplitude  $A_c$  da portadora, e fazendo-se a razão entre essas medidas. Note que a escala vertical do analisador de espectro deve estar selecionada na sua forma linear. A fig. 6 mostra o espectro em frequência da onda modulada

$$x_c(t) = A_c [1 + m \cos(\omega_m t)] \cos(\omega_c t) \quad (8)$$

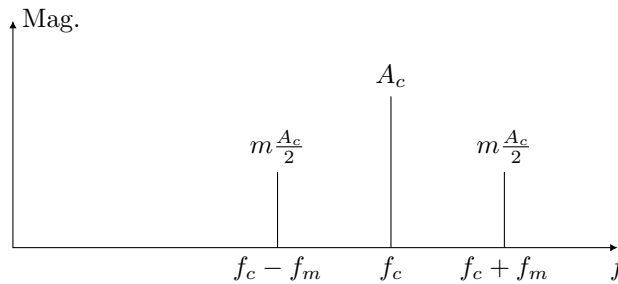


Figura 6: Espectro de Frequência de uma Modulação Tonal.

No osciloscópio, o índice de modulação  $m$  é obtido medindo-se as variações máxima e mínima de amplitude da onda portadora e utilizando-se (7).

## Parte Prática

### 1 Portadora Senoidal

Ajuste o gerador de funções Agilent 33220A para que em sua saída haja uma onda senoidal (portadora) com amplitude  $A_c = 1 \text{ V}_{\text{pp}}$  e frequência  $f_c = 1 \text{ MHz}$ . Ajuste em seguida o sinal modulante (informação) para uma onda senoidal de frequência  $f_m = 20 \text{ kHz}$  e índice de modulação arbitrário. Use a própria modulação interna do gerador.

- Visualize esta onda modulada no osciloscópio e meça o índice de modulação. Varie o índice de modulação de 0% a 120% e observe o que acontece.
- Visualize a onda modulada no analisador de espectro e meça o índice de modulação. Varie o índice de modulação de 0% a 120% e observe o que acontece.
- Mude a onda modulante para quadrada, triangular e rampa. Observe-as no osciloscópio e no analisador de espectro. Se necessário, reduza a frequência do sinal modulante para observar a forma de onda esperada (o gerador possui limitações à banda do sinal modulante).
- Mude a onda modulante para ruído. Obtenha o espectro do sinal modulado com ruído, em dBm. Idealmente, o ruído deveria ser plano para todo o espectro de frequências. Coloque a escala em dB, aumente o range, e verifique se isso realmente ocorre.

## 2 Portadora Não-Senoidal

Com a onda modulante senoidal em 20 kHz, ajuste a portadora para uma quadrada com 1 V<sub>pp</sub> e frequência  $f_c = 1$  MHz.

- Veja o que acontece no osciloscópio e no analisador de espectro. Expanda o range do analisador para 10 MHz.
- Sintonize as frequências harmônicas da onda quadrada e use um SPAN adequado para visualizar as raias laterais.
- Comente os resultados obtidos.

Repita o procedimento com  $f_c = 200$  kHz e observe as diversas portadoras e suas raias laterais.

## 3 Implementação no Circuito

Utilize o modulador AM montado em placa (fig. 7) para verificar a onda modulada no osciloscópio e no analisador de espectro. (Atenção: não utilize o casador de 50 Ω.)

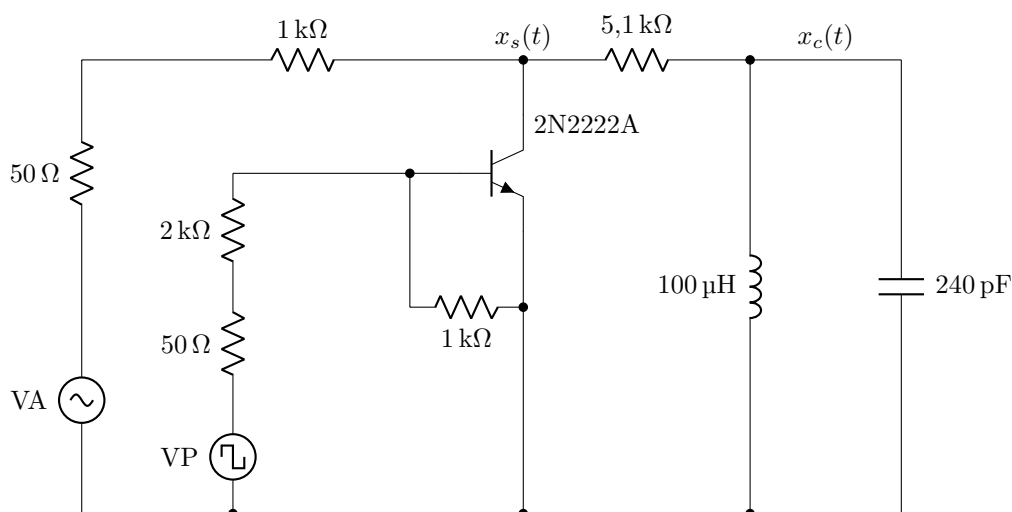


Figura 7: Modulador AM montado em placa. VA: sinal modulante com amplitude 1,8 V e *offset* de 2 V. VP: onda quadrada na frequência da portadora variando entre 0 e 2,5 V. Os resistores de 50 Ω representam impedâncias internas dos geradores.

- Use uma portadora quadrada de  $5V_{pp}$  e *offset* de  $2,5V$  e frequência a ser determinada experimentalmente, e uma modulante senoidal de  $5\text{ kHz}$ ,  $1V_{pp}$  e *offset* de  $1V$ . Determine a frequência da portadora, isto é, ajuste a frequência da portadora para obter o máximo sinal na saída do modulador (maior amplitude). Note que o filtro LC passa-faixa de saída tem uma frequência central de  $(2\pi\sqrt{LC})^{-1} \approx 1\text{ MHz}$ , que deveria ser a frequência da portadora.
- Ajuste uma nova frequência da portadora para que o modulador opere com a terceira harmônica (três vezes a fundamental), em vez de operar com a frequência fundamental obtida no item anterior.

## 4 Transmissão

Utilizando o gerador 33220A no modo Modulação Externa, ajuste uma portadora senoidal em  $1\text{ MHz}$  e índice de modulação igual a  $100\%$ . Com o gerador de funções 33120A injete um sinal modulante senoidal externo de  $2V_{pp}$ , com varredura de  $100\text{ Hz}$  a  $4\text{ kHz}$  e com duração (*sweep time*) de  $20\text{ s}$ , na entrada externa do gerador de funções 33220A.

- Trace o espectro deste sinal modulado. Comente os resultados obtidos.
- Conecte a saída do modulador em uma antena externa e ajuste a sua saída para potência máxima. (Atenção: nem osciloscópio, nem analisador de espectro devem estar conectados nesta saída). Utilize um rádio portátil comercial para sintonizar esta frequência. Mexa no índice de modulação e veja o que ocorre.
- Substitua a portadora senoidal por uma portadora quadrada de mesma frequência e sintonize o sinal no rádio comercial. Escolha outro valor para a frequência de portadora de forma que a sintonia seja feita em alguma de suas harmônicas.
- Retorne à portadora senoidal. Substitua o gerador de funções 33120A por alguma fonte de áudio (YouTube, celular).