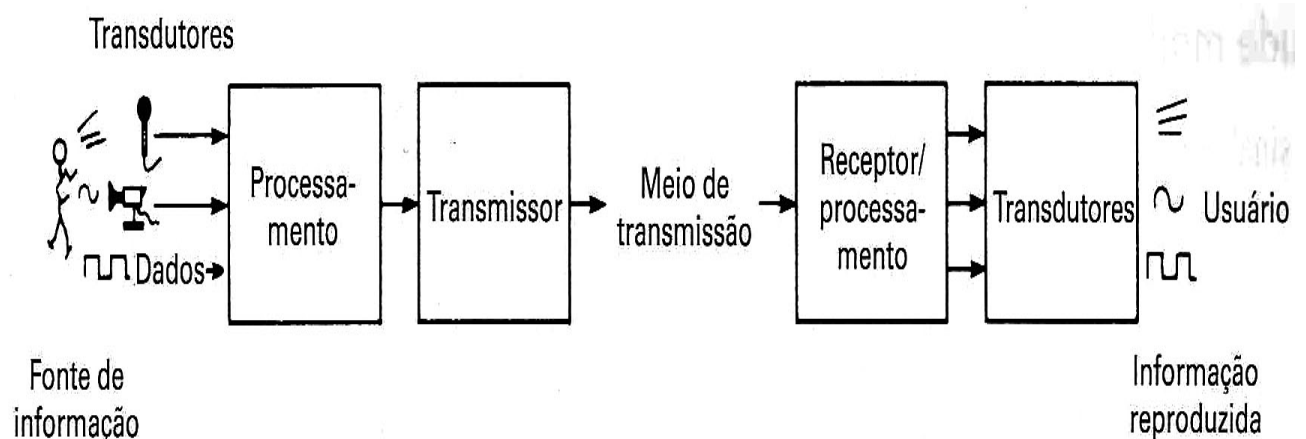




# Capítulo 5

## *Modulação e Sistemas de Amplitude Modulada*

### 5.1 Introdução

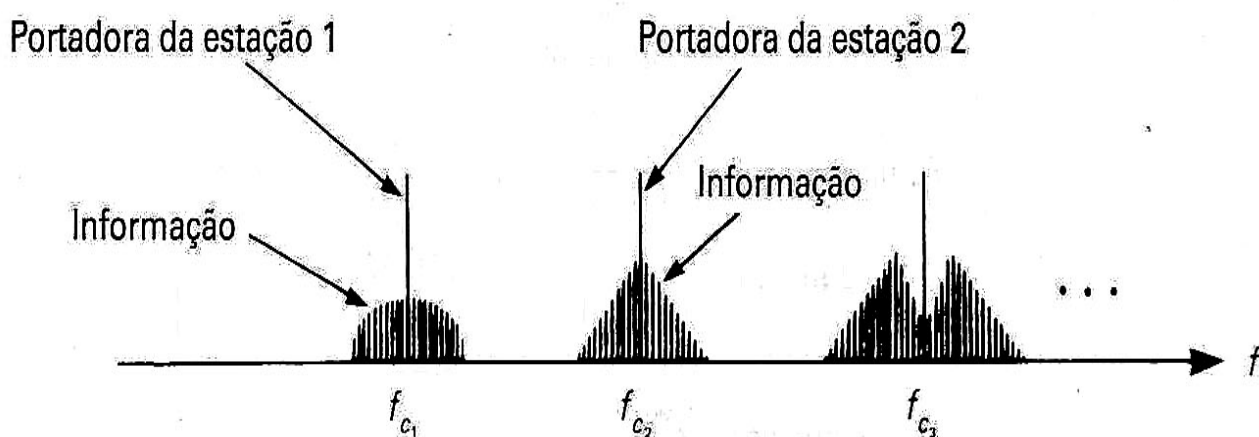


### 5.2 Transmissão de voz

- O espectro de áudio(som) é limitado em menos de 20kHz;
- A parte importante do espectro de som para fala diminui acima de 1kHz;
- A inteligibilidade é obtida com frequências de menos de 3,5kHz;
- Música de alta fidelidade se estende até 15kHz;

### 5.3 Multiplexagem de voz

- Suponha que 100 pessoas queiram transmitir uma mensagem de voz para você. Uma forma seria que cada pessoa tivesse transmitindo a voz em um determinado instante de tempo. Este tipo de transmissão é chamada de Multiplexagem por Divisão de Tempo(TDM).
- Suponha que está transmissão deva ser feita ao mesmo tempo. A solução é utilizar a frequência de uma portadora para cada pessoa. Esse sistema de transmissão é denominado Multiplexagem por Divisão de frequência(FDM).



### 5.4 Modulação

O processo de transferência da informação para uma portadora de alta frequência é chamado de **modulação**.

Considerando que a portadora deva ser uma onda cossenoidal do tipo:

$$e_C(t) = E_C \cos(2\pi \cdot f \cdot t + \theta) \quad (5.1)$$

- Quando o sinal da informação(mensagem) modifica a amplitude da portadora, produz-se a **Amplitude Modulada(AM)**

$$e(t) = E_C(t) \cos(2\pi \cdot f \cdot t + \theta) \quad (5.2)$$

- Quando o sinal da informação(mensagem) modifica a frequência da portadora, produz-se a **Modulação em Frequência(FM)**

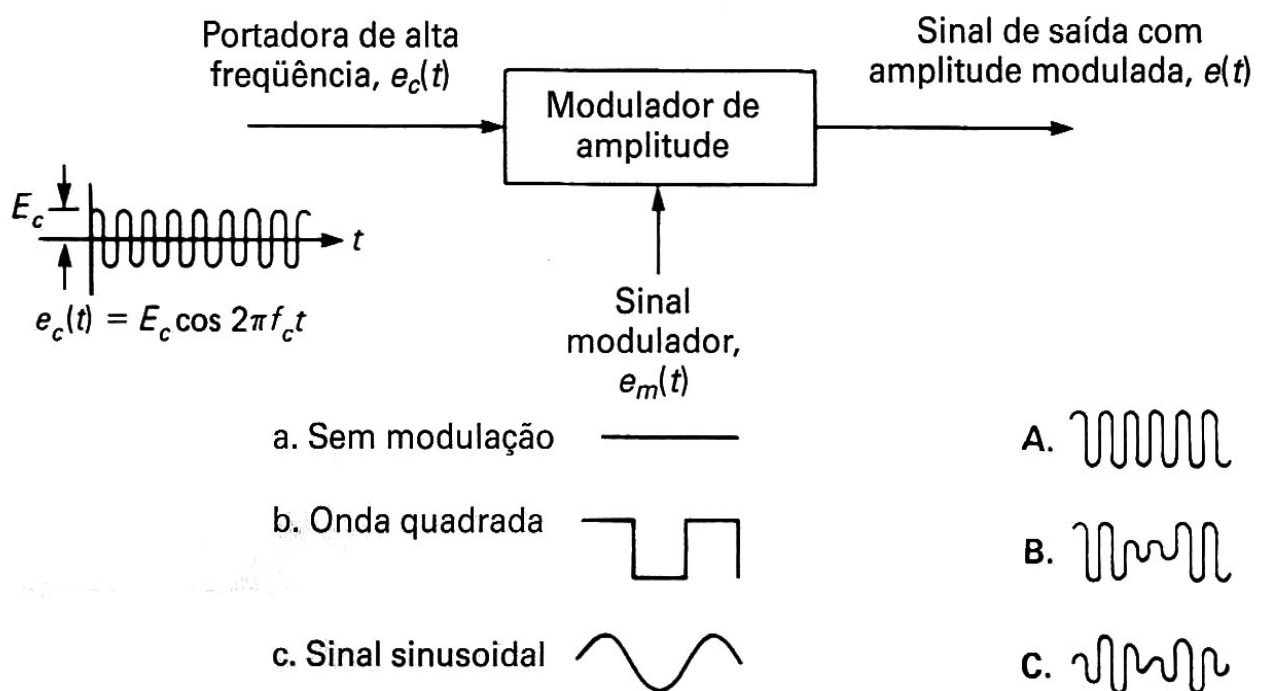
$$e(t) = E_C \cos(2\pi.f(t).t + \theta) \quad (5.3)$$

- Quando o sinal da informação(mensagem) modifica a fase da portadora, produz-se a **Modulação em Fase(PM)**

$$e(t) = E_C \cos(2\pi.f.t + \theta(t)) \quad (5.4)$$

### 5.4.1 Amplitude Modulada

A modulação AM é ilustrada na figura que segue



Sendo a portadora não modulada denotada por

$$e_C(t) = E_C \cos(2\pi.f.t) \quad (5.5)$$

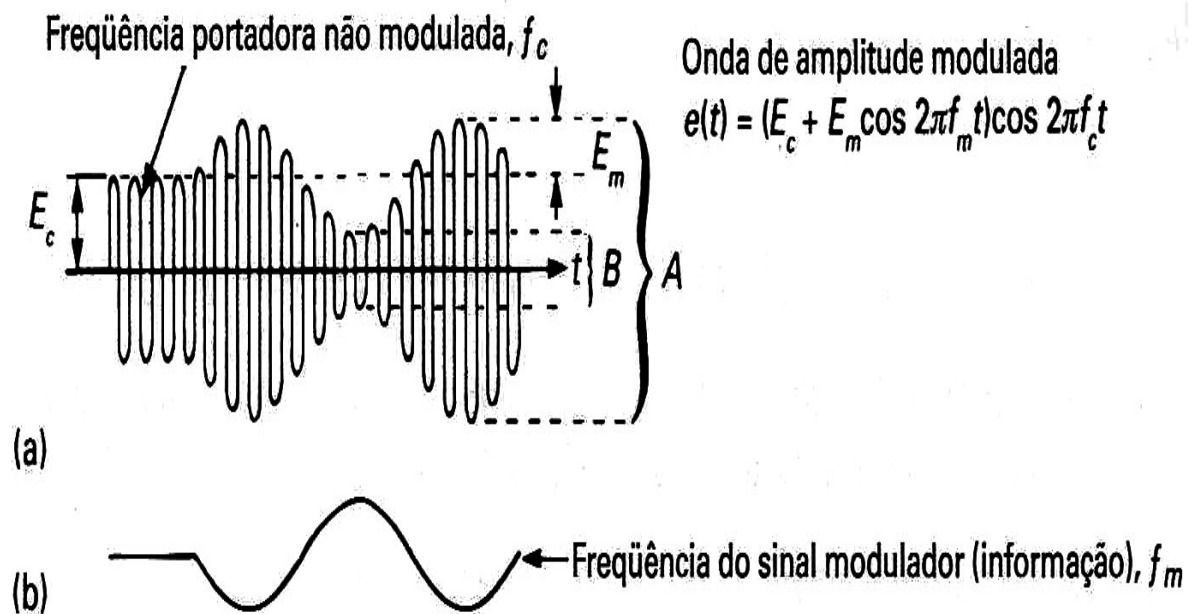
e supondo a mensagem a ser transmitida por

$$e_m(t) = E_m \cos(2\pi.f_m.t)$$

Conclui-se que o sinal de saída modulado é dado matematicamente por

$$e(t) = (E_C + E_m \cos(2\pi.f_m.t)) \cos(2\pi.f.t) \quad (5.6)$$

Graficamente o sinal modulado será



(a) Sinal de amplitude modulada. (b) Sinal de informação a ser transmitido por AM.

#### 5.4.2 Índice de Modulação

A equação ?? pode ser descrita por

$$e(t) = E_C(1 + m_a \cos(2\pi f_m t)) \cos(2\pi \cdot f \cdot t)$$

onde

$$m_a = \frac{E_m}{E_C}$$

Observando o gráfico anterior o índice de modulação pode ser calculado da seguinte forma

$$m_a = \frac{E_m}{E_C} = \frac{A - B}{A + B}$$

### Exemplo 1

Se  $A = 100\text{ V}$  e  $B = 20\text{ V}$ , determine a porcentagem de modulação, o pico de tensão da portadora e o valor de pico da tensão de informação.

**Solução:**

$$1. \quad m_a = \frac{100\text{ V} - 20\text{ V}}{100\text{ V} + 20\text{ V}} = 0,667, \text{ que é expresso na forma de } 66,7\% \text{ AM.}$$

2. A média das duas medições pico a pico é a amplitude pico a pico da portadora não modulada  $2E_c$ . Sendo assim, o pico de tensão da portadora pode ser calculado para medições de  $A$  e  $B$  como segue:

$$2E_c = \frac{100\text{ V} + 20\text{ V}}{2} = 60\text{ Vpp}, \quad \text{e} \quad E_c = 30\text{ Vp}$$

$$3. \quad E_m = m_a E_c = 0,667 \times 30\text{ Vp} = 20\text{ Vp}$$

Se mais de um sinal sinusoidal, como um acorde musical (ou seja, uma tríade, três tons) modular a portadora, temos o índice AM resultante calculando a média RMS dos índices que cada onda senoidal produziria. Dessa forma, em geral,

$$m_a = \sqrt{m_1^2 + m_2^2 + m_3^2 + \dots + m_n^2}$$

## 5.5 Espectro e Banda passante de um sinal AM

Desenvolvendo matematicamente a expressão do sinal AM

$$\begin{aligned} e(t) &= (E_c + E_m \cos 2\pi f_m t) \cos 2\pi f_c t \\ &= E_c \cos 2\pi f_c t + E_m \cos 2\pi f_m t \cos 2\pi f_c t \end{aligned}$$

O segundo termo dessa expressão pode ser expandido pela identidade trigonométrica

$$\cos A \cos B = \frac{1}{2}[\cos(A - B) + \cos(A + B)]$$

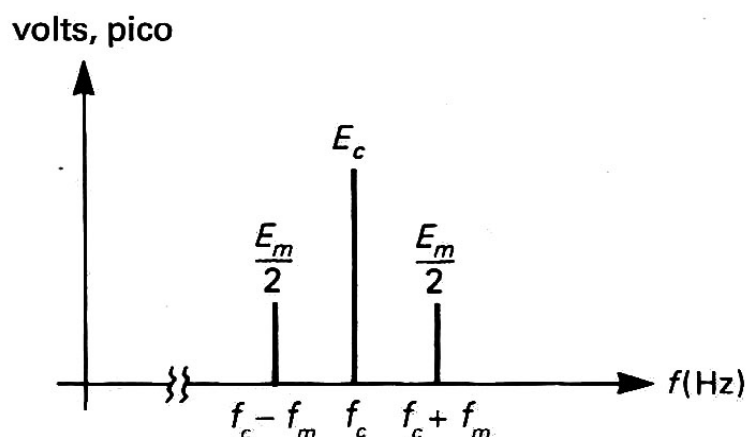
de modo que

$$e(t) = E_c \cos 2\pi f_c t + \frac{1}{2}E_m \cos 2\pi(f_c - f_m)t + \frac{1}{2}E_m \cos 2\pi(f_c + f_m)t$$

Logo, o sinal AM é formado pela soma de três sinais de alta frequência

$$\begin{aligned} e(t) = E_c \cos 2\pi f_c t & \quad \text{portadora} \\ + \frac{E_m}{2} \cos 2\pi(f_c - f_m)t & \quad \text{banda lateral inferior, LSB} \\ + \frac{E_m}{2} \cos 2\pi(f_c + f_m)t & \quad \text{banda lateral superior, USB} \end{aligned}$$

E o espectro é

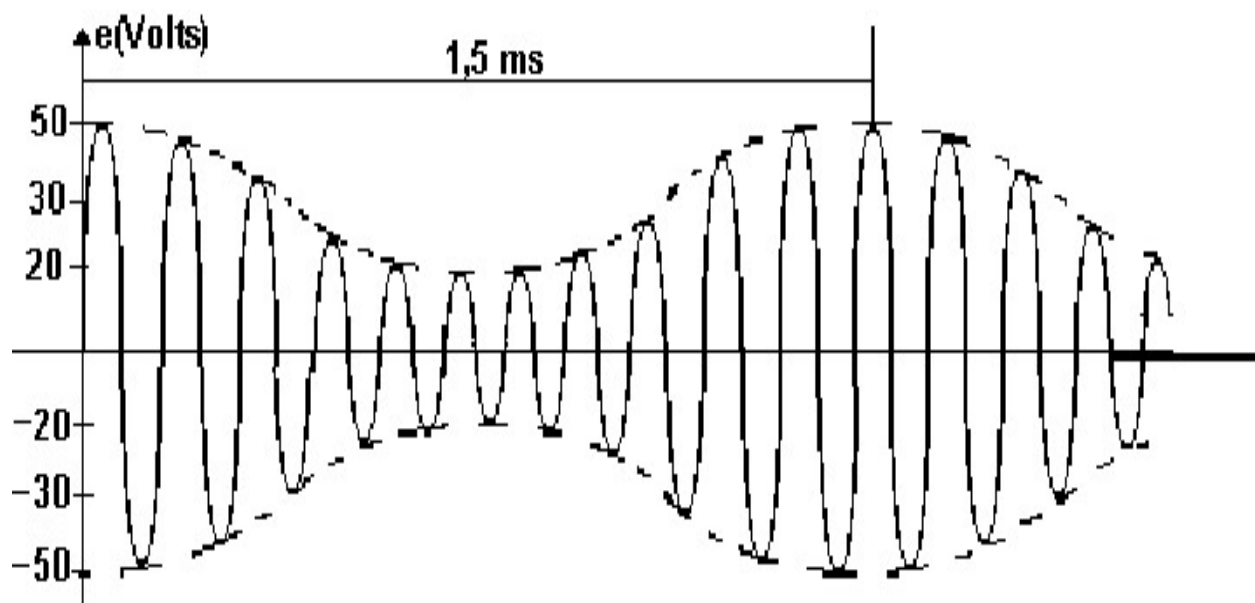


### 5.5.1 Aspectos do sinal AM

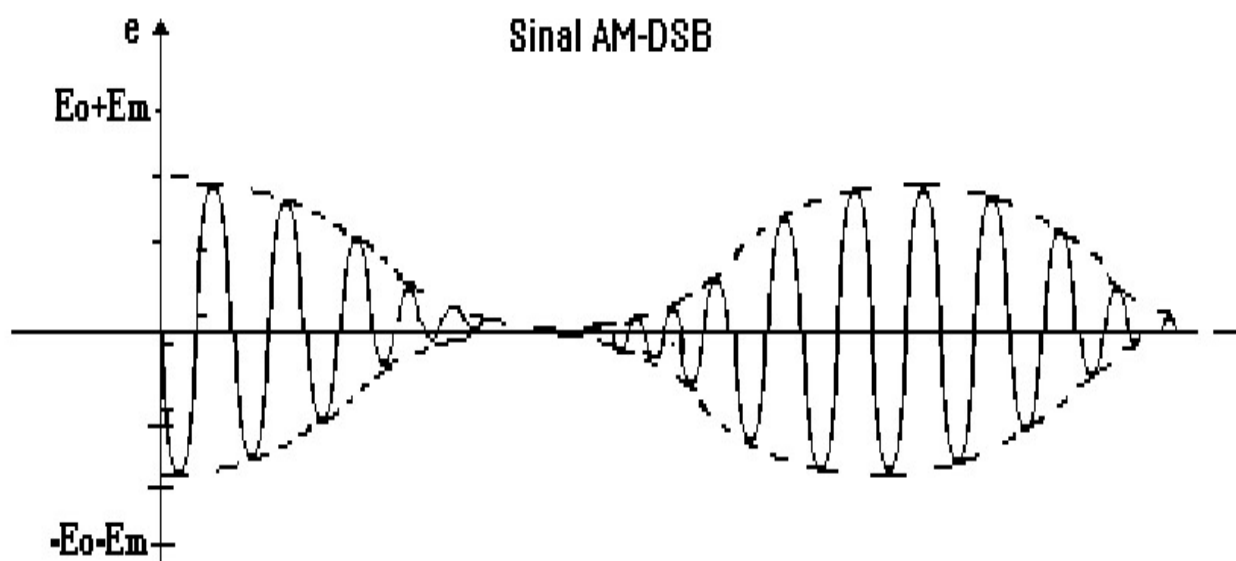
- O sinal AM descrito até o momento é chamado de AM-DSB (Amplitude Modulada com Banda Lateral Dupla)
- Este tipo de AM é o utilizado para transmissões comerciais
- A faixa de trabalho de tipo de transmissão é de 540kHz a 1600kHz com banda máxima 10kHz do sinal AM para um sinal de informação com frequência máxima de 5kHz.

- As formas de ondas que seguem mostram a formação de um sinal AM-DSB
- Segue as formas de ondas do sinal AM-DSB em função da variação do índice de modulação

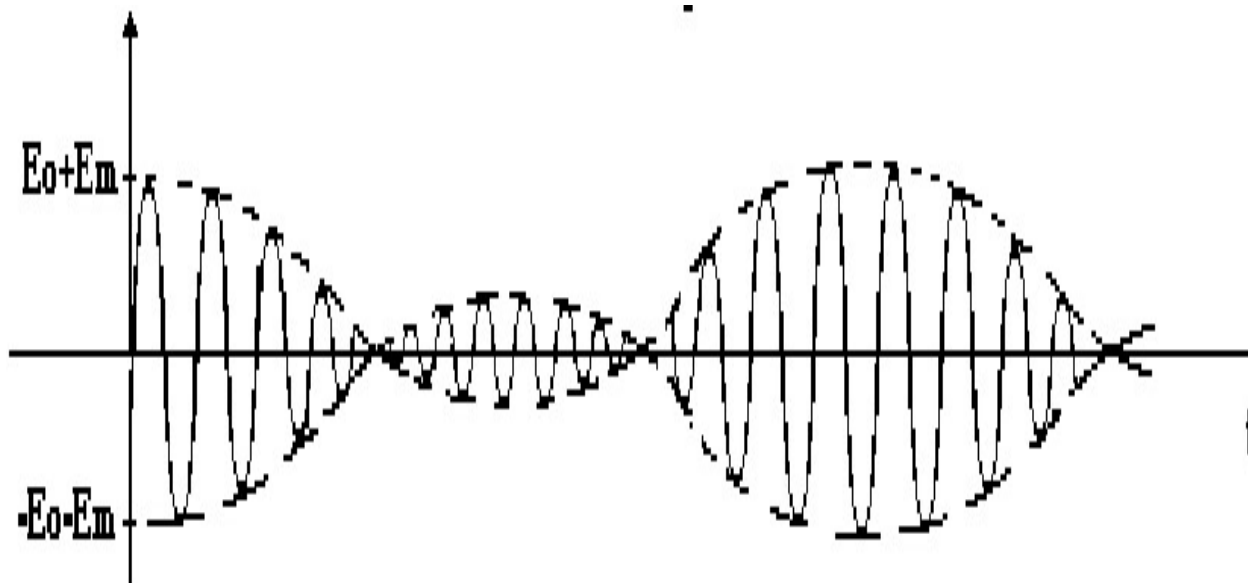
(a)  $0 < m_a < 1$



(b)  $m_a = 1$





(c)  $m_a > 1$ 

## 5.6 Potência em um sinal AM

$$P = \frac{(V_{\text{rms}})^2}{R} = \frac{(V_p/\sqrt{2})^2}{R} = \frac{V_p^2}{2R}$$

Sendo assim, para a portadora,  $P_c = E_c^2/2R$  e para cada uma das duas componentes das bandas laterais,

$$\frac{[(m_a/2)E_c/\sqrt{2}]^2}{R} = \frac{m_a^2}{4} \cdot \frac{E_c^2}{2R} = \frac{m_a^2}{4} P_c$$

Portanto,

$$P_{\text{lsb}} = m_a^2 P_c / 4 \rightarrow \text{potência lateral} \quad (5.7)$$

onde  $P_{\text{lsb}}$  designa a potência em apenas uma banda lateral. A potência total no sinal de AM é a soma dessas potências.

$$P_{\text{total}} = P_c + P_{\text{LSB}} + P_{\text{USB}}$$

$$= P_c + \frac{m^2}{4} P_c + \frac{m^2}{4} P_c$$

$$= P_c \left( 1 + \frac{m^2}{2} \right) = P_t \rightarrow \text{potência total} \quad (5.8)$$

**Exemplo 2**

Determine a potência em cada componente espectral do sinal AM do Exemplo 5.1, no qual  $E_c = 30 \text{ Vp}$  e  $m$  é 66,7%. Seja a impedância efetiva  $50 \Omega$ .

**Solução:**

$$P_c = \frac{E_c^2}{2R} = \frac{(30 \text{ Vp})^2}{2 \times 50 \Omega} = 9 \text{ W}$$

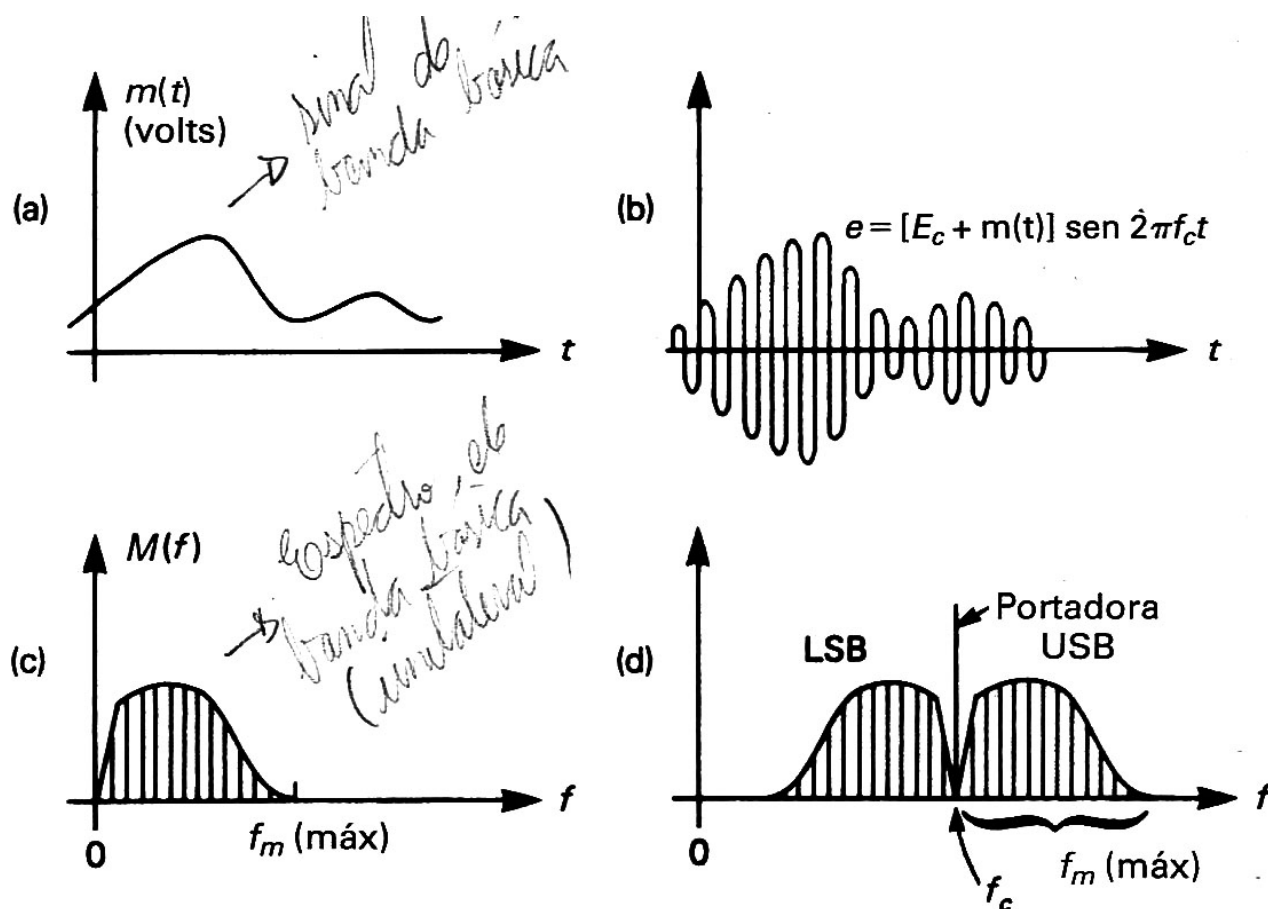
$$P_{\text{LSB}} = \frac{m^2}{4} P_c = \frac{(0,667)^2}{4} 9 \text{ W} = 1 \text{ W}$$

$$P_{\text{USB}} = P_{\text{LSB}} = 1 \text{ W}$$

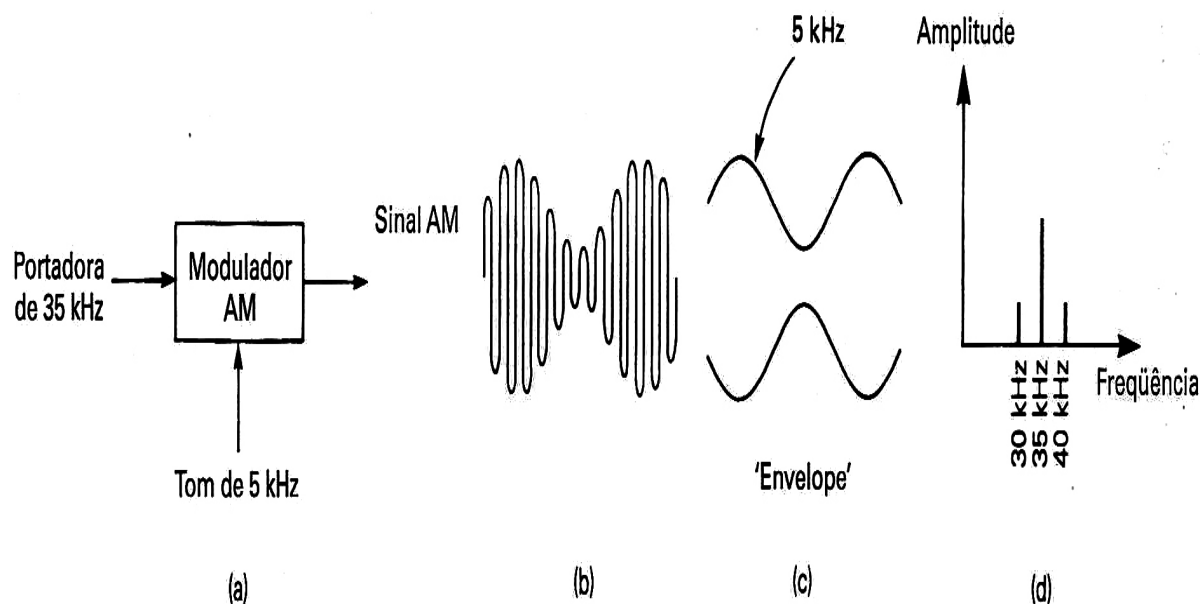
Além disso, a potência total no sinal AM é

$$P_t = 9 \text{ W} + 1 \text{ W} + 1 \text{ W} = 9 \text{ W} \left[ 1 + \frac{(0,667)^2}{2} \right] = 11 \text{ W}$$

## 5.7 Sinais modulados não senoidais

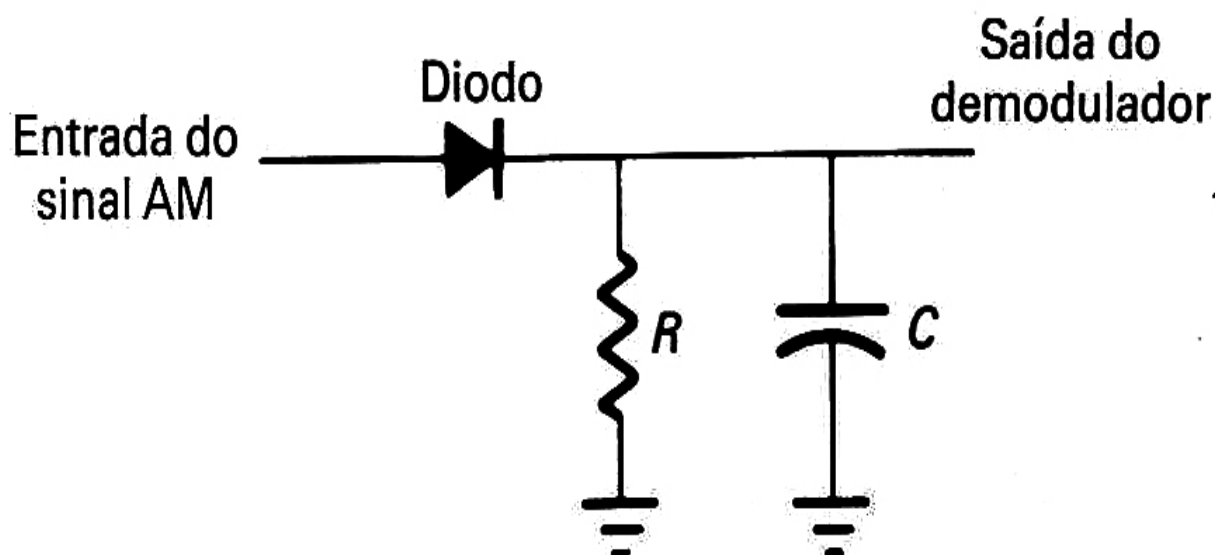


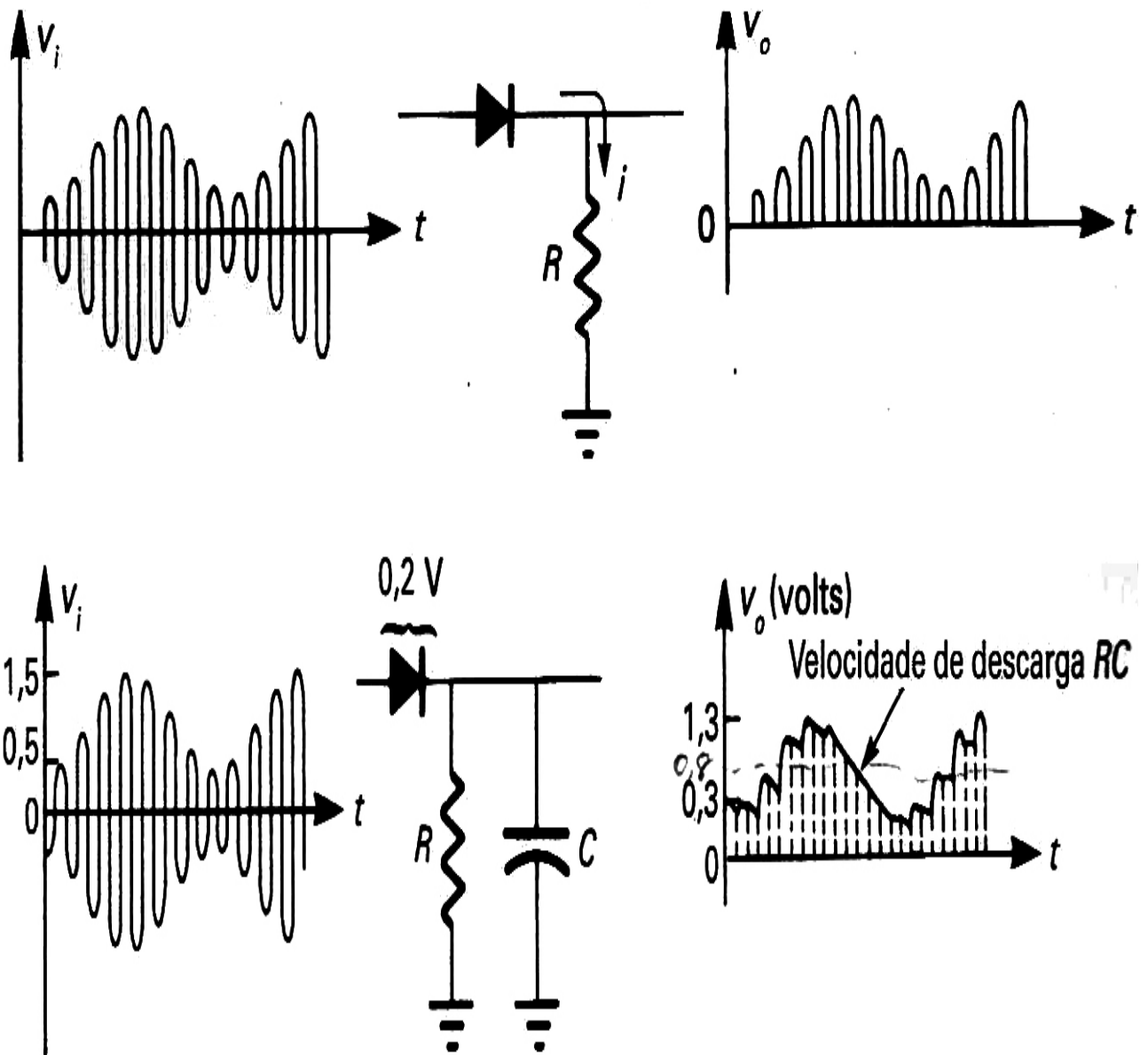
## 5.8 Demodulação AM



Sinal de amplitude modulada. (a) Gerando o sinal AM. (b) O sinal AM (domínio do tempo). (c) O 'envelope'. (d) Espectro de frequência unilateral do sinal AM (domínio da frequência).

### 5.8.1 Detector de pico de amplitude (Detetor de envoltória)





**Exercício 1** Para o demodulador da figura anterior, determine o seguinte:

1. Potência total fornecida ao circuito detector se a impedância de entrada for de  $1\text{ k}\Omega$  (circuito detector com  $R = 2\text{ k}\Omega$  deduzido na Seção 7.6).
2.  $v_o$  (máx),  $v_o$  (mín) e  $V_o$  (dc).
3. Corrente média se  $R = 2\text{ k}\Omega$ .
4. Valor adequado de  $C$  se  $R = 2\text{ k}\Omega$ ,  $f_m$  (máx) =  $5\text{ kHz}$  e  $m_n = 0,9$  (máx).

**Solução:**

1.  $v_i(\text{média}) = (1,5 \text{ V} + 0,5 \text{ V})/2 = 1 \text{ Vp}$ . O pico de tensão de entrada para uma portadora não modulada seria 1 Vp.

$$P_c = \frac{(V_{cp})^2}{2R_i} = \frac{(1 \text{ V})^2}{2 \times 1 \text{ k}\Omega} = 0,5 \text{ mW}, \quad m = \frac{1,5 - 0,5}{1,5 + 0,5} = 0,5$$

De forma que,

$$P_t = [1 + (0,5)^2/2](0,5 \text{ mW}) = 562,5 \mu\text{W}$$

2.  $v_o(\text{máx}) = 1,5 \text{ V} - 0,2 \text{ V} = 1,3 \text{ Vp}$

$$v_o(\text{mín}) = 0,5 \text{ V} - 0,2 \text{ V} = 0,3 \text{ Vp}$$

$$v_o(\text{dc}) = v_o(\text{média}) = (1,3 \text{ V} + 0,3 \text{ V})/2 = 0,8 \text{ V}$$

3.  $I_o(\text{dc}) = V_o(\text{dc})/R = 0,8 \text{ V}/2 \text{ k}\Omega = 400 \mu\text{A}$

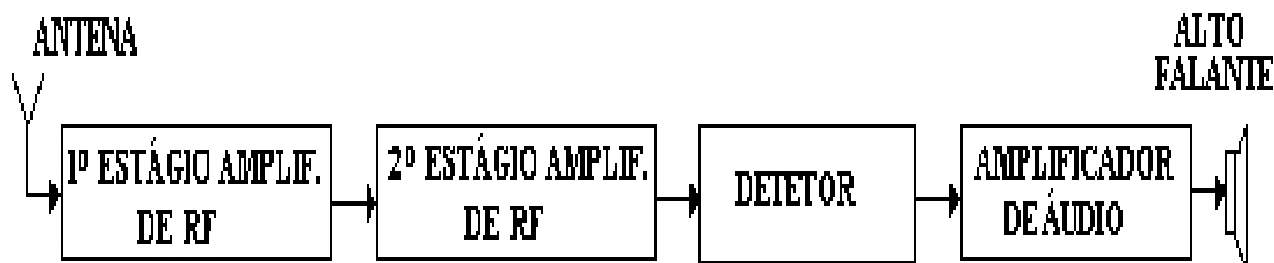
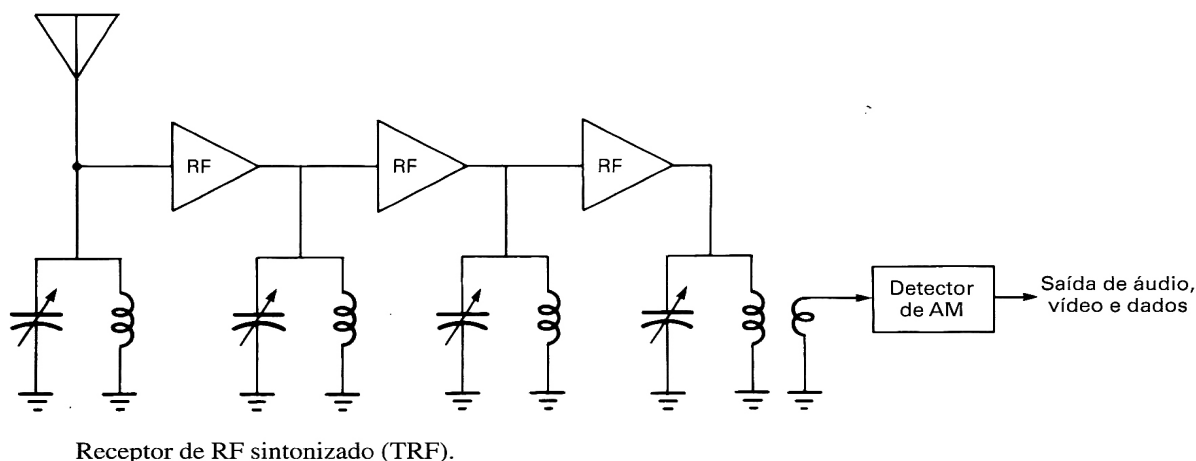
$$4. C = \frac{\sqrt{(1/m^2) - 1}}{2\pi R f_m(\text{máx})} = \frac{\sqrt{(1/0,9)^2 - 1}}{2\pi(2 \times 10^3)(5 \times 10)^3} = 0,008 \mu\text{F}$$

## 5.9 Sistemas receptores AM

Um receptor AM-DSB básico consiste de 3 etapas :

- (a) Etapa seletora: capaz de escolher dentre várias estações;
- (b) Etapa detetora: capaz de recuperar o sinal de informação a partir do sinal modulado;
- (c) Etapa amplificadora: para tornar o sinal recuperado audível para a pessoa que recebe a informação.

### 5.9.1 Receptor radiofrequência sintonizado (TRF ou RFS)



#### Efeitos da frequência em circuitos elétricos

- Na faixa de RF a frequência é suficiente alta para que comece a surgir o 'efeito pelicular';
- O 'efeito pelicular' consiste na passagem da corrente elétrica pela periferia do condutor, ficando sua porção central sem função alguma.
- Isso diminui a seção transversal útil do condutor e assim sua resistência própria, ou seja,  $R$  aumentará com o aumento da frequência.

$$R = \frac{\rho L}{A} = \frac{\rho L}{\pi r^2}$$

#### • Deficiências no receptor RFS

- (a) A seletividade varia ao longo da faixa de frequência;

- Efeito pelicular

$$\Rightarrow f_o \nearrow \Rightarrow R = \frac{\rho L}{A} \nearrow \Rightarrow Q = \frac{2\pi f_o L}{r_s} \Rightarrow B = \frac{f_o}{Q} \nearrow$$

$$\Rightarrow f_o \searrow \Rightarrow R = \frac{\rho L}{A} \searrow \Rightarrow Q = \frac{2\pi f_o L}{r_s} \Rightarrow B = \frac{f_o}{Q} \searrow$$

- A gama de frequências reservadas para rádio-difusão comercial AM-DSB é de 535 KHz a 1650 KHz e a faixa reservada para cada estação é de 10 KHz.
- A relação entre as frequências de cada extremo da faixa é:

$$\frac{1650}{535} = 3,1 \text{ vezes}$$

- Se multiplicarmos a frequência de ressonância por 3,1 chegamos ao extremo superior da faixa com uma banda passante de 3,1 X 10 = 31 KHz, o que possibilita a passagem de três estações simultaneamente;

(b) O ganho dos amplificadores diminuem com o aumento da frequência;

- Efeito pelicular

$$\Rightarrow f_o \nearrow \Rightarrow R = \frac{\rho L}{A} \nearrow \Rightarrow r_s \nearrow \Rightarrow R_P \searrow A_V = -\frac{R_P}{r_s} \searrow$$

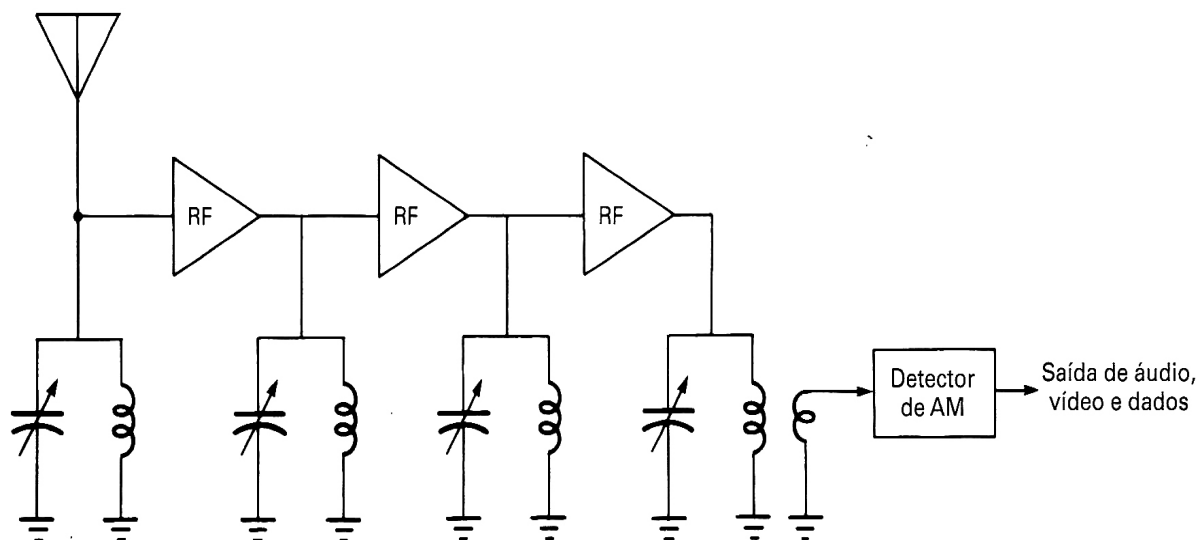
$$\Rightarrow f_o \searrow \Rightarrow R = \frac{\rho L}{A} \searrow \Rightarrow r_s \searrow \Rightarrow R_P \nearrow A_V = -\frac{R_P}{r_s} \nearrow$$

(c) O receptor usa dois (ou as vezes até mais) estágios sintonizados de RF, e ao se usar mais de um estágio torna-se bastante difícil fazer com que os vários filtros operem exatamente na mesma frequência ao longo de toda a faixa de recepção.

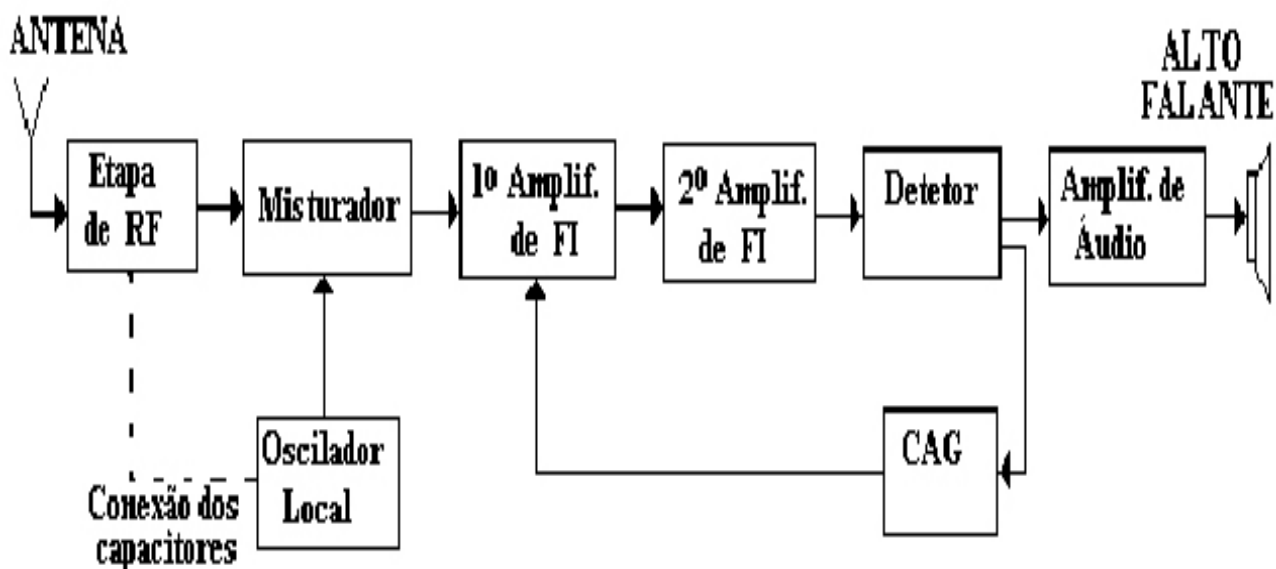
Em vista dessa razoável quantidade de inconvenientes, surgiu a necessidade de se criar um novo tipo de receptor, pouco mais sofisticado, que foi chamado de **receptor super-heterodino**



### 5.9.2 Receptor super-heterodino



Receptor de RF sintonizado (TRF).



- Frequência Intermediária(FI)

$$f_{OL} = f_{RF} + FI$$

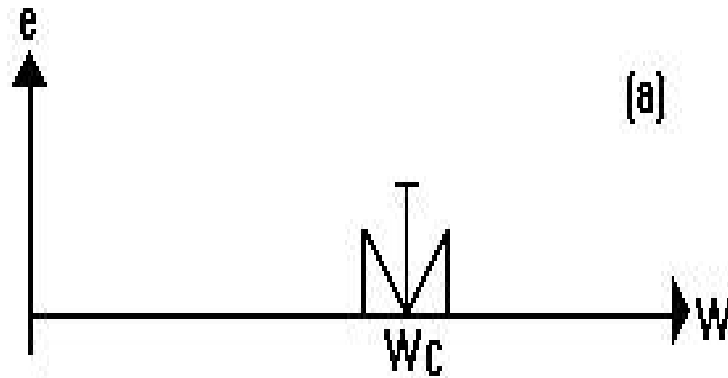
Onde:

- $f_{OL} \Rightarrow$  frequência do oscilador local;
- $f_{RF} \Rightarrow$  frequência de sintonia da etapa RF;
- $FI \Rightarrow$  frequência intermediária;

Desta forma, se na etapa de RF sintonizarmos um sinal cuja expressão é:

$$e(t) = (E_C + e_m(t)) \cos \omega_c t$$

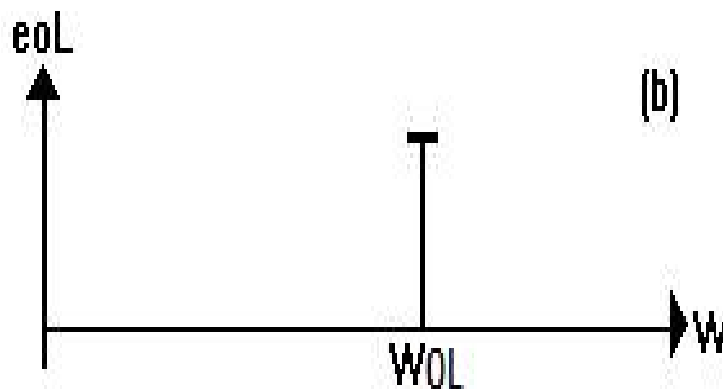
e cujo espectro é dado na figura ( A ),



teremos o oscilador local gerando em sinal do tipo:

$$e_{OL}(t) = E_{OL} \cdot \cos \omega_{OL}(t)$$

cujo espectro é dado pela figura ( B ).



O misturador vai gerar, em sua saída, o sinal:

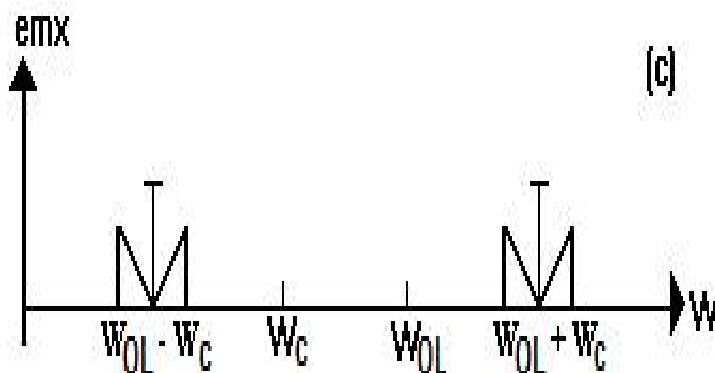
$$e_{mix}(t) = e(t) \cdot e_{OL}(t)$$

$$e_{mix}(t) = [E_c + e_m(t)] \cdot \cos \omega_c t \cdot E_{OL} \cos \omega_{OL} t$$

$$e_{mix}(t) = E_{OL} \cdot [E_c + e_m(t)] \cdot \cos \omega_{OL} t \cos \omega_c t$$

Usando as equações trigonométricas para desmembrar o produto de cossenos, teremos:

$$e_{mix}(t) = \frac{E_{OL}[E_c + e_m(t)]}{2} \cos(\omega_{OL} - \omega_c)t + \frac{E_{OL}[E_c + e_m(t)]}{2} \cos(\omega_{OL} + \omega_c)t$$



**Exercício 2** <sup>1</sup> Dê exemplo de um sinal modulado em AM-DSB, mostrando a portadora e o sinal mensagem.

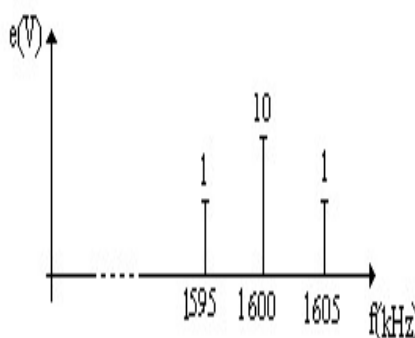
**Exercício 3** <sup>2</sup> Qual é a expressão genérica do sinal modulado em AM-DSB ?

**Exercício 4** Qual é a banda ocupada por um sinal AM-DSB comercial?

**Exercício 5** Qual a finalidade do filtro passa-faixa utilizado na saída de um modulador em amplitude?

**Exercício 6** <sup>3</sup> Descreva como pode ser obtido o índice de modulação de um transmissor AM-DSB de forma prática?

**Exercício 7** Sabendo que o sinal com o espectro de frequência mostrado abaixo foi modulado com um transmissor AM-DSB.



Mostre o espectro de frequência para a saída de cada bloco do receptor Super-Heterodino para um sinal de entrada mostrado acima. Supondo que em cada bloco o ganho é igual a 1.

**Exercício 8** O sinal mensagem mostrado abaixo, foi modulado em AM-DSB e sintonizado em um receptor RFS. Como ficará a forma de onda do sinal mensagem no receptor para uma portadora de 750KHz e amplitude de:

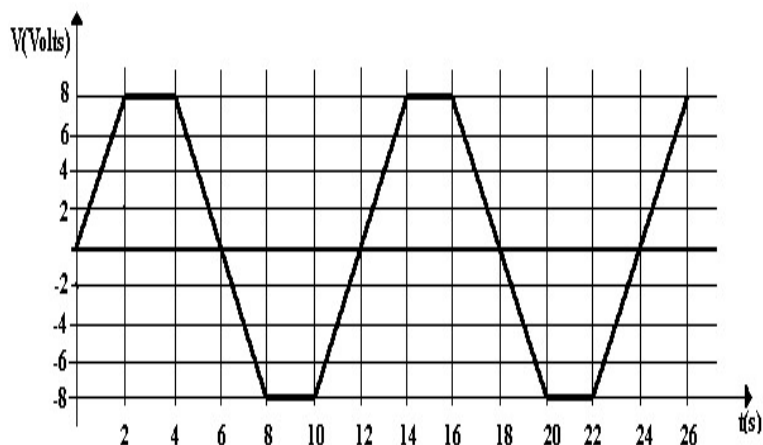
- 11V<sub>p</sub>
- 6V<sub>p</sub>

<sup>1</sup>Dica:ver Alcides Tadeu Gomes Telecomunicações seção 1.3 e exercícios pag.63 em diante

<sup>2</sup>Dica:ver Alcides Tadeu Gomes Telecomunicações seção 1.3

<sup>3</sup>Dica:ver Alcides Tadeu Gomes Telecomunicações pag. 23

- $8V_p$

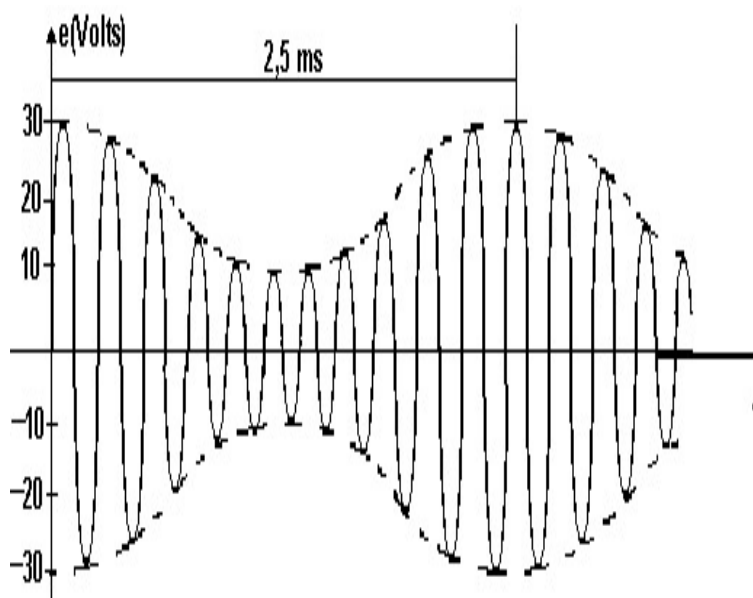


Mostre como ficará a forma de onda na saída de cada bloco do sistema TRANSMISSOR/RECEPTOR.

**OBS:** Considere que os blocos tanto do transmissor quanto no receptor possuem ganho igual a 1.

**Exercício 9** Para uma portadora de 1220KHz modulada em AM-DSB e recebida num receptor RFS, como mostrado na figura a seguir. Determine:

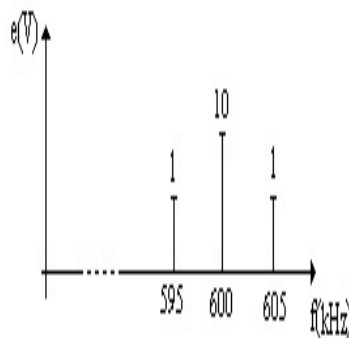
- Qual será a frequência da portadora em que o receptor deverá estar sintonizado?
- Na saída do receptor RFS: mostrar expressão da onda, sua forma de onda e espectro.
- A expressão da onda modulada e espectro na entrada do receptor RFS.



**Exercício 10** Faça um diagrama de blocos de um receptor AM superheterodino.

**Exercício 11** Porque é utilizada uma FI num receptor AM?

**Exercício 12** Supondo em um receptor RFS receba um sinal com o seguinte espectro de frequência:



Mostre o espectro de frequência para a saída de cada bloco do receptor. Supondo que em cada bloco o ganho seja igual a 1.

**Exercício 13** Num receptor AM, em que frequência é sintonizada o amplificador de RF?

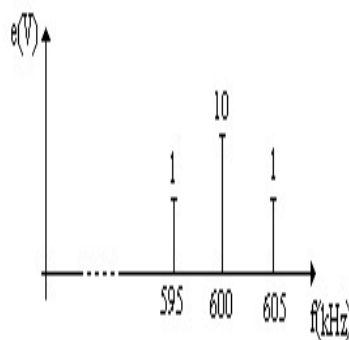
**Exercício 14** Qual a função do oscilador local num receptor AM?

**Exercício 15** Em que frequência é sintonizado os filtros na etapa de FI do receptor AM?

**Exercício 16** Quais são as deficiências de um receptor RFS. Justifique.

**Exercício 17** Como o receptor Super-Heterodino resolve as deficiências do receptor RFS.

**Exercício 18** Supondo em um receptor Super-Heterodino receba um sinal com o seguinte espectro de frequência:



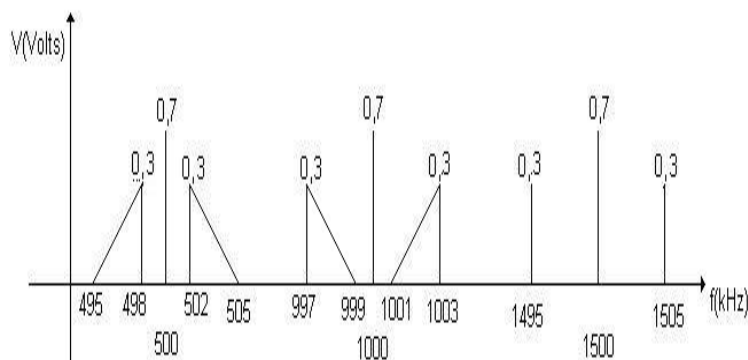
Mostre o espectro de frequência para a saída de cada bloco do receptor. Supondo que em cada bloco o ganho seja igual a 1.

**Exercício 19** Numa modulação AM-DSB foi utilizada uma portadora de 25 V pico a pico e frequência de 7MHz, é feita uma modulação com uma informação cossenoidal de 15Vpp e 15KHz. Determine:

- (a) A expressão da onda portadora, sua forma de onda e espectro.
- (b) A expressão da onda modulante, sua forma de onda e espectro.
- (c) A expressão da onda modulada, sua forma de onda e espectro.
- (d) Potência média do sinal modulado.

(e) Qual o percentual da potência total média é gasta para transmitir a portadora.

**Exercício 20** Em uma cidade no interior do Brasil foi verificado que o espectro na faixa em determinado instante de tempo das rádios AM-DSB é o que segue esboçado abaixo: Dois moradores desta cidade possuem receptor de rádio AM-DSB com as seguintes especificações para cada bloco que o compõem:



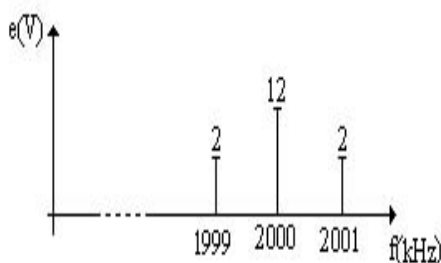
|                       | MORADOR 1                                   | MORADOR 2                                    |
|-----------------------|---|--|
| Receptor AM-DSB       | RFS   | RFS  |
| 1o Amplificador de RF | $A_v=2$ $f_r=500\text{kHz}$ $B=9\text{kHz}$ | $A_v=2$ $f_r=1000\text{kHz}$ $B=4\text{kHz}$ |
| 2o Amplificador de RF | $A_v=3$ $f_r=500\text{kHz}$ $B=9\text{kHz}$ | $A_v=2$ $f_r=1000\text{kHz}$ $B=4\text{kHz}$ |
| Detetor de envoltória | $A_v = 1$                                   | $A_v = 1$                                    |
| Amplificador de áudio | $A_v = 2$                                   | $A_v = 3$                                    |

Esboce o diagrama de blocos para o receptor de cada morador, mostrando o espectro de amplitude na saída de cada bloco.

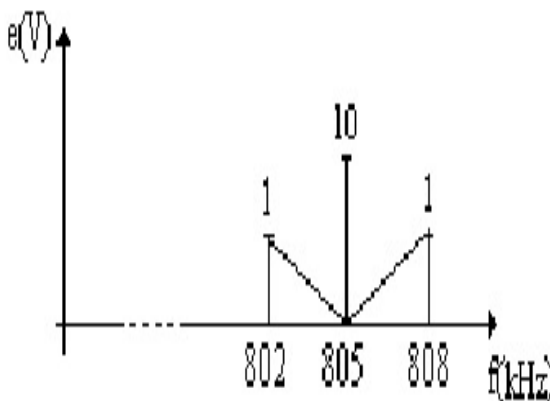
**Exercício 21** Dado o espectro do sinal modulado

Determine:

- A expressão da onda portadora, sua forma de onda e espectro.
- A expressão da onda modulante, sua forma de onda e espectro.
- A expressão da onda modulada e sua forma de onda.
- Potência média do sinal modulado.
- Qual o percentual da potência total média é gasta para transmitir a banda lateral inferior.

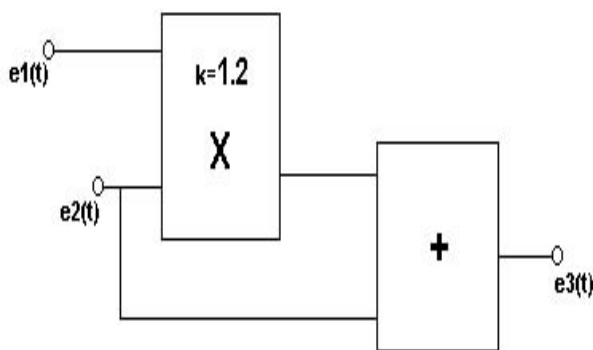


**Exercício 22** Sabendo que o sinal com o espectro de frequência mostrado abaixo foi modulado com um transmissor AM-DSB. Mostre o espectro de frequência para a saída de cada bloco do receptor Super-Heterodino para um sinal de entrada mostrado acima. Supondo que em cada bloco o ganho é igual a 1.



**Exercício 23**<sup>4</sup> Para o diagrama de blocos e os sinais de entrada mostrados abaixo:  $e_1(t) = 50\cos 4\pi \cdot 10^3 t$  e  $e_2(t) = 100\cos 3\pi \cdot 10^6 t$

- (a) Demonstrar que a saída  $e_3(t)$  é um sinal AM-DSB
- (b) Determinar o seu índice de modulação
- (c) Determinar sua forma de onda e espectro



#### Exercício 24

Determine o seguinte a partir da Figura

- a. Índice de modulação.
- b. Suponha que o esboço seja preciso em escala de tempo e  $f_c = 45$  kHz. Encontre a frequência de modulação a partir da tela do osciloscópio que é mostrada. (Conte os ciclos.)
- c. Potência da portadora em  $75 \Omega$ .
- d. Potência em uma banda lateral.
- e. Potência total dissipada por  $75 \Omega$ .
- f. Qual porcentagem do total é representada pela potência da portadora?
- g. Quanta banda passante (banda passante de informação) é necessária para transmitir esse sinal de AM?
- h. Esboce a forma de onda no domínio do tempo e inclua a tensão e a frequência, se apenas a banda lateral superior for transmitida (suponha que não haja portadora).

<sup>4</sup>Dica: ver Alcides Tadeu Gomes Telecomunicações pag. 69

