

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

Centro Tecnológico

Departamento de Engenharia Elétrica

# Princípios de Comunicações I

## Capítulo 4: Modulação Analógica Modulação de Amplitude

Prof.: Jair A. Lima Silva

DEL/CT/UFES

# Índice

## **1. Modulação**

- a. Definição
- b. Motivação

## **2. Modulação de Amplitude**

- a. Definição, Objetivo e Condição Necessária
- b. Teorema da Modulação
- c. Modulador de Produto
- d. Tipos de Modulação de Amplitude

## **3. Aplicação em Radiodifusão**

## **4. QAM Analógico**

## **5. Multiplexação FDM**

## **6. Multiplexação OFDM (Conceito Básico)**

# 1. Modulação

## 1a. Definição

- Processo de de modificação do conteúdo temporal ou espectral de um sinhal de mensagem  $x(t)$ .
- Portanto, se  $y(t)$  for

$$y(t) = x(t) \cdot e^{j\omega_c t}$$

- Este é uma **versão modulada** de  $x(t)$  por uma exponencial complexa.

# 1. Modulação

## 1a. Definição

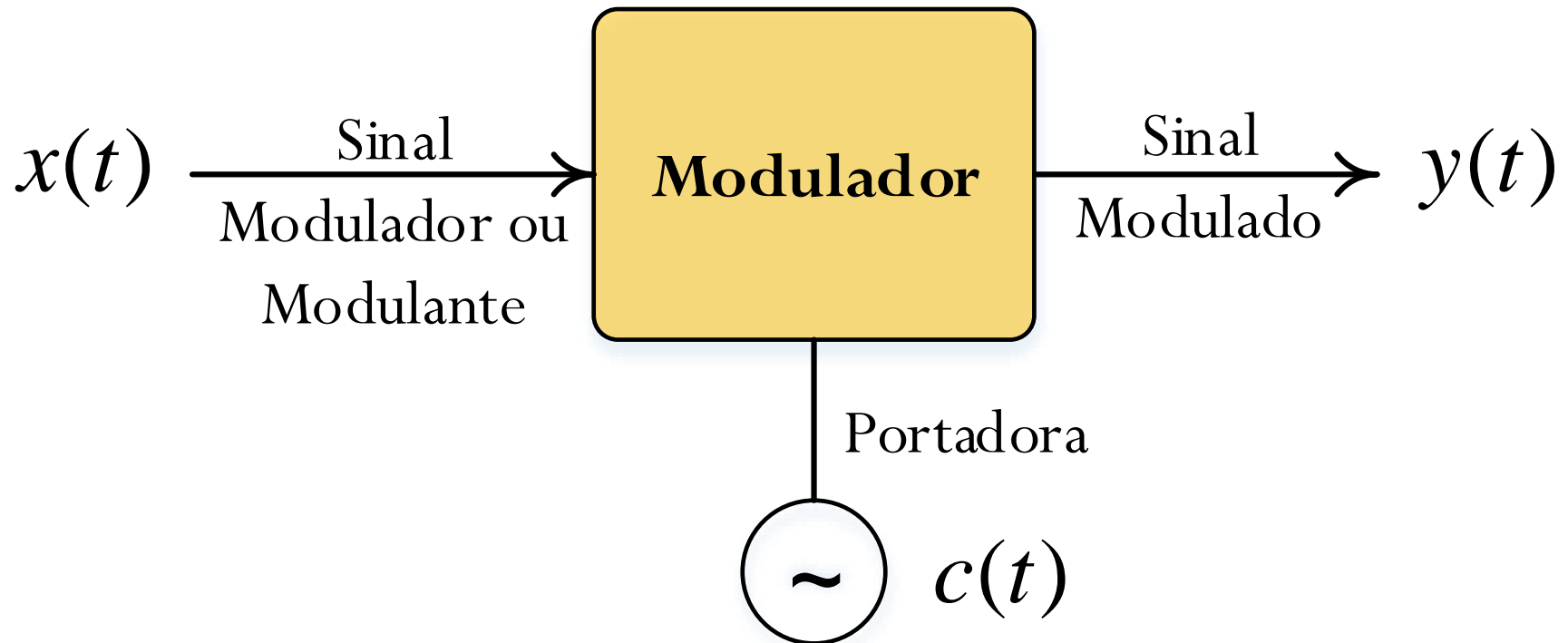
- Alteração de um dos parâmetros de um sinal senoidal denominado de **portadora**:

$$c(t) = A \cdot \cos(w_c t + \phi)$$

- Esta portadora “acompanha” a variação do sinal de mensagem (informação)  $x(t)$ .
- A portadora cossenoidal é típica em sistemas de comunicação em banda passante.

# 1. Modulação

## 1a. Definição



# 1. Modulação

## 1b. Motivação

- **Irradiação eficiente** – O comprimento da antena deve ser da ordem de grandeza do comprimento de onda

$$\lambda_0 \cong \frac{c}{f_c};$$



- **Multiplexação** de sinais de diversas fontes.



## 2. Modulação de Amplitude

### 2a. Definição, Objetivo e Condição Necessária

- Muitos Sistemas de Comunicação baseiam-se no conceito de modulação em amplitude senoidal, em que a portadora  $c(t)$  tem sua **amplitude alterada** (modulada) pelo sinal contendo informação  $x(t)$ .
- O **sinal modulado**  $y(t)$  é, então, o produto desses dois sinais:

$$y(t) = x(t) \cdot c(t)$$

$$y(t) = \underbrace{x(t) \cdot A}_{\text{Amplitude alterada}} \cos(2\pi f_c t + \phi)$$

*Frequência e fase*

*inalteradas*



*Amplitude alterada*

**Modulador de Produto**

## 2. Modulação de Amplitude

### 2a. Definição, Objetivo e Condição Necessária

- O objetivo essencial da modulação em amplitude é deslocar  $x(t)$  para uma faixa de frequência adequada para transmissão pelo canal de comunicação;
- A frequência da portadora deve ser muito maior do que a máxima frequência do sinal modulante;
- Para entendermos melhor o que ocorre no processo de modulação devemos recorrer à propriedade da transformada de Fourier conhecida como **Teorema da Modulação**.



## 2. Modulação de Amplitude

### 2b. Teorema da Modulação

- A transformada de Fourier de um sinal qualquer  $x(t)$  é obtida por:

$$X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \exp(-j2\pi ft) dt$$

- A transformada de Fourier do sinal modulado  $y(t)$  é dado por:

$$Y(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) c(t) \exp(-j2\pi ft) dt$$

## 2. Modulação de Amplitude

### 2b. Teorema da Modulação

- A modulação pode ser obtida mediante o uso de uma portadora modelada por uma exponencial complexa:

$$c(t) = e^{j\omega_c t}$$

$$c(t) = \cos \omega_c t + j \sin \omega_c t$$

- Ou então por portadora modelada por é um sinal senoidal (oscilador):

$$c(t) = \cos \omega_c t$$

onde  $\omega_c = 2\pi f_c$  é a frequência da portadora.

## 2. Modulação de Amplitude

### 2b. Teorema da Modulação

- Para a portadora exponencial complexa

$$y(t) = x(t)e^{j\omega_c t}$$

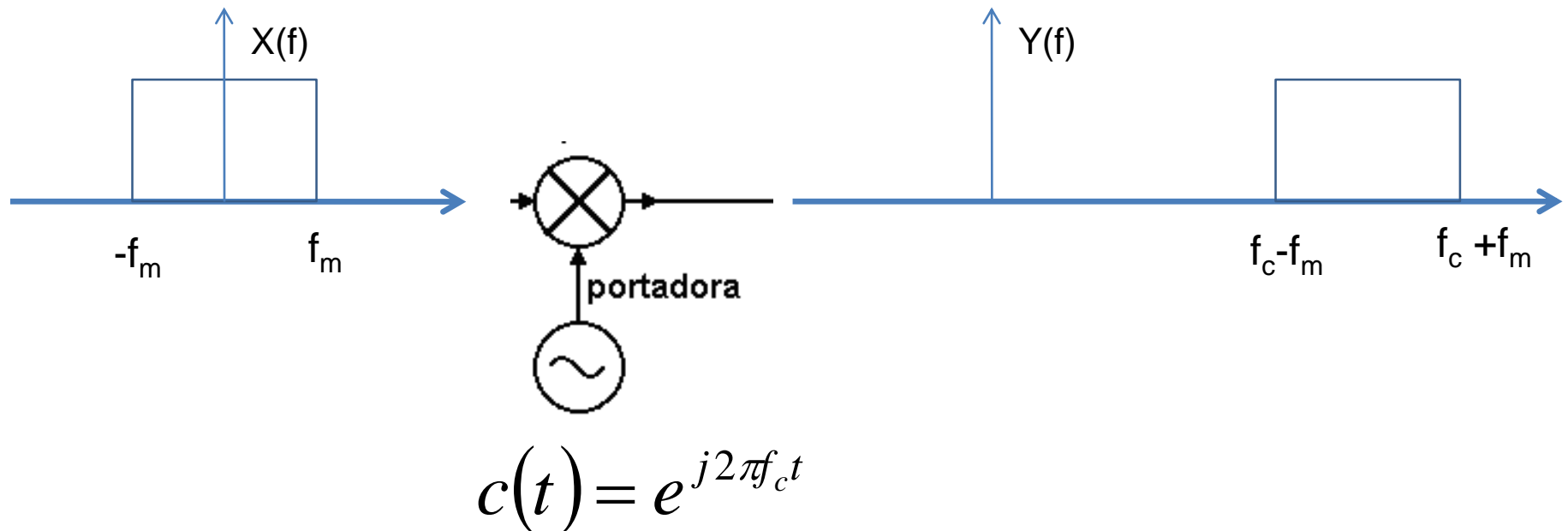
$$Y(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \cdot e^{j2\pi f_c t} \cdot e^{-j2\pi f t} dt = x(t) \cdot e^{-j2\pi(f-f_c)t} dt = X(f - f_c)$$

Esta é a propriedade do deslocamento em frequência em que  $Y(f)$  é o espectro do sinal  $x(t)$  deslocado para a frequência da portadora  $f_c$ .

## 2. Modulação de Amplitude

### 2b. Teorema da Modulação

$$Y(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \cdot e^{j2\pi f_c t} \cdot e^{-j2\pi f t} dt = x(t) \cdot e^{-j2\pi(f-f_c)t} dt = X(f - f_c)$$



## 2. Modulação de Amplitude

### 2b. Teorema da Modulação

- Para uma portadora senoidal

$$y(t) = x(t) \cos(2\pi f_0 t)$$

- Usando o teorema de Euler, podemos escrever  $y(t)$  por:

$$y(t) = \frac{1}{2} x(t) \exp(j2\pi f_0 t) + \frac{1}{2} x(t) \exp(-j2\pi f_0 t)$$

- Aplicando a propriedade de deslocamento em frequência da transformada de Fourier ao sinal  $y(t)$ , obtemos.

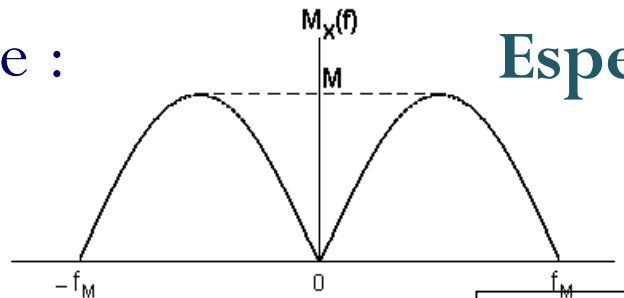
$$Y(f) = \frac{1}{2} X(f - f_0) + \frac{1}{2} X(f + f_0)$$

- Nessa condição, o espectro de amplitude de  $y(t)$  corresponde ao espectro de amplitude de  $x(t)$  multiplicado por  $1/2$  e deslocado para a frequência positiva  $+f_0$  e para a frequência negativa  $-f_0$ .

## 2. Modulação de Amplitude

### 2b. Teorema da Modulação

Considere :

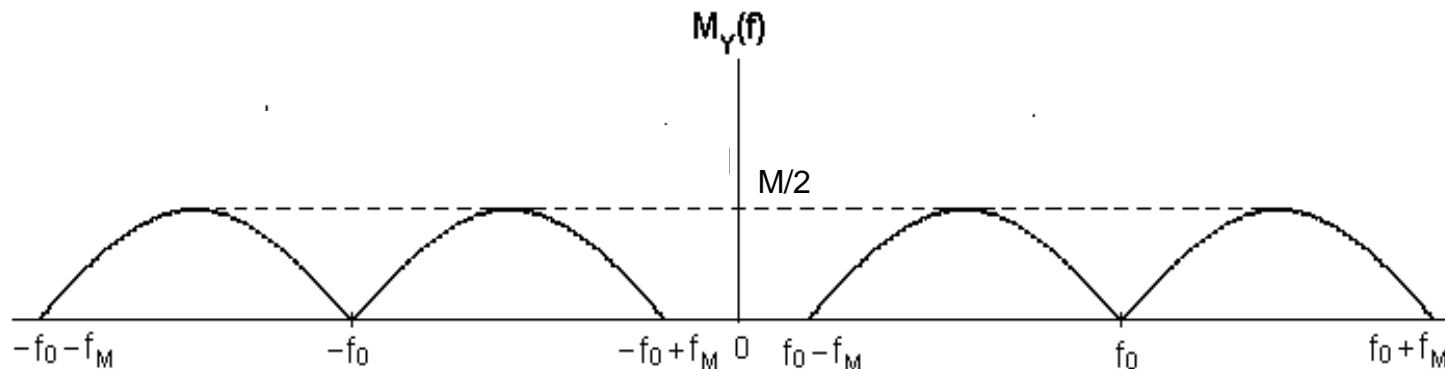


Espectro de amplitude de  $x(t)$

$$y(t) = x(t) \cos(2\pi f_0 t)$$

**$|f_0| > |f_M|$  para que não ocorra sobreposição dos lóbulos.**

O espectro de frequência do sinal  $y(t)$  é dado por:

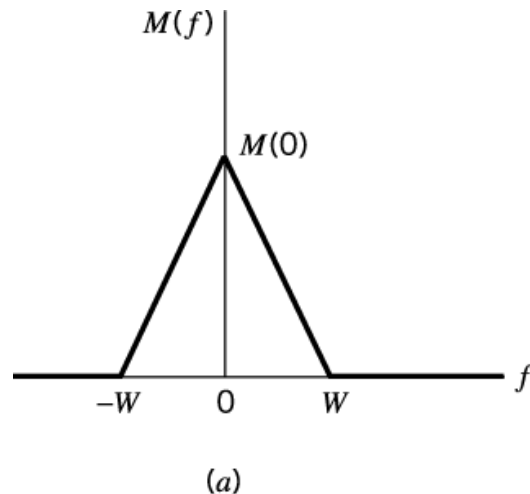


Espectro de amplitude de  $y(t)$

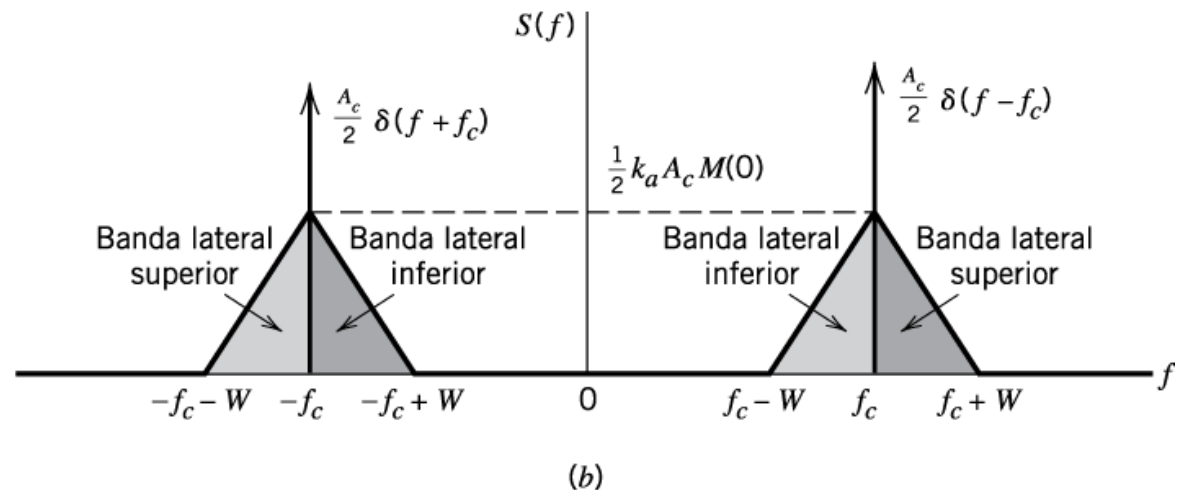
## 2. Modulação de Amplitude

### 2b. Teorema da Modulação

#### Sinal em Banda Base



#### Sinal em Banda Passante



- Para o sinal em Banda Passante:
  - LSB – Lower-Side Band
  - USB – Upper-Side Band
  - Largura de banda dobrada

## 2. Modulação de Amplitude

### 2b. Teorema da Modulação

#### Portadora Complexa *versus* Portadora Senoidal

##### Portadora complexa

- $f_c$  ou  $f_0$  pode assumir qualquer valor;
- Não são gerados lóbulos extras;
- O bloco modulador é complexo e mais caro.

##### Portadora senoidal

- $f_c$  ou  $f_0$  deve ser maior do que a maior frequência de  $\mathbf{x}(t)$ , caso contrário ocorre sobreposição dos lóbulos e erro de demodulação;
- Há geração de um lóbulo extra — a banda ocupada é duplicada;
- O bloco modulador é mais simples de ser implementado.



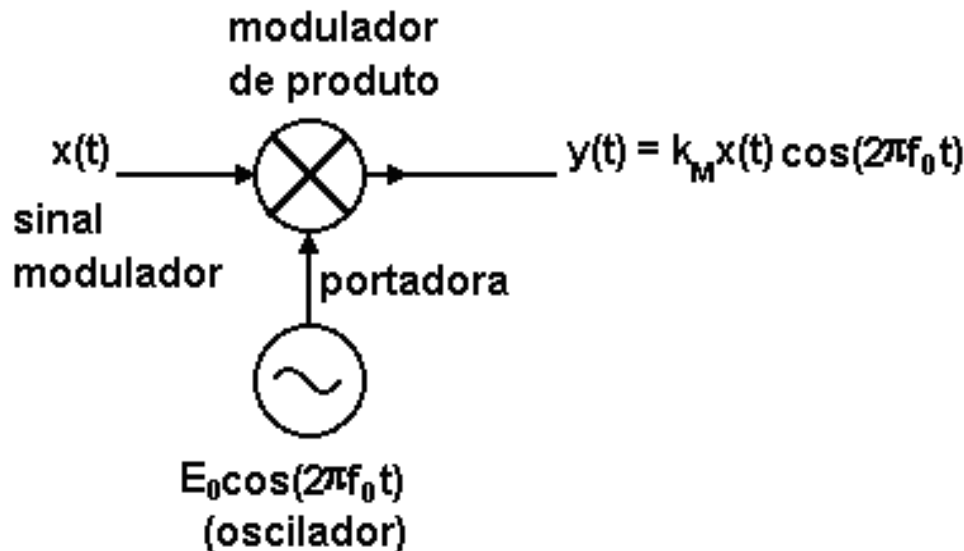
## 2. Modulação de Amplitude

### 2c. Modulador de Produto

O modulador de produto é o circuito físico que recebendo como entradas a portadora e o sinal de informação, produz o sinal elétrico de saída:

$$y(t) = k_M x(t) \cos(2\pi f_0 t)$$

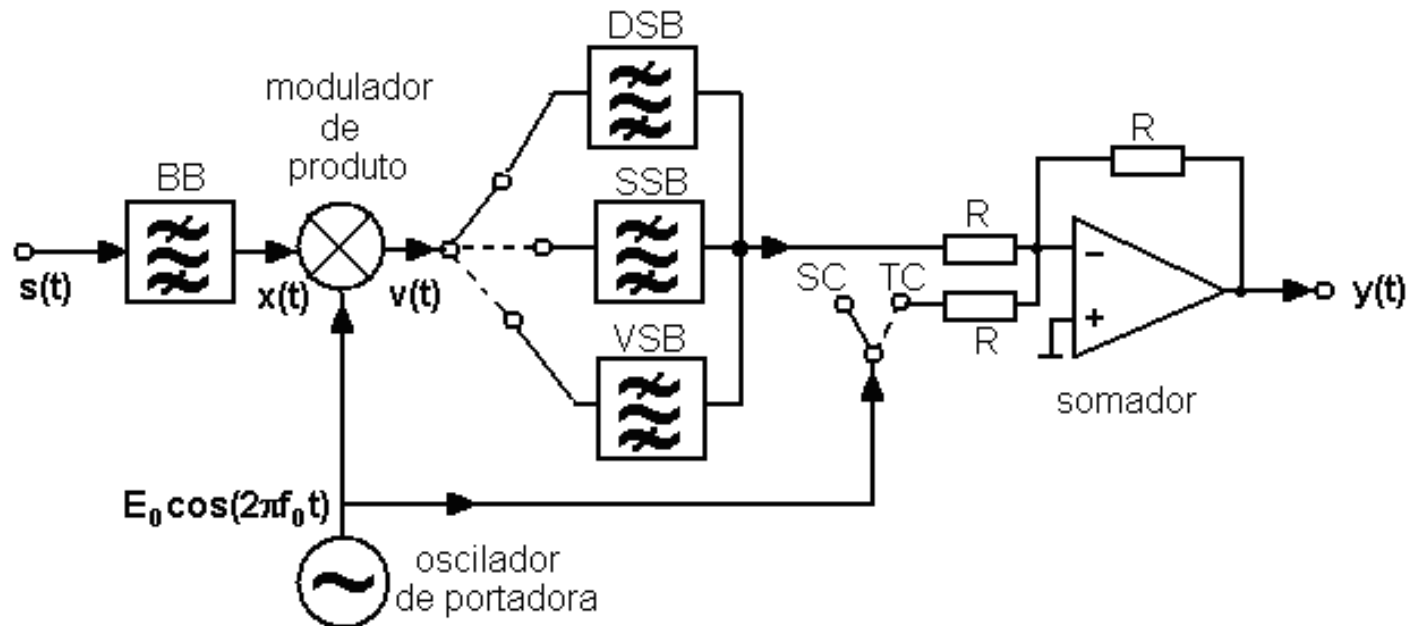
Onde  $k_M$  é uma constante adimensional característica desse circuito chamada de Constante de Modulação.



## 2. Modulação de Amplitude

### 2c. Modulador de Produto

O bloco **modulador de amplitude** é formado pelo conjunto **filtro passa-faixa (BB) + modulador de produto + filtro passa-faixa (DSB, SSB ou VSB) + circuito somador**.

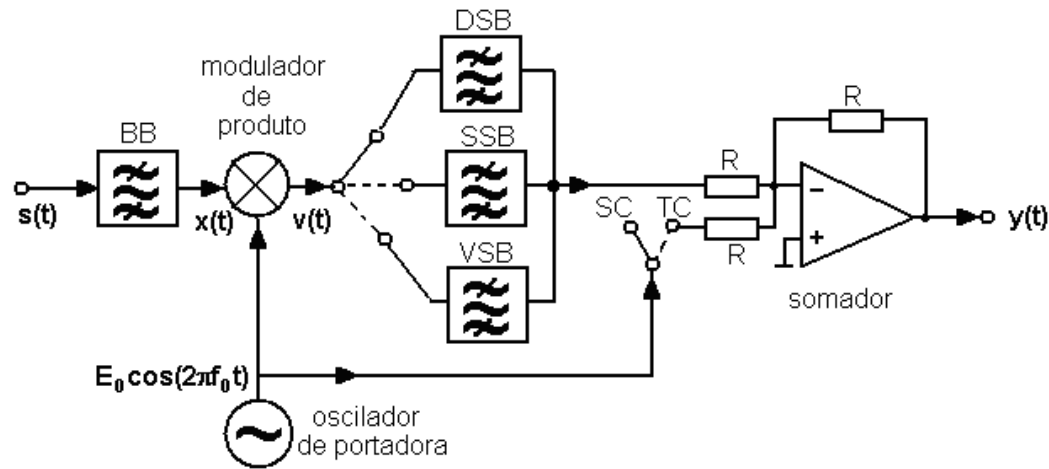


#### Circuito somador

TC : portadora transmitida      SC : portadora suprimida

## 2. Modulação de Amplitude

### 2c. Modulador de Produto



### Faixa de passagem dos filtros

*BB (banda base) :  $f_a$  a  $f_b$*

*DSB (Double Side Band = dupla faixa lateral):  $(f_0 - f_b)$  a  $(f_0 + f_b)$*

*SSB (Single Side Band = faixa lateral única):  $(f_0 - f_b)$  a  $f_0$  ou  $f_0$  a  $(f_0 + f_b)$*

*VSB (Vestigial Side Band = faixa lateral vestigial:  $(f_0 - f_m)$  a  $(f_0 + f_b)$  ou*

*$(f_0 - f_b)$  a  $(f_0 + f_m)$  com  $f_a < f_m < f_b$*

## 2. Modulação de Amplitude

### 2d. Tipos de Modulação de Amplitude – **AM-DSB/TC**

**AM-DSB/TC** é a sigla em inglês para **Modulação de Amplitude – Dupla faixa lateral/Portadora Transmitida**.

A amplitude da portadora é alterada pelo sinal modulador  $\mathbf{x(t)}$ , obtendo-se o sinal modulado  $\mathbf{y(t)}$  na forma:

$$y(t) = \underbrace{E_0 \cos(2\pi f_0 t)}_{\text{portadora}} + \underbrace{k_M x(t) \cos(2\pi f_0 t)}_{\text{Sinal na saída do filtro DSB}}$$

$$y(t) = \left[ E_0 + k_M x(t) \right] \cos(2\pi f_0 t)$$

**Sinal modulado em AM-DSB/TC**

## 2. Modulação de Amplitude

### 2d. Tipos de Modulação de Amplitude – **AM-DSB/TC**

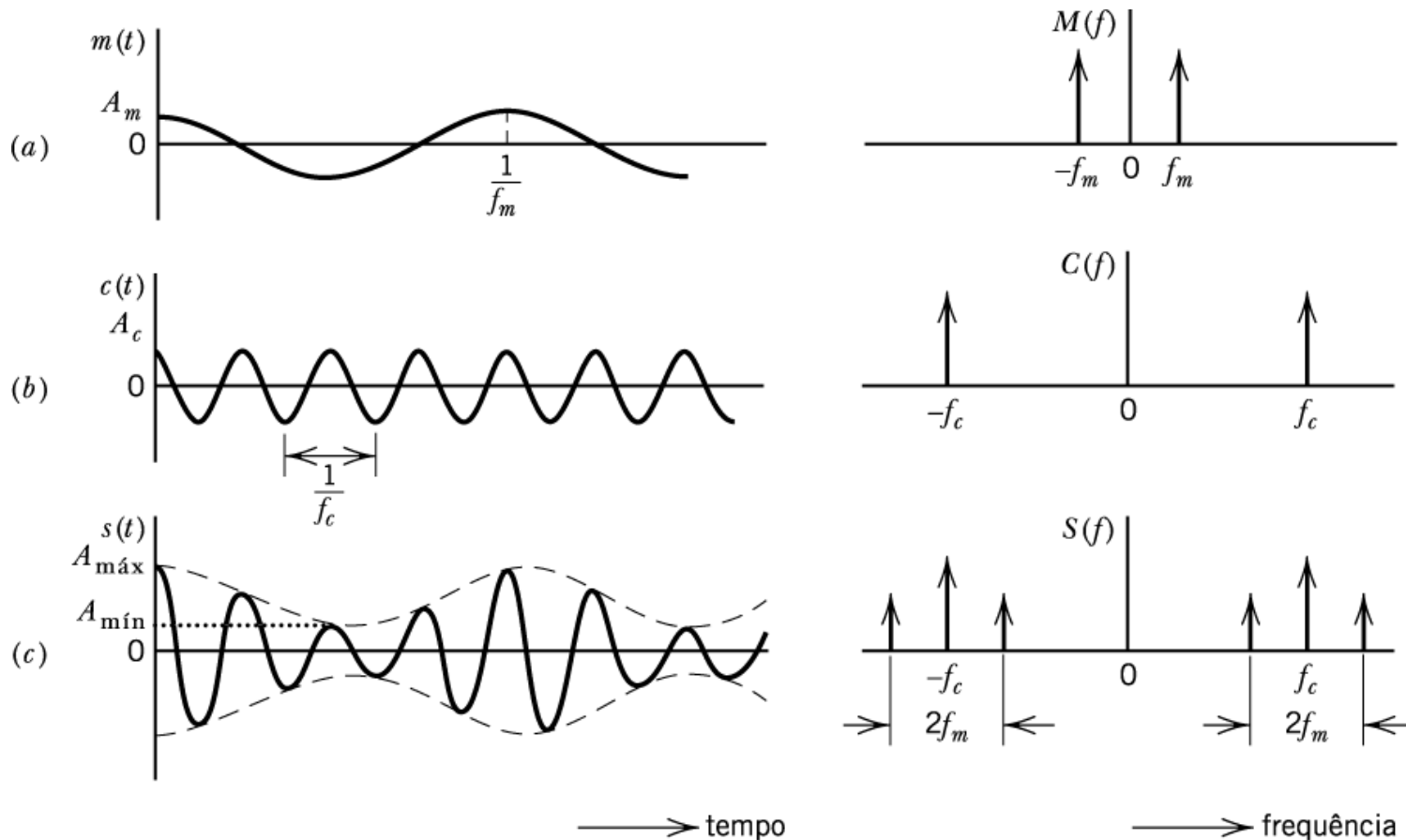


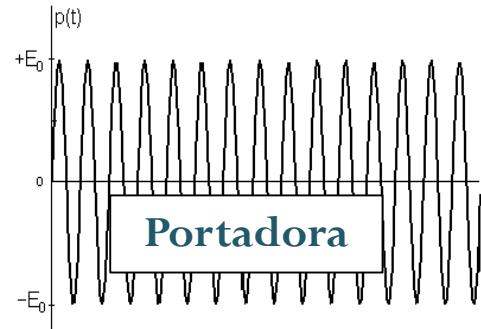
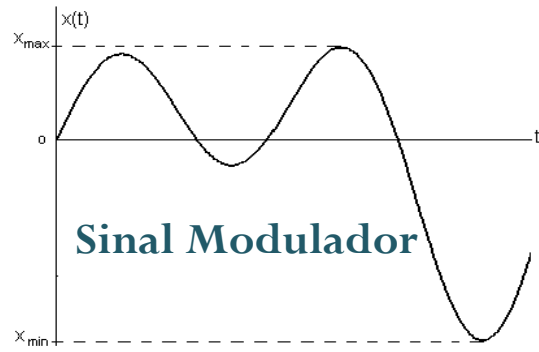
Ilustração das características do domínio do tempo (à esquerda) e do domínio da frequência (à direita) para modulações em amplitude padrão produzidas por um tom único. (a) Onda modulante. (b) Onda portadora. (c) Onda AM.

## 2. Modulação de Amplitude

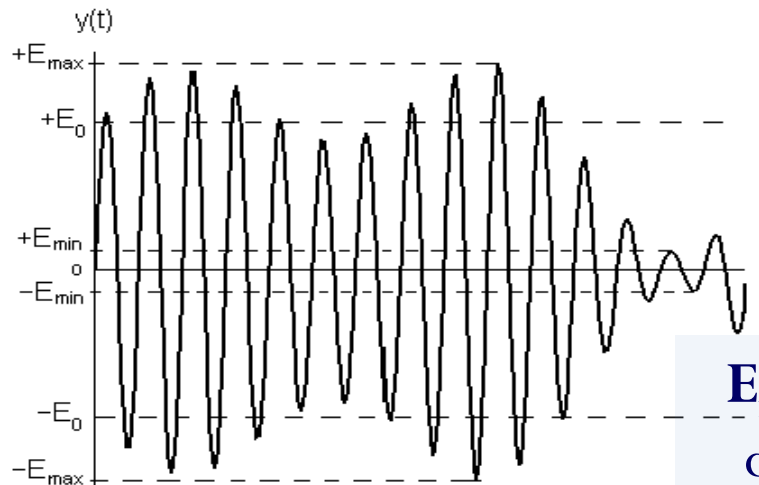
### 2d. Tipos de Modulação de Amplitude – **AM-DSB/TC**

Modulação de amplitude AM-DSB/TC no domínio do tempo

$$y(t) = E_0 \cos(2\pi f_0 t) + k_M x(t) \cos(2\pi f_0 t) = [E_0 + k_M x(t)] \cos(2\pi f_0 t)$$



Sinal  
Modulado



$$E_{\max} = E_0 + k_M x_{\max}$$

$$E_{\min} = E_0 + k_M x_{\min}$$

$E_{\min} \geq 0$ , para que não ocorra  
distorção do sinal modulado.

## 2. Modulação de Amplitude

### 2d. Tipos de Modulação de Amplitude – **AM-DSB/TC**

É definido como **Índice de Modulação de Amplitude** a variação relativa de amplitude do sinal modulante em relação à amplitude da portadora não modulada  $E_0$ .

$$m_+ = \frac{k_M |x_{\max}|}{E_0} \quad \text{Índice de modulação positiva (acima de } E_0 \text{).}$$

$$m_- = \frac{k_M |x_{\min}|}{E_0} \quad \text{Índice de modulação negativa (abaixo de } E_0 \text{).}$$

$K_m$ , é chamada de Constante de Modulação

## 2. Modulação de Amplitude

### 2d. Tipos de Modulação de Amplitude – **AM-DSB/TC**

$$\text{Se } m_- \text{ é } \leq 1 \rightarrow k_M |x_{\min}| \leq E_0 \text{ então } E_0 + k_M x_{\min} \geq 0$$

Isto significa que a envoltória superior do sinal modulado é a réplica do sinal modulador  $\mathbf{x}(t)$ , e a envoltória inferior do sinal modulado é a réplica invertida de  $\mathbf{x}(t)$ .

$$\text{Se } |x_{\min}| = |x_{\max}| = P :$$

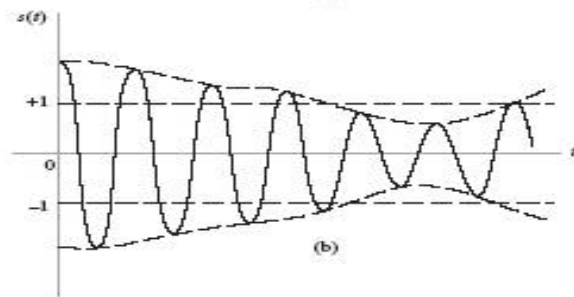
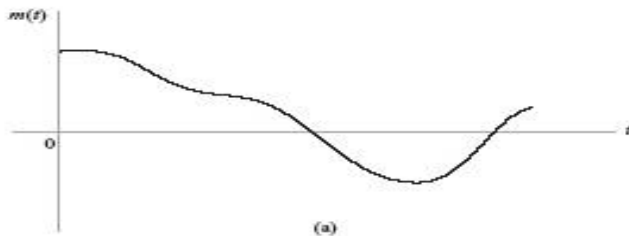
$$m_+ = m_- = m = \frac{k_M P}{E_0} = \frac{E_{\max} - E_{\min}}{E_{\max} + E_{\min}}$$



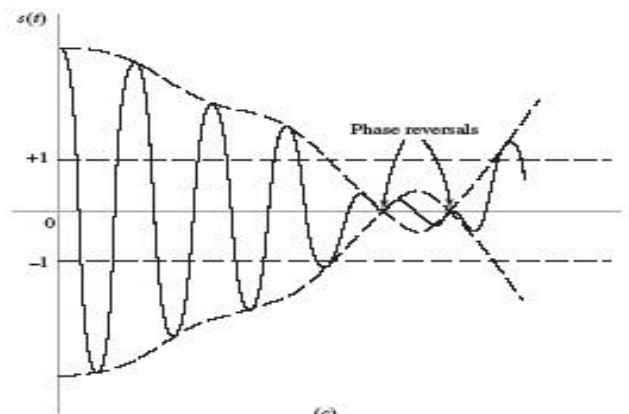
## 2. Modulação de Amplitude

### 2d. Tipos de Modulação de Amplitude – **AM-DSB/TC**

- Se  $m_- > 1 \rightarrow k_M |x_{\min}| > E_0$  então  $E_0 + k_M x_{\min} < 0$



$$m_- < 1$$



$$m_- > 1$$

Ocorre

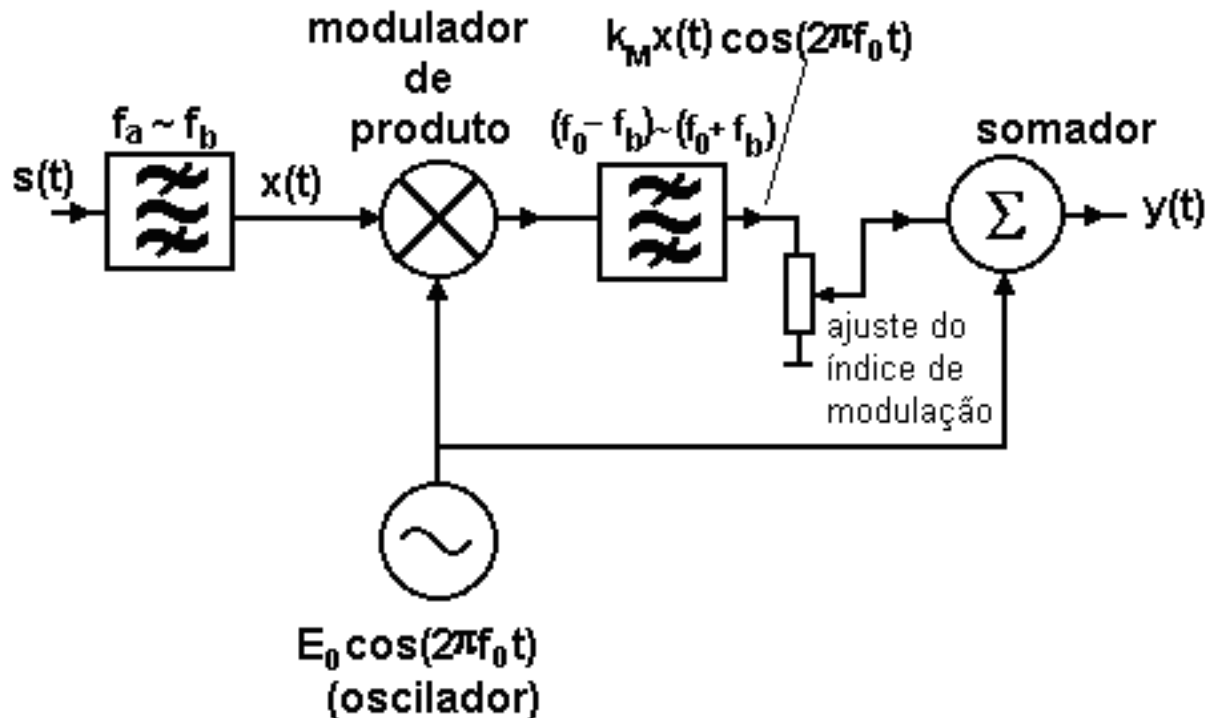
**Sobremodulação**

(distorção da envoltória)  
e as envoltórias superior  
e inferior deixam de ser  
réplicas do sinal  
modulador.

## 2. Modulação de Amplitude

### 2d. Tipos de Modulação de Amplitude – **AM-DSB/TC**

Quando a **Sobremodulação** ocorre é necessário fazer o ajuste do índice de modulação (ajustar  $k_M$ ).

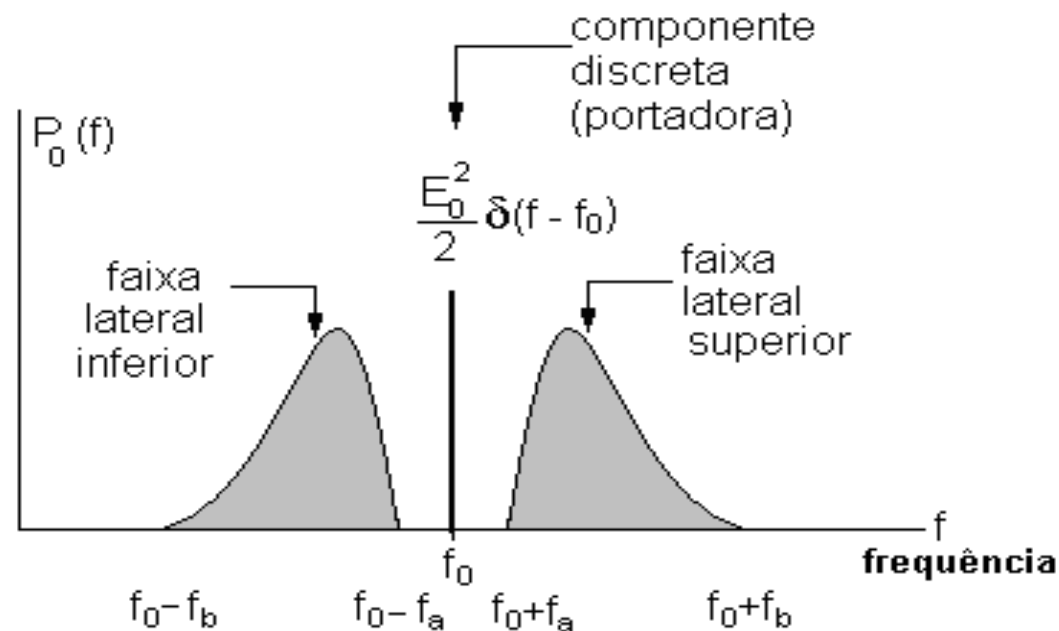


## 2. Modulação de Amplitude

### 2d. Tipos de Modulação de Amplitude – **AM-DSB/TC**

#### Espectro AM-DSB/TC

O espectro do sinal modulado AM-DSB/TC,  $y(t)$  corresponde a soma de uma componente espectral discreta – a **portadora** – e ao espectro contínuo composto pelas **duas faixas laterais**.



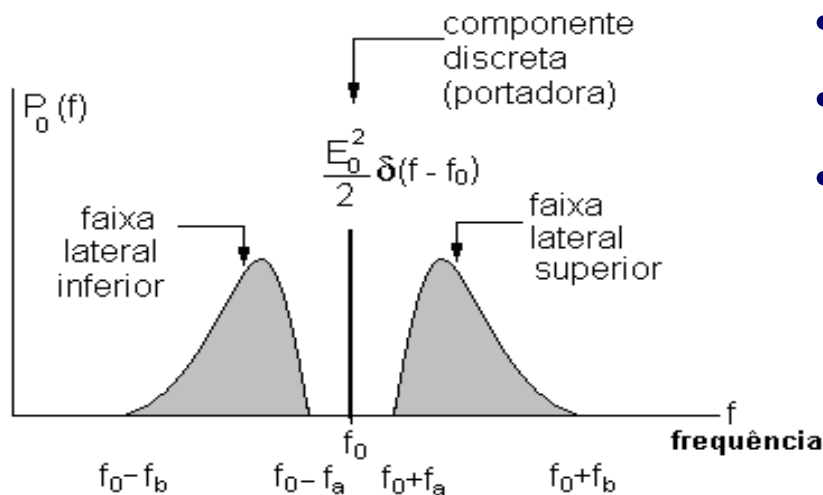
## 2. Modulação de Amplitude

### 2d. Tipos de Modulação de Amplitude – **AM-DSB/TC**

#### Espectro AM-DSB/TC

Considerações do sinal de banda base  $x(t)$ :

- Sinal de potência;
- sem componente CC (  $\overline{x(t)} = 0$  );
- espectro limitado ao intervalo ( $f_a \sim f_b$ )



O espectro do sinal modulado AM-DSB/TC ocupa o intervalo de frequências de  $(f_0 - f_b)$  até  $(f_0 + f_b)$ , com largura de faixa  $B = 2f_b$ .

## 2. Modulação de Amplitude

### 2d. Tipos de Modulação de Amplitude – **AM-DSB/TC**

Considere o sinal modulador:  $x(t) = A \cos(2\pi f_m t)$

$$|x_{\max}| = |x_{\min}| = A \longrightarrow m = \frac{k_m A}{E_0} \quad (\text{índice de modulação})$$

O sinal modulado é expresso em função do índice de modulação por:

$$y(t) = E_0 [1 + m \cos(2\pi f_m t)] \cos(2\pi f_0 t)$$

A amplitude de  $y(t)$  varia entre os valores máximos  $E_{\max} = E_0(1+m)$  e mínimo  $E_{\min} = E_0(1-m)$ , lembrando que  $m$  tem que ser  $\leq 1$  para que não ocorra distorsão. Multiplicando os termos de  $y(t)$  e aplicando a identidade trigonométrica  $\cos(a)\cos(b) = \frac{1}{2}[\cos(a-b) + \cos(a+b)]$  obtém-se

$$y(t) = E_0 \cos(2\pi f_0 t) + \frac{mE_0}{2} \cos[2\pi(f_0 - f_m)t] + \frac{mE_0}{2} \cos[2\pi(f_0 + f_m)t]$$

## 2. Modulação de Amplitude

### 2d. Tipos de Modulação de Amplitude – **AM-DSB/TC**

A situação mais simples da modulação AM-DSB/TC ocorre quando o sinal modulante  $x(t)$  é uma harmônica simples.

Se o sinal modulante  $x(t)$  for composto por uma somatória de componentes senoidais com amplitudes e frequências distintas conforme,

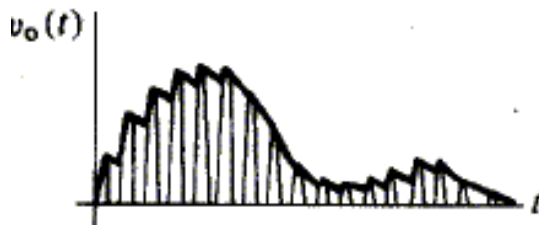
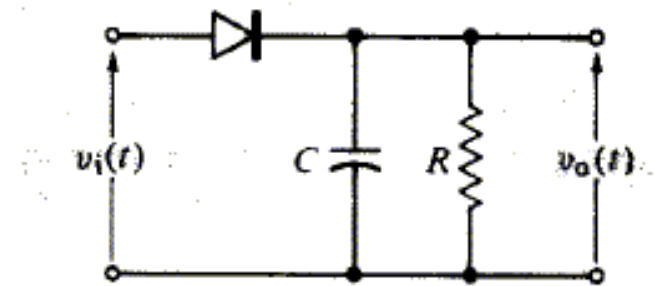
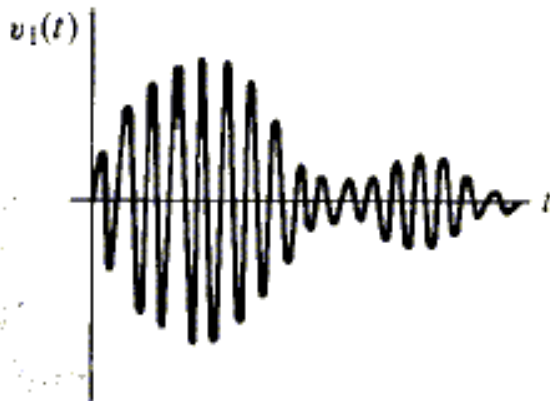
$$x(t) = A_1 \cos(2\pi f_1 t) + A_2 \cos(2\pi f_2 t) + \dots + A_n \cos(2\pi f_n t)$$

O sinal modulado  $y(t)$  será composta da soma dos produtos de modulação de cada uma das componentes individuais (cada componente produzirá duas raias laterais). Isto mostra que a *modulação de amplitude é um sistema linear* (simplifica a análise) o que permite trabalhar com componentes espectrais individuais e seus respectivos produtos de modulação.

## 2. Modulação de Amplitude

### 2d. Tipos de Modulação de Amplitude – **AM-DSB/TC**

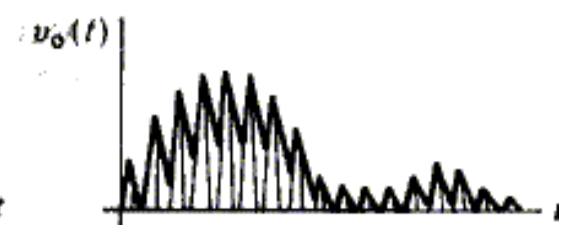
Desde que  $m \leq 1$  o sinal de banda base  $x(t)$  pode ser recuperado com um detector de envoltória



RC correto



RC muito grande



RC muito pequeno

## 2. Modulação de Amplitude

### 2d. Tipos de Modulação de Amplitude – **AM-DSB/TC**

#### **Vantagens:**

- Simplicidade de implementação do modulador e principalmente do demodulador.

#### **Desvantagens:**

- Desperdício de potência, devido ao fato de que a portadora é completamente independente do sinal modulador, assim, gasta-se potência para transmitir a portadora.
- Desperdício em largura de faixa devido ao fato de que não há a necessidade de transmitir ambas as bandas a fim de obtermos o sinal.



## 2. Modulação de Amplitude

### Modulação AM-DSB/TC - Exercícios

- 1) O transmissor de uma emissora de radiodifusão sonora (AM-DSB/TC) irradia uma potência média normalizada de 10KW com portadora não modulada e 11,25KW quando modulado por um sinal senoidal.
  - a) Determine o índice de modulação de amplitude produzido pelo sinal senoidal.
  - b) Se um segundo sinal senoidal de mesma frequência com amplitude correspondente a um índice de modulação de 40% é adicionado ao primeiro, qual será a potência total irradiada com os dois sinais moduladores senoidais somados?
  
- 2) Uma onda quadrada bipolar de 2,5kHz com 200mV de amplitude, modula em AM-DSB/TC uma portadora de 500kHz e amplitude de 5V com índice de modulação de 80%.
  - a) Qual a constante de modulação do modulador AM-DSB/TC?
  - b) Represente graficamente o sinal modulado obtido no domínio do tempo, indicando valores de tensão e tempo.
  - c) Represente o espectro de amplitude do sinal modulado no intervalo de 490 a 510kHz.
  - d) Qual é a potência do sinal modulado contida no intervalo de frequência acima dissipada em uma resistência de  $50\Omega$ ?

## 2. Modulação de Amplitude

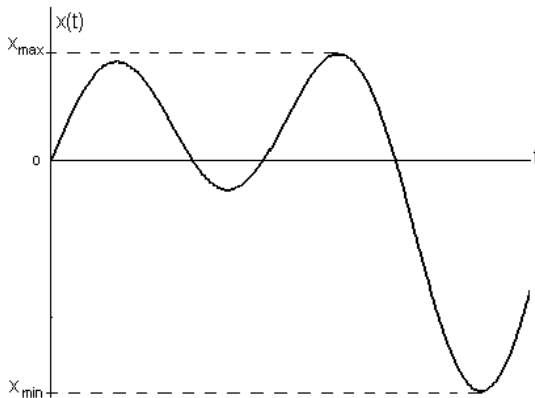
### 2d. Tipos de Modulação de Amplitude – **AM-DSB/SC**

**AM-DSB/SC** é a sigla em inglês para **Modulação de Amplitude – Dupla Faixa lateral/ Portadora Suprimida**.

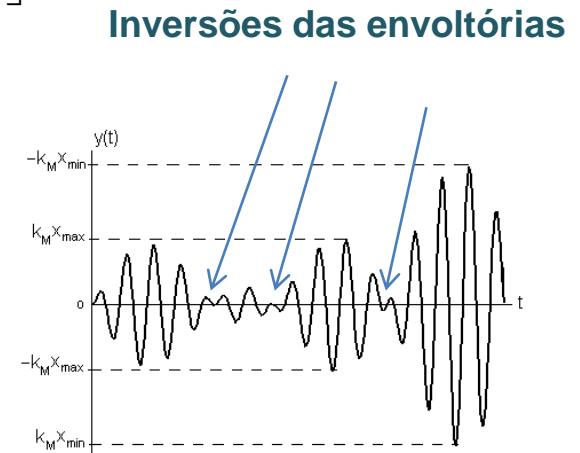
O sinal  **$y(t)$**  na saída do bloco modulador é:  $y(t) = k_M x(t) \cos(2\pi f_o t)$

$$\text{Se } x(t) = A \cos(2\pi f_m t) \longrightarrow y(t) = E_0 \cos(2\pi f_o t) m \cos(2\pi f_m t)$$

$$y(t) = \frac{mE_0}{2} \cos[2\pi(f_o - f_m)t] + \frac{mE_0}{2} \cos[2\pi(f_o + f_m)t]$$



Sinal modulador



Sinal modulado

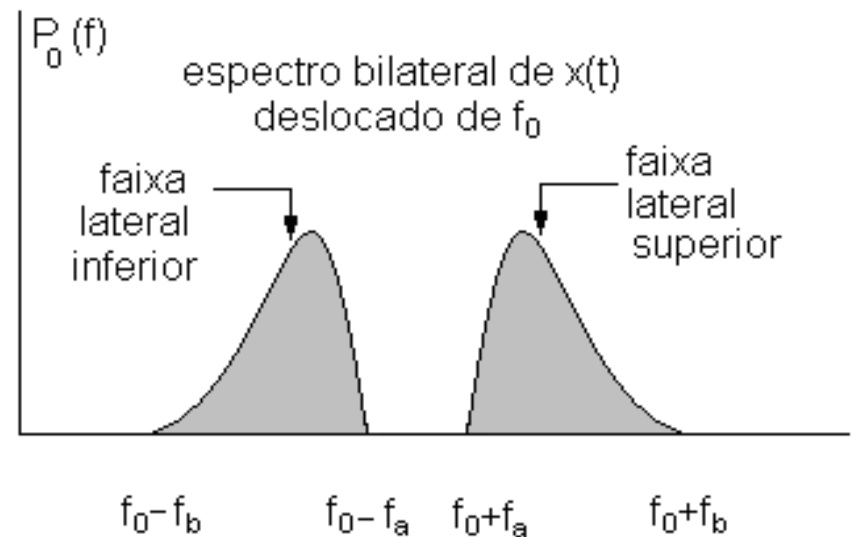
**Observe que quando o sinal banda base  $x(t)$  inverte a polaridade, as envoltórias superior e inferior se invertem.**

## 2. Modulação de Amplitude

### 2d. Tipos de Modulação de Amplitude – **AM-DSB/SC**

#### Espectro AM-DSB/SC

Assim como a modulação **AM-DSB/TC**, o espectro do sinal modulado na **AM-DSB/SC** é  $B = 2f_b$ . Porém, a vantagem que esta última modulação apresenta em relação a primeira é que não precisa desperdiçar potência transmitindo a portadora.

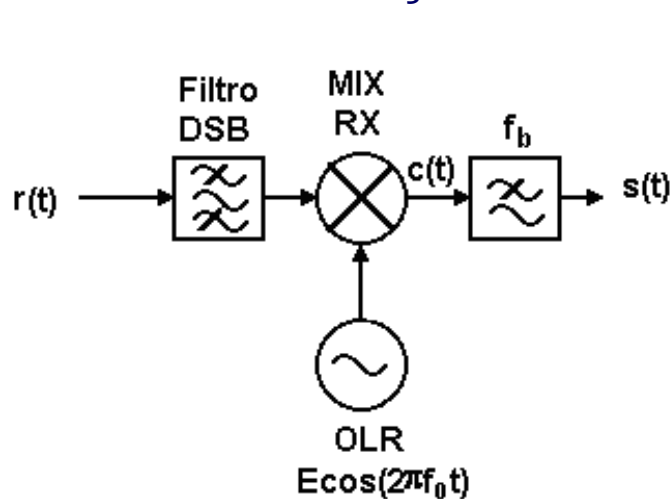


## 2. Modulação de Amplitude

### 2d. Tipos de Modulação de Amplitude – **AM-DSB/SC**

#### Demodulador AM-DSB/SC

Na modulação **AM-DSB/SC** a envoltória não é uma réplica do sinal modulador, logo não é possível demodular esse sinal usando um detector de envoltória. Neste caso é utilizado no bloco demodulador um processo de **deteção síncrona**, também chamada de **deteção coerente**.



$$r(t) = kx(t) \cos(2\pi f_0 t) \quad \text{com} \quad k = \frac{k_M}{a}$$

$a$  representa as perdas sofridas na propagação

**OLR** = Oscilador Local de Recepção: gera uma portadora

**MIX RX** = Misturador de Recepção: multiplica o sinal recebido com a portadora do OLR

Se a portadora da OLR for síncrona com a portadora da transmissão (mesma frequência e mesma fase), o sinal  $c(t)$  na saída do **MIX RX** é:

$$c(t) = k_R k x(t) \cos^2(2\pi f_0 t)$$

## 2. Modulação de Amplitude

### 2d. Tipos de Modulação de Amplitude – **AM-DSB/SC**

#### Demodulador AM-DSB/SC

$$c(t) = k_R k x(t) \cos^2(2\pi f_0 t)$$

Onde  $k_R$  é a constante do **MIX RX**. Aplicando a identidade trigonométrica

$$\cos^2(a) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos(2a),$$

$$c(t) = k_d x(t) + k_d x(t) \cos(2\pi 2f_0 t) \quad \text{onde} \quad k_d = \frac{k_R k}{2}$$

Passando o sinal **c(t)** por um filtro passa-baixa com freq. de corte  $f_b$  (maior frequência do sinal modulador **x(t)**), temos na saída:

$$s(t) = k_d x(t)$$

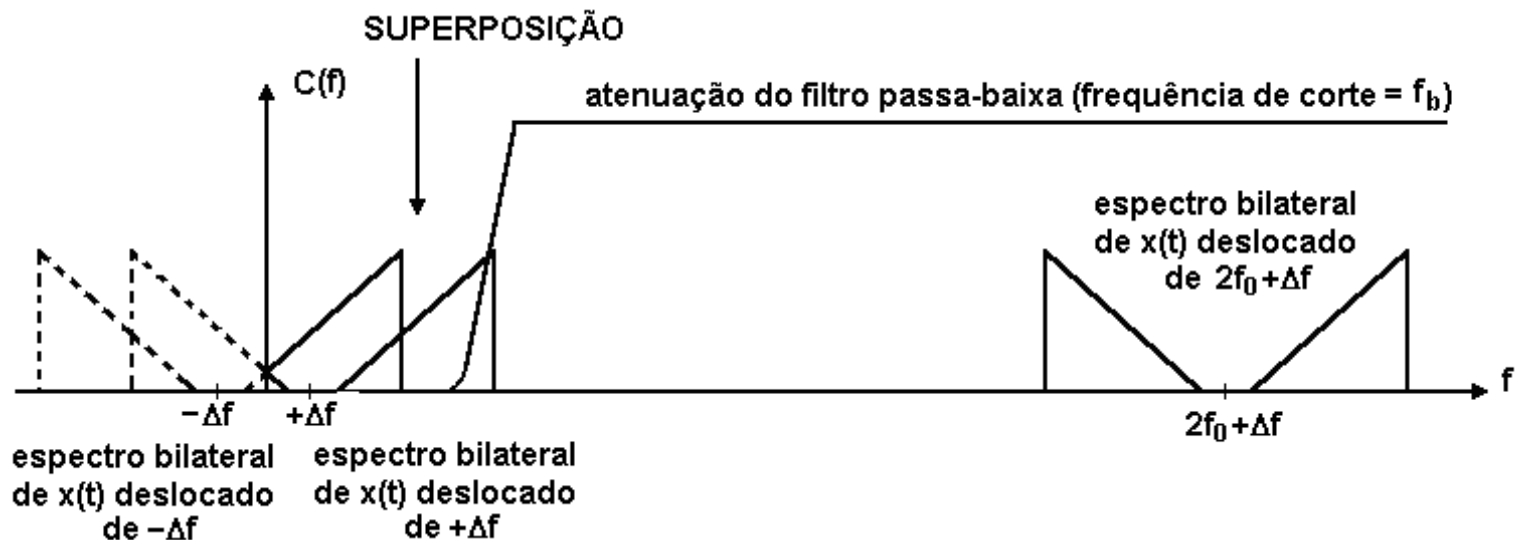
Se houver sincronismo entre as portadoras de transmissão e de recepção o formato do sinal na saída do demodulador é idêntico ao formato do sinal modulador **x(t)**.

## 2. Modulação de Amplitude

### 2d. Tipos de Modulação de Amplitude – **AM-DSB/SC**

#### Demodulador AM-DSB/SC

Se a portadora gerada pelo OLR possuir uma diferença de frequência  $\Delta f$  e/ou uma defasagem  $\phi$  em relação à portadora transmitida, o sinal na saída do filtro será distorcido.



**Ocorre superposição dos espectros deslocados de  $\pm \Delta f$  dentro da banda de passagem do filtro.**

## 2. Modulação de Amplitude

### 2d. Tipos de Modulação de Amplitude – **AM-DSB/SC**

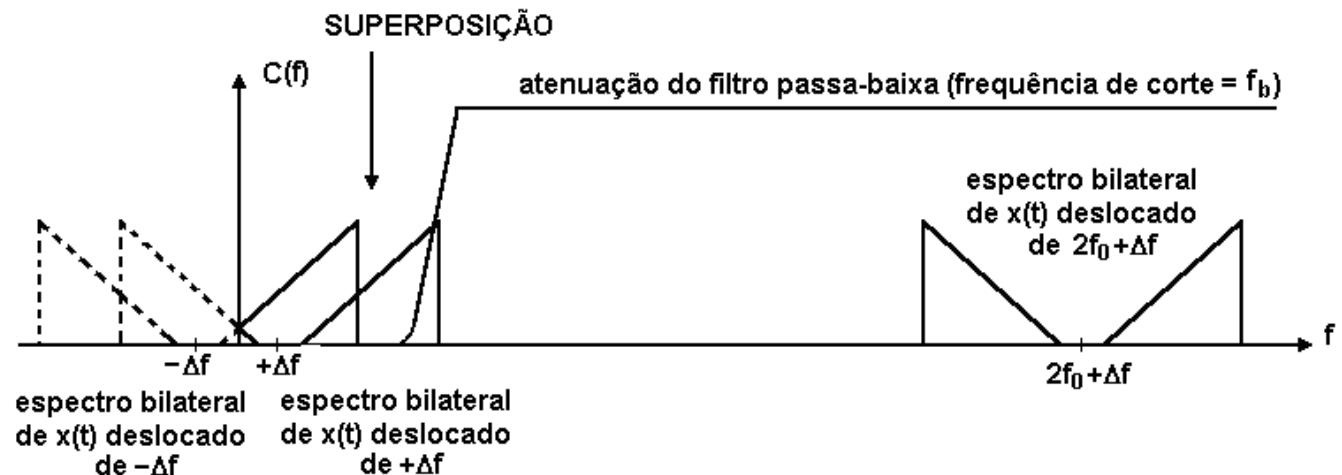
#### Demodulador AM-DSB/SC

Seja a portadora da OLR  $E \cos[2\pi(f_0 + \Delta f)t]$

O sinal **c(t)** na saída do **MIX RX** é dado por:

$$c(t) = \underbrace{k_d x(t) \cos(2\pi \Delta f t)} + k_d x(t) \cos[2\pi(2f_0 + \Delta f)t]$$

Sinal **x(t)** centrado nas  
frequências  $\pm \Delta f$



## 2. Modulação de Amplitude

### 2d. Tipos de Modulação de Amplitude – **AM-DSB/SC**

#### Demodulador AM-DSB/SC

Seja agora a portadora da OLR com uma defasagem em relação à portadora transmitida

$$E \cos(2\pi f_0 t + \phi)$$

O sinal na saída do MIX RX é dado por:  $c(t) = k_d x(t) \cos(\phi) + k_d x(t) \cos(2\pi 2f_0 t + \phi)$

O sinal na saída do filtro passa-baixa é:  $s(t) = k_d x(t) \cos(\phi)$

Se  $\phi$  é constante o sinal é atenuado, podendo até se anulado, pois  $|\cos(\phi)| \leq 1$

Se  $\phi = \phi(t)$ , o sinal na saída é distorcido .

A solução é garantir o sincronismo entre as portadoras de transmissão e de recepção através de métodos de sincronização

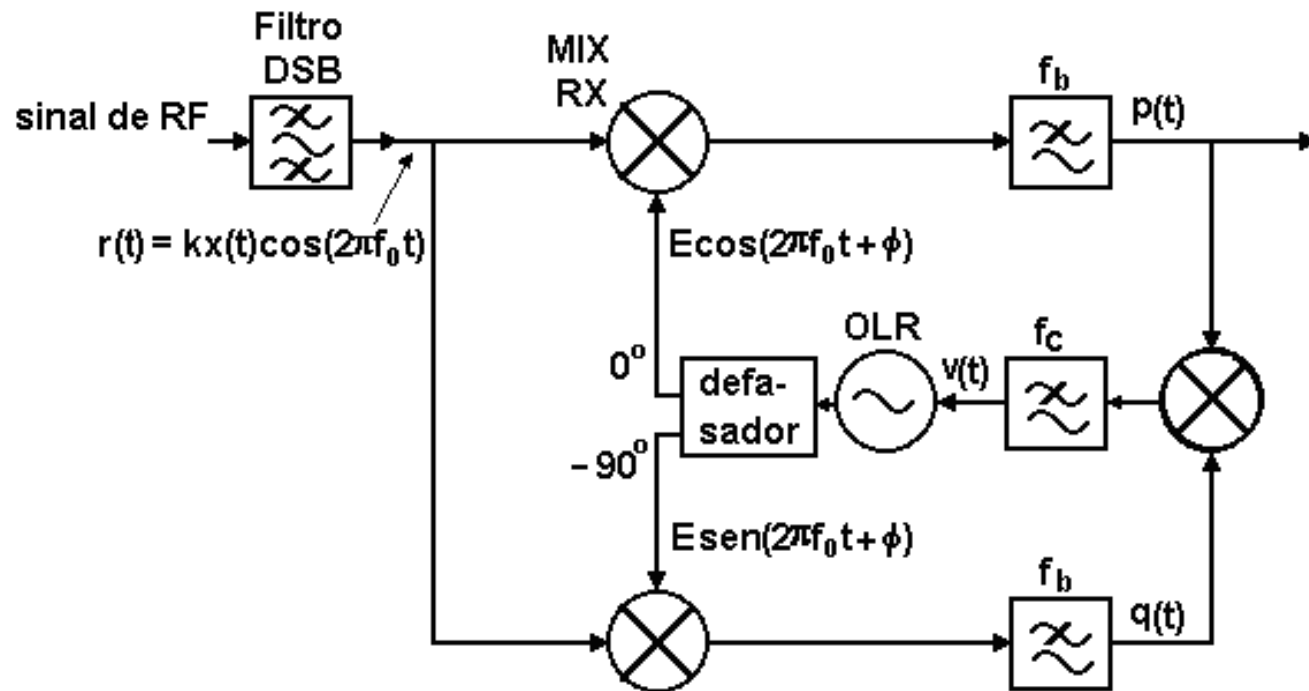


## 2. Modulação de Amplitude

### 2d. Tipos de Modulação de Amplitude – **AM-DSB/SC**

#### Método de Sincronização Costas Loop

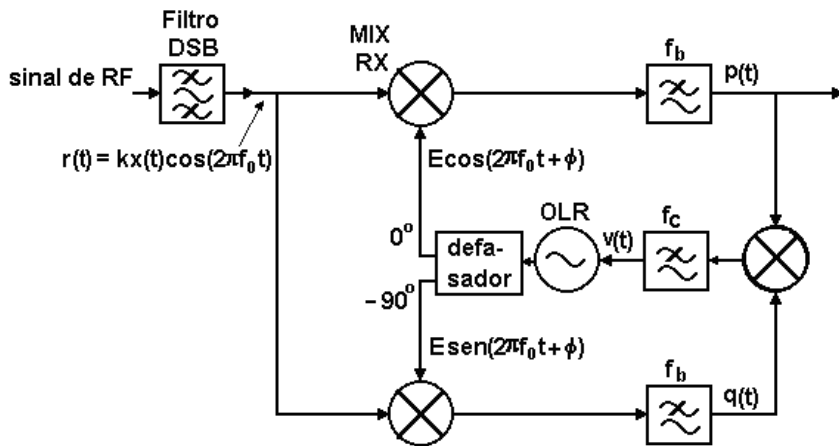
#### PLL – Phase Locked Loop



## 2. Modulação de Amplitude

### 2d. Tipos de Modulação de Amplitude – **AM-DSB/SC**

#### Método de Sincronização Costas Loop



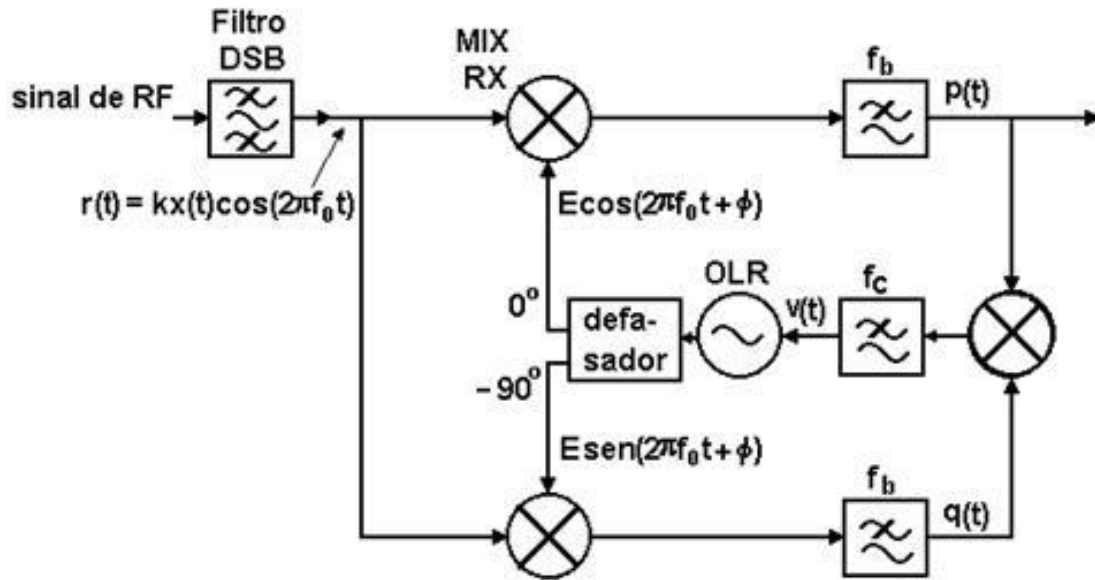
- Consiste de dois detectores coerentes alimentados com o mesmo sinal  $r(t)$ , mas com sinais individuais do oscilador local que estão em quadratura de fase.
- A frequência do oscilador local é ajustada para ter a mesma frequência da portadora transmitida  $f_0$ .
- Esses dois detectores são acoplados para formar um sistema de realimentação negativa projetado de forma a manter o oscilador local síncrono com a portadora.

**Para entender o funcionamento vamos chamar o detector superior de I e o inferior de Q , e definir as funções na saída de cada bloco.**

## 2. Modulação de Amplitude

### 2d. Tipos de Modulação de Amplitude – **AM-DSB/SC**

#### Método de Sincronização Costas Loop



$$r(t) = kx(t) \cos(2\pi f_0 t)$$

$$E \cos(2\pi f_0 t + \phi)$$

$\phi$  é a defasagem entre as portadoras do modulador e do demodulador

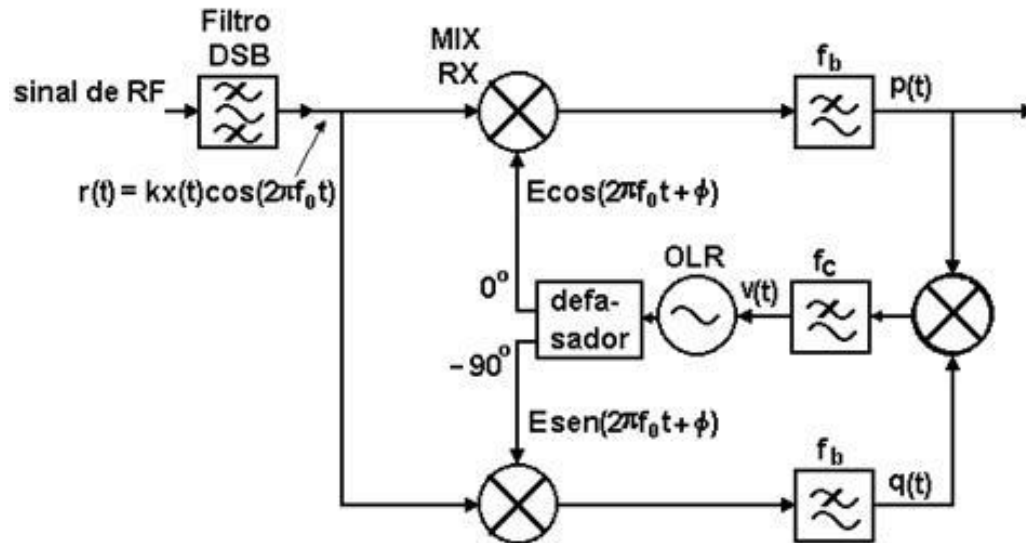
$$p(t) = k_d x(t) \cos(\phi) + k_d x(t) \cos(2\pi 2f_0 t + \phi) \quad \text{Sinal na saída do MIX RX do detector I}$$

$$q(t) = k_d x(t) \sin(\phi) + k_d x(t) \sin(2\pi 2f_0 t + \phi) \quad \text{Sinal na saída do MIX RX do detector Q}$$

## 2. Modulação de Amplitude

### 2d. Tipos de Modulação de Amplitude – **AM-DSB/SC**

#### Método de Sincronização Costas Loop



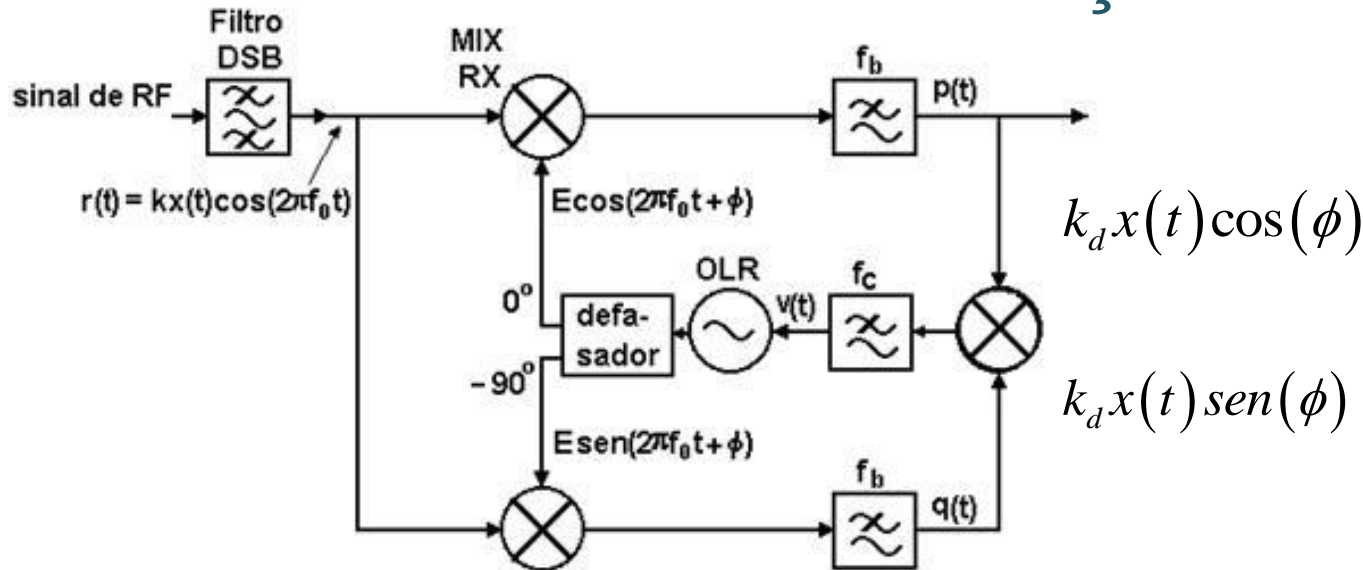
$$p(t) = k_d x(t) \cos(\phi) + k_d x(t) \cos(2\pi 2f_0 t + \phi) \quad q(t) = k_d x(t) \sin(\phi) + k_d x(t) \sin(2\pi 2f_0 t + \phi)$$

Os sinais nas saídas dos filtros **I** e **Q** são, respectivamente,

$$k_d x(t) \cos(\phi) \quad \text{e} \quad k_d x(t) \sin(\phi)$$

## 2. Modulação de Amplitude

### 2d. Tipos de Modulação de Amplitude – **AM-DSB/SC** Método de Sincronização Costas Loop



Se  $\phi = 0$ , a saída do detector I é  $k_d x(t)$  (sinal desejado), e a saída de do detector Q é nula.

Se  $\phi$  é ligeiramente maior que zero, os sinais nas saídas dos detectores I e Q serão multiplicados e passados por um filtro, resultando em uma tensão de controle  $v(t)$  que irá controlar o oscilador controlado por tensão (VCO). A fase da portadora gerada no VCO é uma função da tensão de alimentação  $v(t)$ .

## 2. Modulação de Amplitude

### 2d. Tipos de Modulação de Amplitude – **AM-SSB/SC**

**AM-SSB/SC** é a sigla em inglês para Modulação de Amplitude – **Faixa lateral única/ Portadora Suprimida**. Neste método somente a banda lateral superior ou inferior é transmitida.

Para o sinal modulador  $\mathbf{x(t) = A\cos(2\pi f_m t)}$ , o sinal modulado  $\mathbf{y(t)}$  na saída do modulador é:

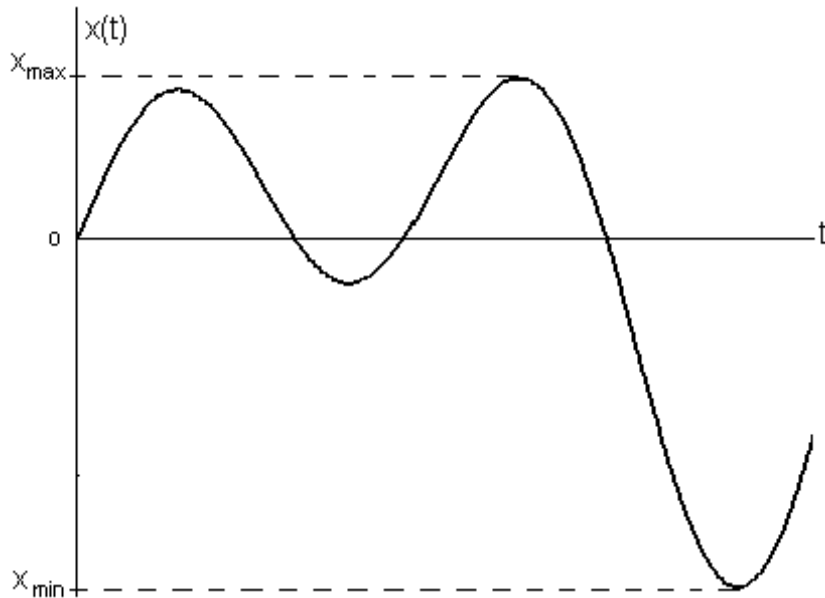
$$y(t) = \frac{k_M A}{2} \cos[2\pi(f_0 + f_m)t] \quad \text{Faixa lateral superior selecionada}$$

$$y(t) = \frac{k_M A}{2} \cos[2\pi(f_0 - f_m)t] \quad \text{Faixa lateral inferior selecionada}$$

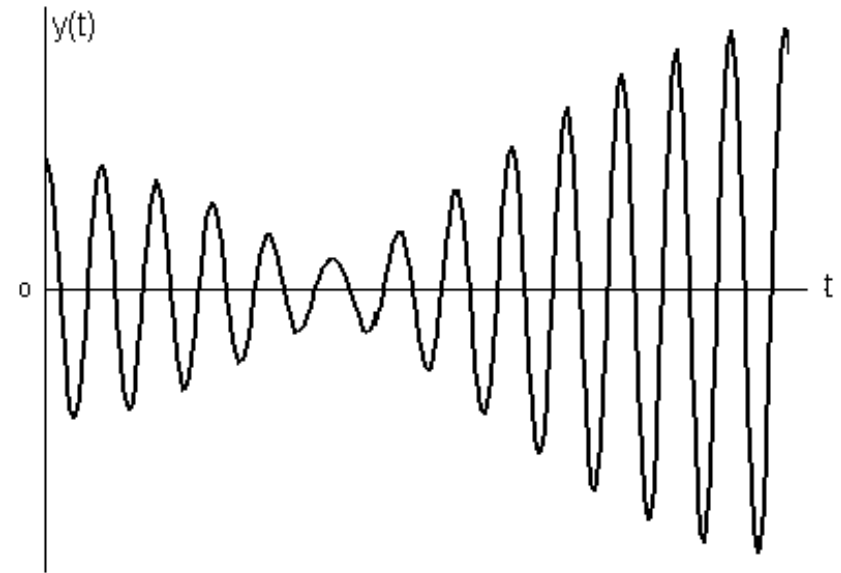
## 2. Modulação de Amplitude

### 2d. Tipos de Modulação de Amplitude – **AM-SSB/SC**

A envoltória do sinal modulado AM-SSB/SC **não** guarda **semelhança** com o sinal modulador.



**Sinal modulador**

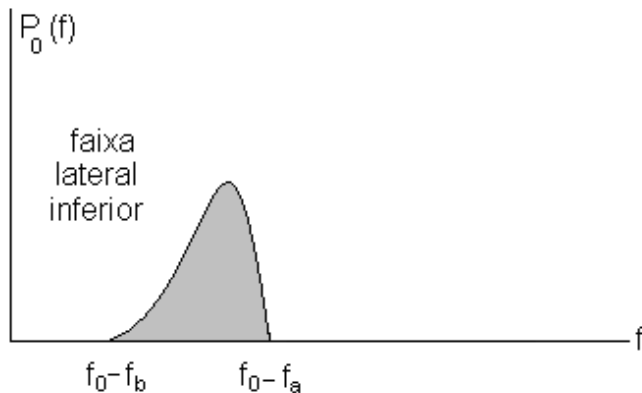


**Sinal modulado AM-SSB/SC  
com faixa lateral superior  
transmitida**

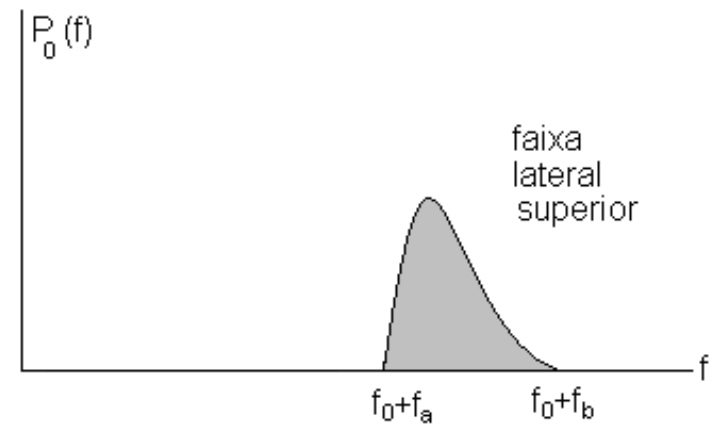
## 2. Modulação de Amplitude

### 2d. Tipos de Modulação de Amplitude – **AM-SSB/SC**

O espectro do sinal modulado em AM-SSB/SC contém somente uma das bandas laterais, a inferior ou superior. A largura de banda do sinal modulado é igual a banda do sinal modulador.



**Faixa lateral inferior  
transmitida**



**Faixa lateral superior  
transmitida**

$$B_w = f_b - f_a$$



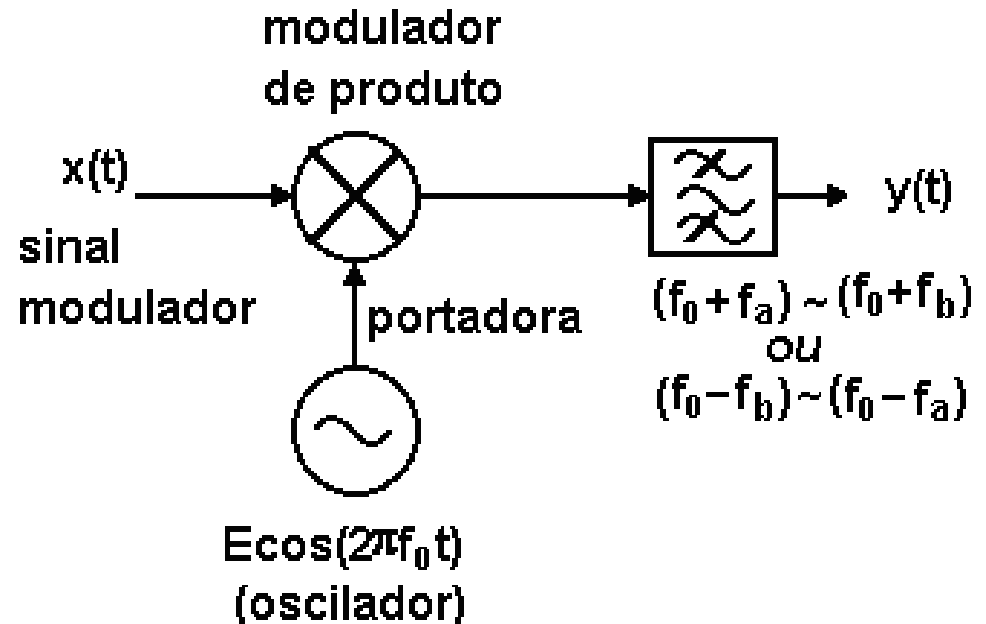
## 2. Modulação de Amplitude

### 2d. Tipos de Modulação de Amplitude – **AM-SSB/SC**

#### Modulador AM-SSB/SC por filtragem

- É a forma mais simples de implementação de um modulador.

- $f_a$  – menor freq. de  $x(t)$
- $f_b$  – maior freq. de  $x(t)$
- $f_p = f_0$  – Freq. da portadora



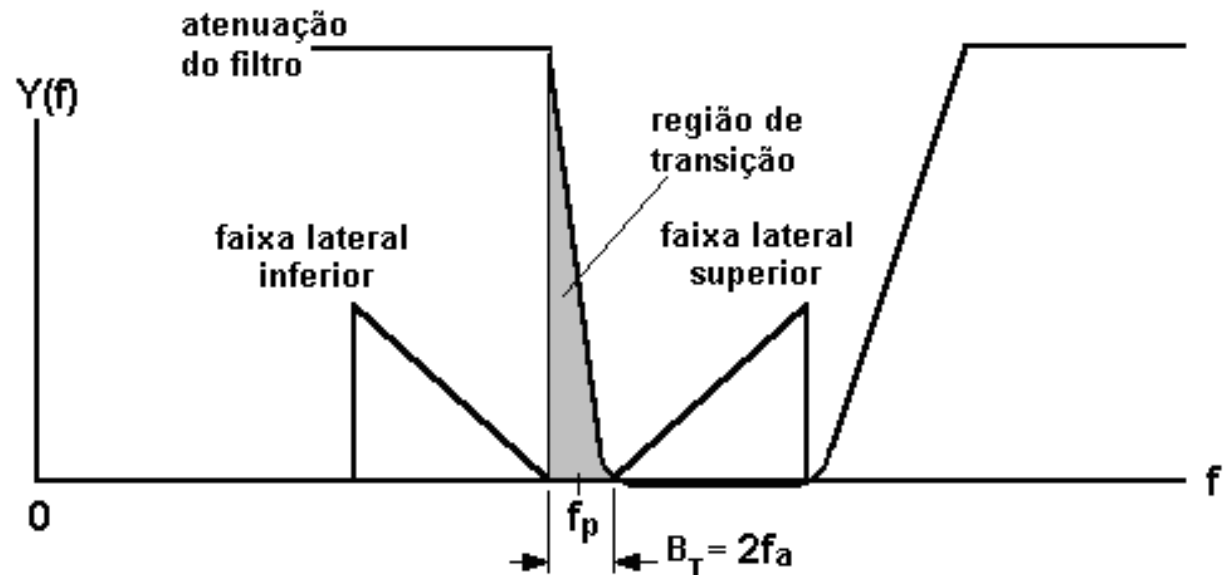
## 2. Modulação de Amplitude

### 2d. Tipos de Modulação de Amplitude – **AM-SSB/SC**

#### **Modulador AM-SSB/SC por filtragem**

- O desafio neste modulador é implementar o filtro SSB.
- O **fator de qualidade** nestes filtros  $Q$ , é a relação entre a frequência central da região de transição (frequência da portadora) e a largura da faixa de transição ( $2f_a$ ).

$$Q = \frac{f_p}{2f_a}$$

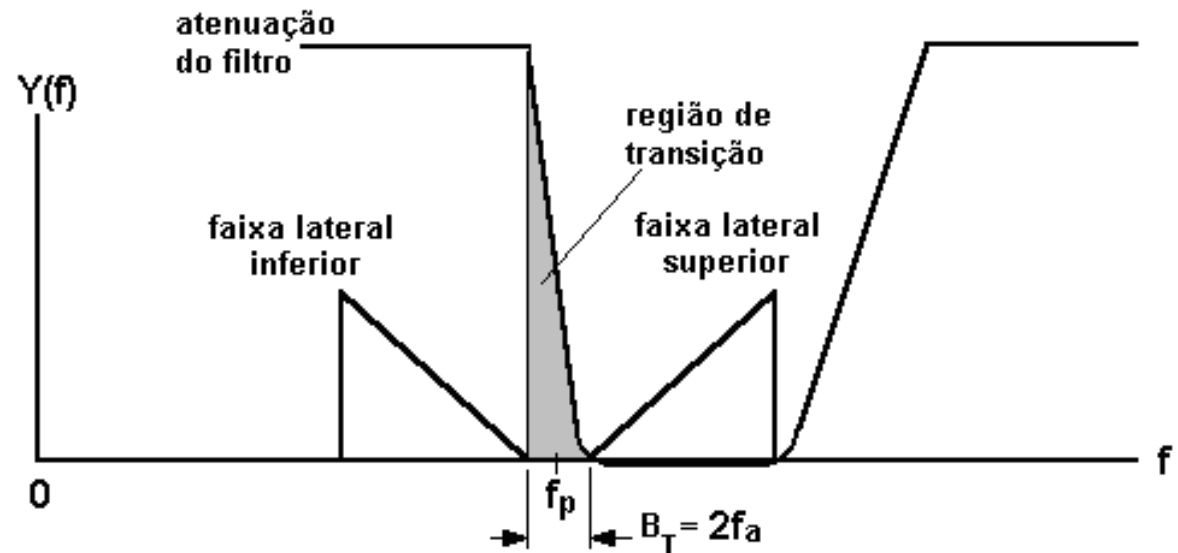


## 2. Modulação de Amplitude

### 2d. Tipos de Modulação de Amplitude – **AM-SSB/SC**

#### Modulador AM-SSB/SC por filtragem

$$Q = \frac{f_p}{2f_a}$$



$$Q_{\max} \geq \frac{f_p}{2f_a}$$

$$f_p \geq f_b$$

$$f_b \leq f_p \leq 2f_a Q_{\max}$$

## 2. Modulação de Amplitude

### 2d. Tipos de Modulação de Amplitude – **AM-SSB/SC**

#### **Modulador AM-SSB/SC por filtragem**

- Como  $f_a$  é geralmente muito menor do que  $f_p$  (portadora), o limite de viabilidade econômica do filtro  $Q_{\max}$  fica difícil de ser atendido.
- Quando a condição de  $Q_{\max}$  do filtro não pode ser atendida a solução é utilizar um processo de dupla conversão, composto de dois estágios.

## 2. Modulação de Amplitude

### 2d. Tipos de Modulação de Amplitude – **AM-SSB/SC**

#### Modulador AM-SSB/SC por filtragem

**Exemplo:** Deseja-se transmitir o sinal  $x(t)$  com espectro de  $f_a = 0,3$  kHz a  $f_b = 3,4$  kHz, modulado em **AM-SSB/SC** com portadora com frequência  $f_p = 2$  MHz. A viabilidade técnica/econômica do filtro é  $Q_{\max} = 50$ .

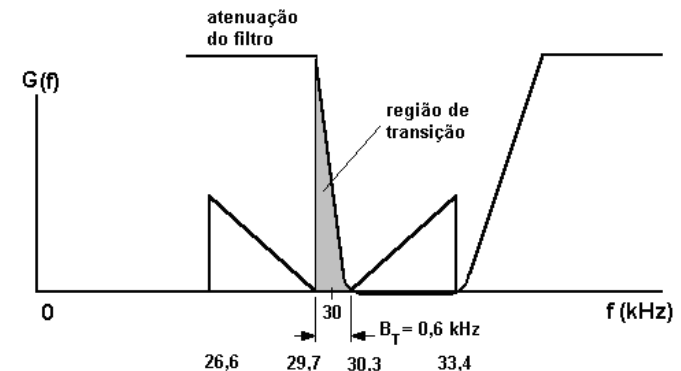
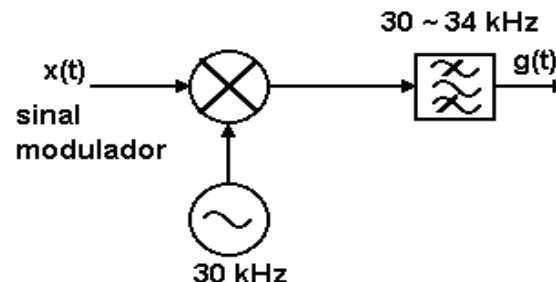
$$2 \times 0,3 \text{ kHz} \times 50 = 30 \text{ kHz}$$

A condição de  $f_p \leq 2f_a Q_{\max}$  não é atendida, mas a condição de  $f_b \leq f_p$  é atendida.

No Primeiro estágio deverá ser construído um produto modulador com portadora que atenda a condição de  $f_b \leq f_p \leq 2f_a Q_{\max}$  em série com um filtro SSB

$$3,4 \text{ kHz} \leq f_p \leq 30 \text{ kHz}$$

$$Q_1 = \frac{30 \text{ kHz}}{0,6 \text{ kHz}} = 50$$



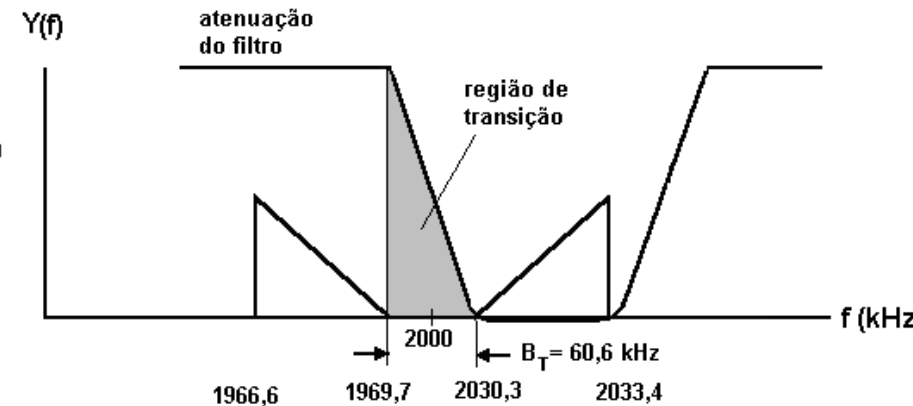
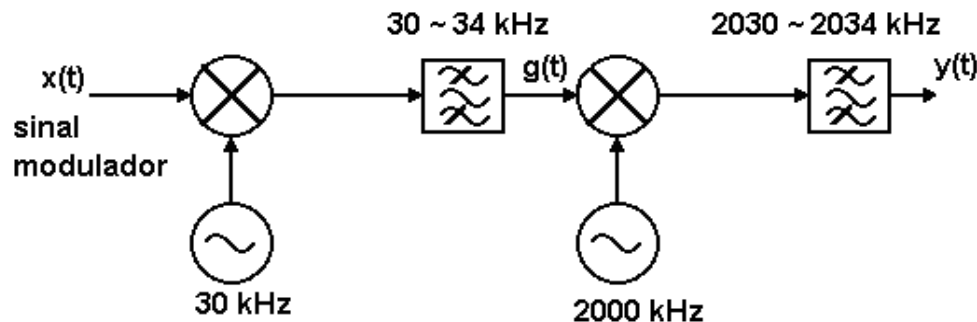
## 2. Modulação de Amplitude

### 2d. Tipos de Modulação de Amplitude – **AM-SSB/SC**

#### Modulador AM-SSB/SC por filtragem

**Exemplo (cont.):** No segundo estágio é montado um outro modulador de produto com a portadora desejada, em série com outro filtro SSB. O fator de qualidade do filtro neste estágio deve atender a condição:

$$Q \leq Q_{\max}$$



$$Q_2 = \frac{2000 \text{ kHz}}{60,6 \text{ kHz}} = 33 < Q_{\max}$$

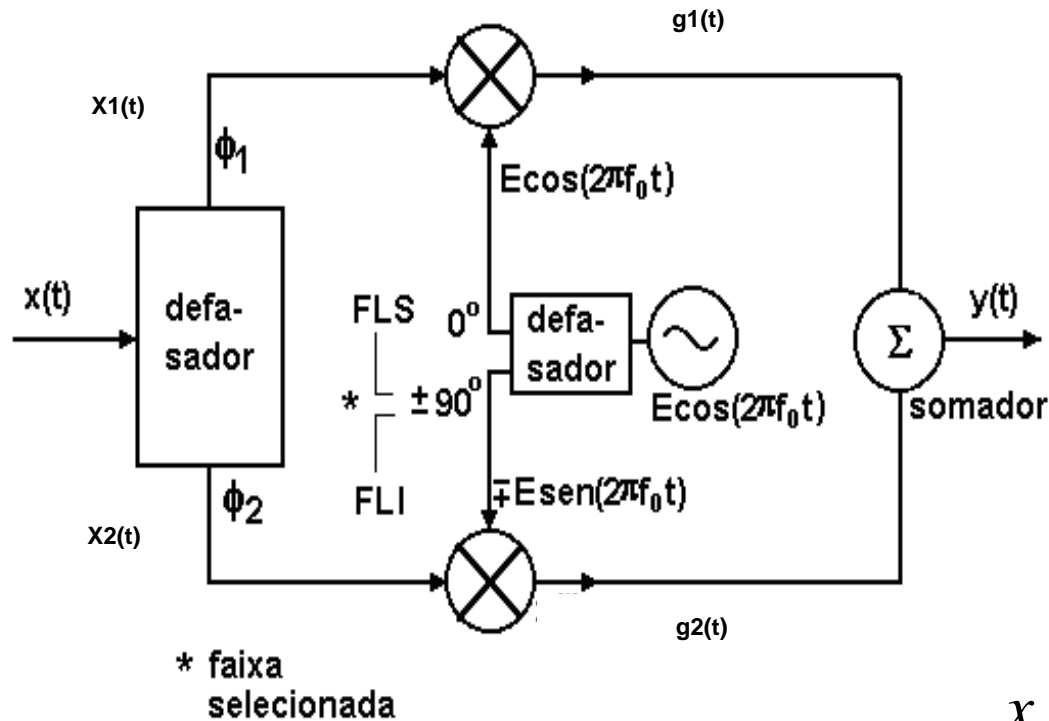
A condição de  $Q_{\max}$  é atendida.

## 2. Modulação de Amplitude

### 2d. Tipos de Modulação de Amplitude – **AM-SSB/SC**

#### Modulador AM-SSB/SC por Desvio de Fase

Para evitar as dificuldades da filtragem na geração do sinal AM-SSB/SC idealizou-se o método de **deslocamento de fase** (*Transformada Hilbert*). Para  $x(t) = A \cos(2\pi f_m t)$



$$x_1(t) = A \cos(2\pi f_m t)$$

Se a condição de  $\phi_1 - \phi_2 = 90^\circ$  for atendida, temos:

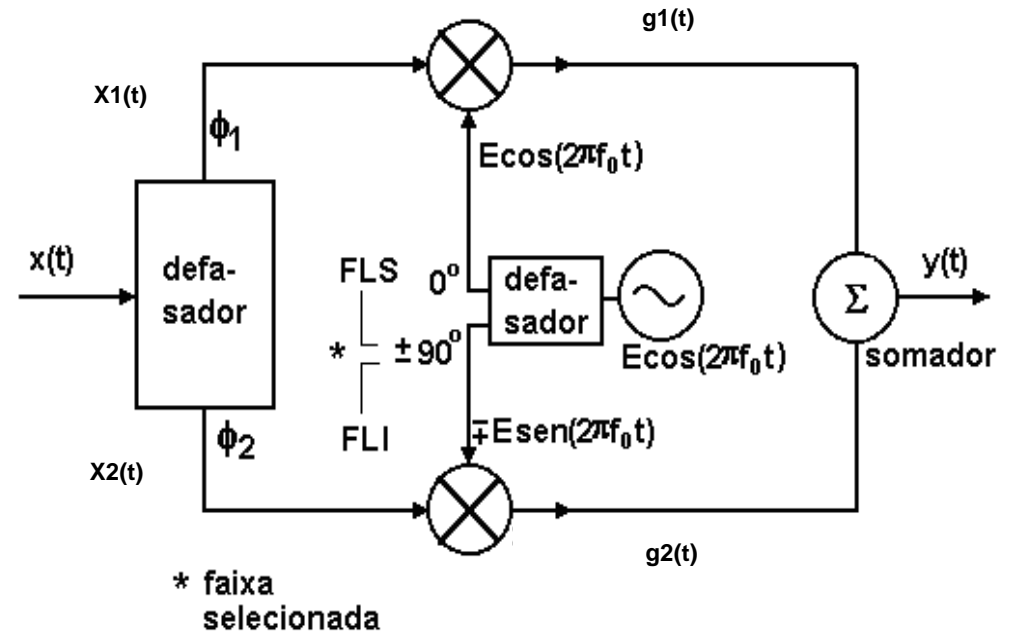
$$x_2(t) = A \sin(2\pi f_m t)$$

## 2. Modulação de Amplitude

### 2d. Tipos de Modulação de Amplitude – **AM-SSB/SC**

#### Modulador AM-SSB/SC por Desvio de Fase

Na saída dos multiplicadores são gerados dois sinais **AM-DSB/SC**



$$g_1(t) = k_m A \cos(2\pi f_m t) \cos(2\pi f_0 t)$$

$$g_2(t) = \pm k_m A \sin(2\pi f_m t) \sin(2\pi f_0 t)$$



## 2. Modulação de Amplitude

### 2d. Tipos de Modulação de Amplitude – **AM-SSB/SC**

#### Modulador AM-SSB/SC por Desvio de Fase

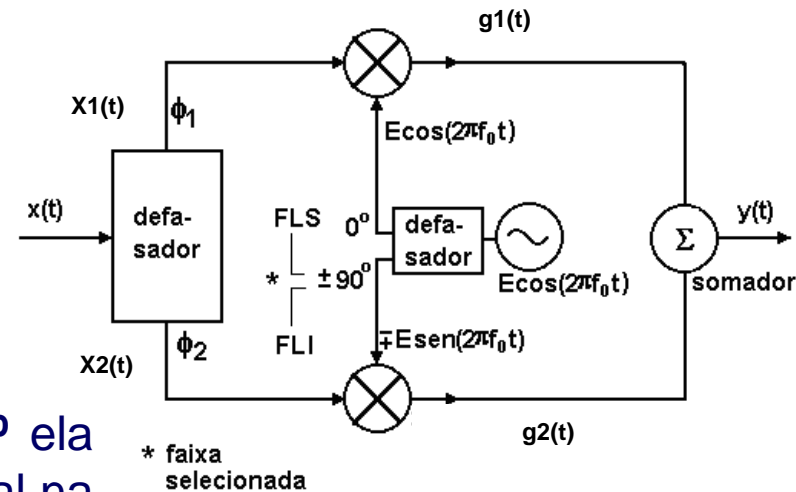
$$g_1(t) = k_m A \cos(2\pi f_m t) \cos(2\pi f_0 t)$$

$$g_2(t) = \pm k_m A \sin(2\pi f_m t) \sin(2\pi f_0 t)$$

- Se a portadora sofrer uma defasagem de **+90°** ela será  $-E_0 \sin(2\pi f_0 t)$  e  **$g_2(t)$**  será negativo. O sinal na saída do somador será:

$$y(t) = g_1(t) - g_2(t) =$$

$$k_m A \cos(2\pi f_m t) \cos(2\pi f_0 t) - k_m A \sin(2\pi f_m t) \sin(2\pi f_0 t) = k_m A \cos(2\pi (f_0 + f_m) t)$$



**Seleciona a faixa lateral superior**

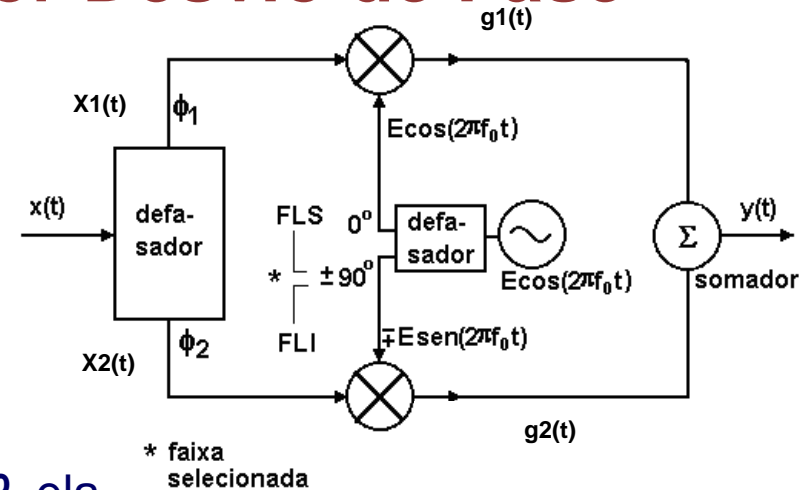
## 2. Modulação de Amplitude

### 2d. Tipos de Modulação de Amplitude – **AM-SSB/SC**

#### Modulador AM-SSB/SC por Desvio de Fase

$$g_1(t) = k_m A \cos(2\pi f_m t) \cos(2\pi f_0 t)$$

$$g_2(t) = \pm k_m A \sin(2\pi f_m t) \sin(2\pi f_0 t)$$



- Se a portadora sofrer uma defasagem de **-90°** ela será  $E_0 \sin(2\pi f_0 t)$  e  **$g_2(t)$**  será positivo. O sinal na saída do somador será:

$$y(t) = k_m A \cos(2\pi (f_0 - f_m) t)$$

**Seleciona a faixa lateral Inferior**

## 2. Modulação de Amplitude

### 2d. Tipos de Modulação de Amplitude – **AM-SSB/SC**

#### Demodulação AM-SSB/SC

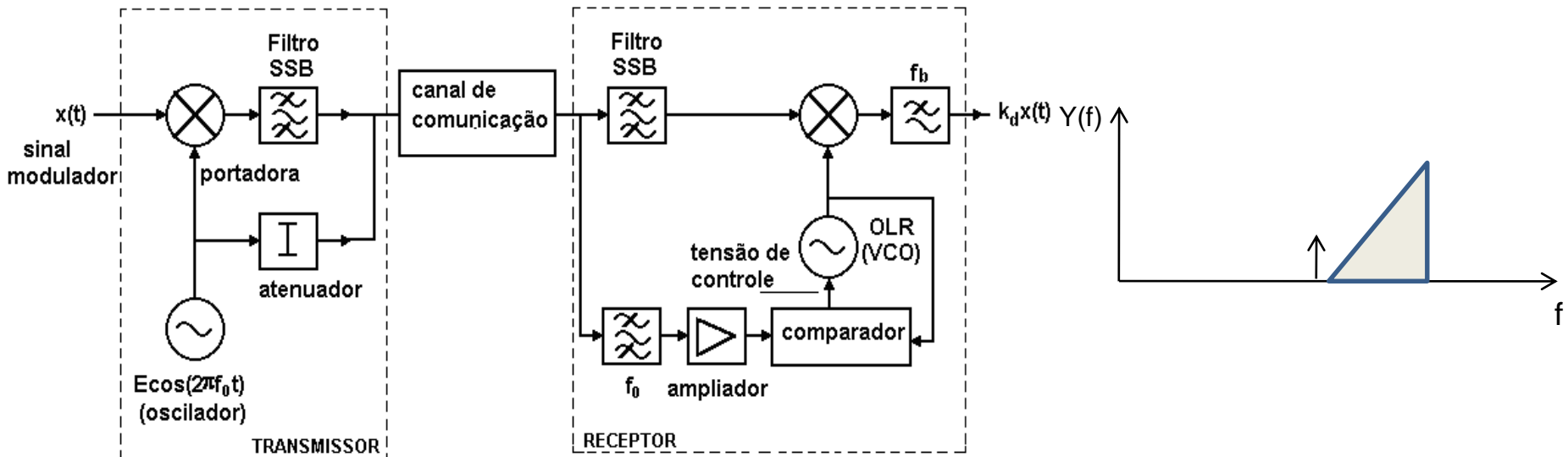
- A demodulação **AM-SSB/SC**, da mesma forma que na demodulação **AM-DSB/SC**, só pode ser feita **por detecção síncrona**. Isto significa que deve haver sincronismo (mesma frequência e mesma fase) entre as portadoras da transmissão e da recepção.
- Porém, as técnicas empregadas na detecção síncrona do sinal **AM-DSB/SC** (por exemplo o Loop de Costas) não podem ser aplicadas na demodulação do sinal **AM-SSB/SC**.
- Para detecção síncrona de sinal com modulação **AM-SSB/SC** são utilizadas as técnicas de **Portadora Piloto** e **Oscilador de Alta Estabilidade**.

## 2. Modulação de Amplitude

### 2d. Tipos de Modulação de Amplitude – **AM-SSB/SC**

#### Demodulação **AM-SSB/SC** – por Portadora Piloto

Neste método insere-se , junto com a faixa lateral desejada, uma amostra atenuada da portadora. No receptor essa portadora piloto é separada por filtragem e utilizada para sincronizar o oscilador local de recepção



A modulação que utiliza esta técnica é chamada de **AM-SSB/RC** onde o **RC** significa portadora reduzida.

## 2. Modulação de Amplitude

### 2d. Tipos de Modulação de Amplitude – **AM-SSB/SC**

#### **Demodulação AM-SSB/SC – Oscilador de Alta Estabilidade**

- O uso de uma portadora piloto para cada sinal se torna inviável quando se tem multiplexação por divisão de frequência FDM, pois aumentaria a potência total transmitida além de propiciar a interferência com outros sinais do sistema.
- A solução é utilizar um **oscilador mestre** (oscilador a cristal de quartzo com alta estabilidade em frequência) no circuito modulador. Todas as portadoras de transmissão são geradas pelo **oscilador mestre**, que também gera uma única **portadora piloto de sincronismo** que será transmitida.
- 
- Na recepção a portadora piloto é utilizada para sincronizar o **oscilador mestre de recepção**, para garantir que este reproduza portadoras em sincronismo com as portadoras geradas no **oscilador mestre de transmissão**.

### 3. Aplicação em Radiodifusão

Devido à facilidade e a simplicidade dos moduladores e demoduladores AM-DSB/TC o Serviço de Radiodifusão Sonora AM em ondas médias adotou este modelo de modulação.

Modulação **AM-DSB/TC**, com  $m \leq 100\%$

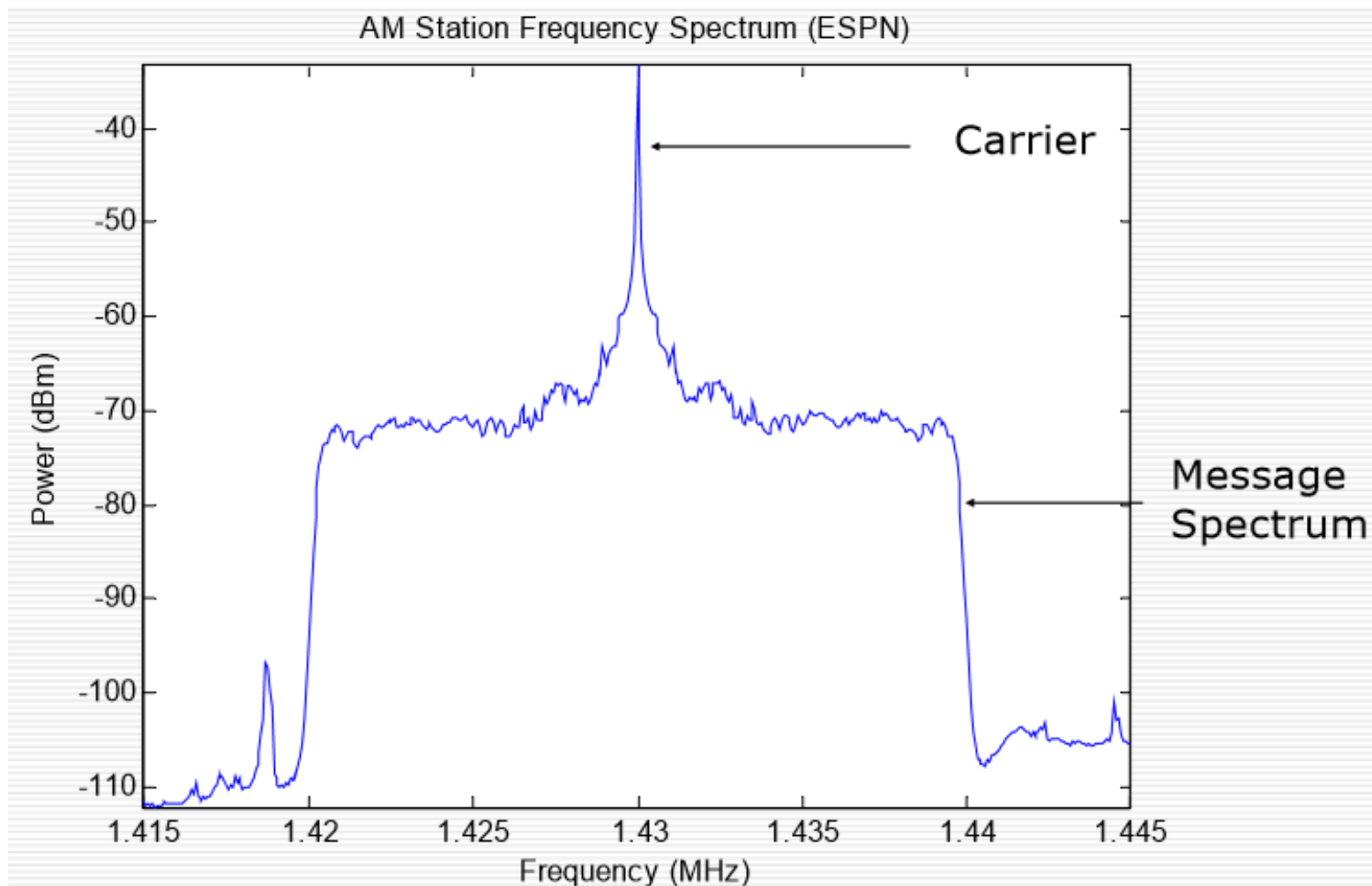
Sinal de **áudio** com componentes espectrais até **5 kHz**

As emissoras de rádio em AM utilizam um espaço no espectro de frequência que vai desde **530 KHz** até **1.600 KHz**.

Frequência Portadora:  $f_n = 540 \text{ kHz} + N \times 10 \text{ kHz}$ , com  $N = 0$  a  $106$  (107).

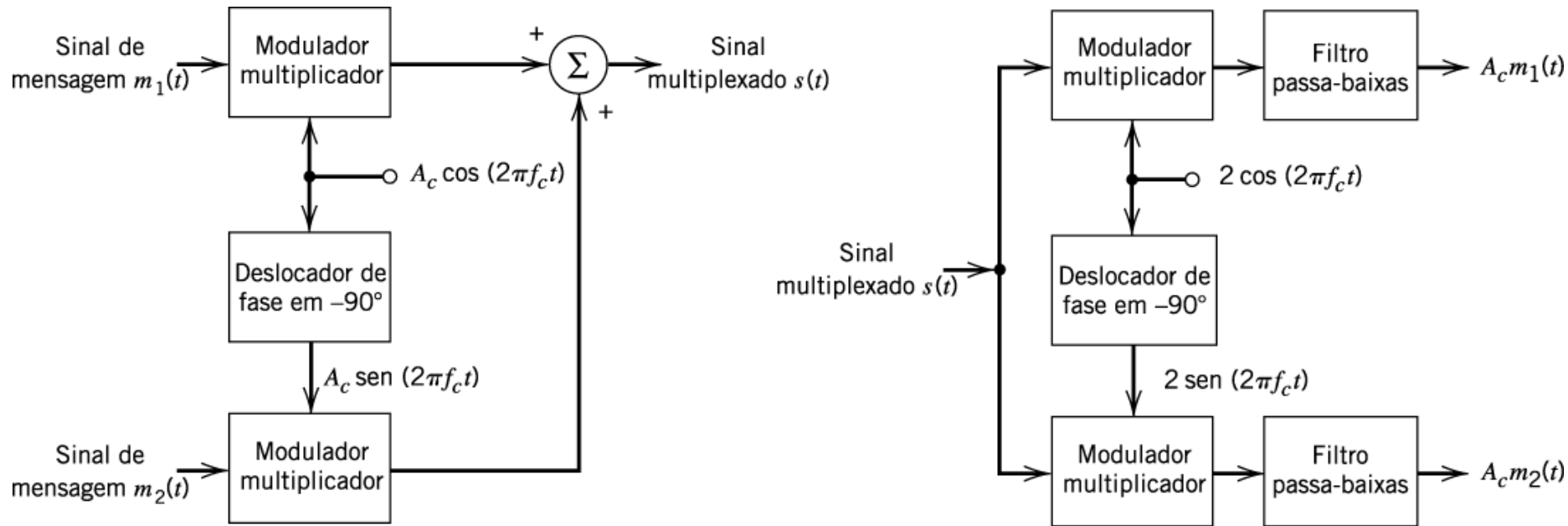
### 3. Aplicação em Radiodifusão

#### 1430 AM – ESPN



## 4. Modulação QAM Analógico

### *Quadrature Amplitude Modulation*



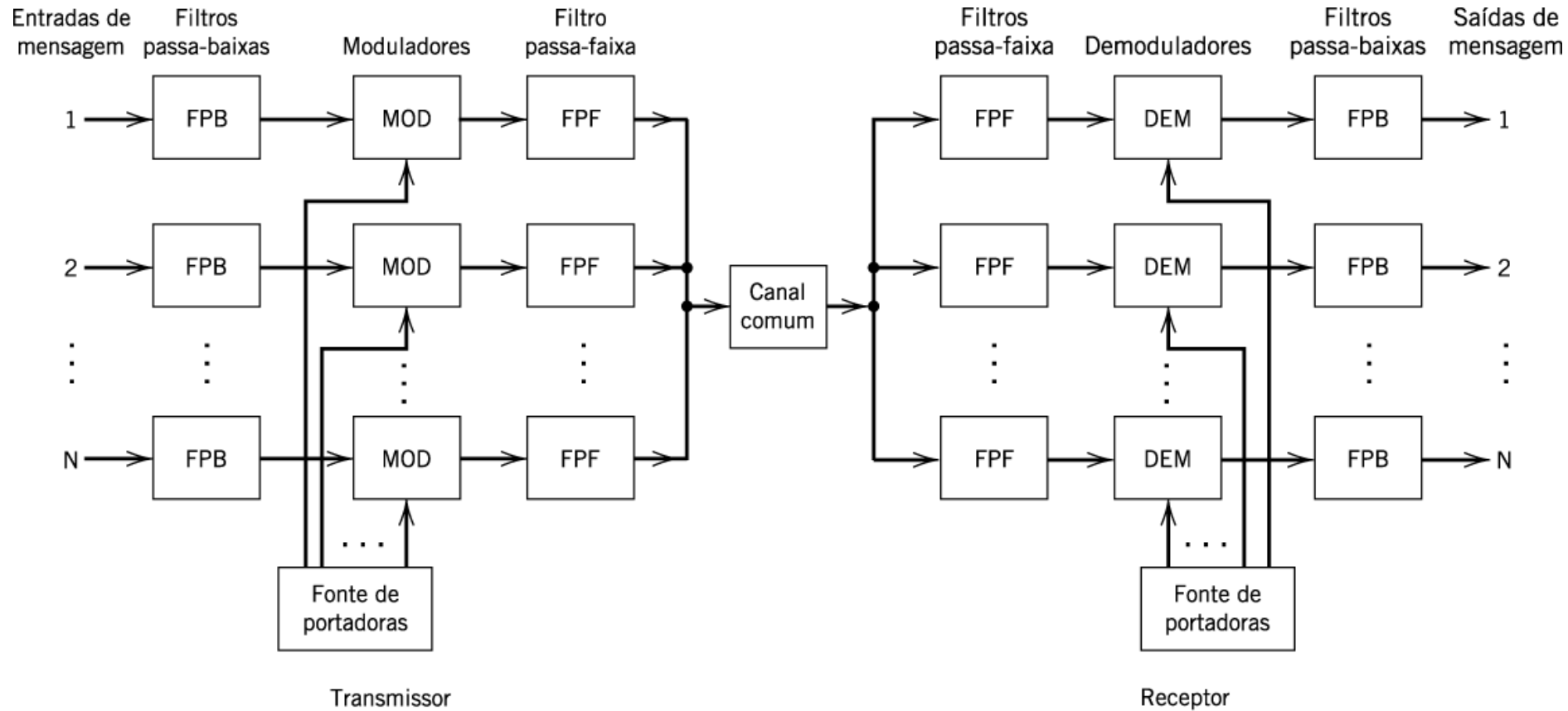
Prove matematicamente que consegues recuperar os sinais  $m_1(t)$  e  $m_2(t)$  através analógico do diagrama acima.



## 5. Multiplexação FDM

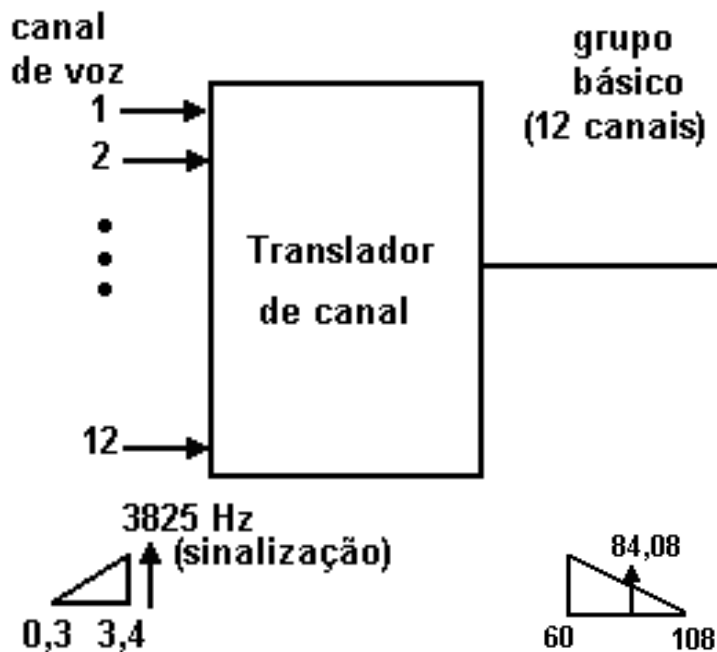
- A Multiplexação por Divisão de Frequências **FDM** (*Frequency Division Multiplexing*) foi idealizada com o objetivo de aproveitar a largura de banda do meio de transmissão.
- Para obter máximo aproveitamento o FDM deve ser acompanhado da modulação **AM-SSB/SC**.
- Através de múltiplos processos de modulação, consegue-se colocar até milhares de canais de voz compartilhando simultaneamente o mesmo meio de comunicação.

## 5. Multiplexação FDM



## 4. Multiplexação FDM

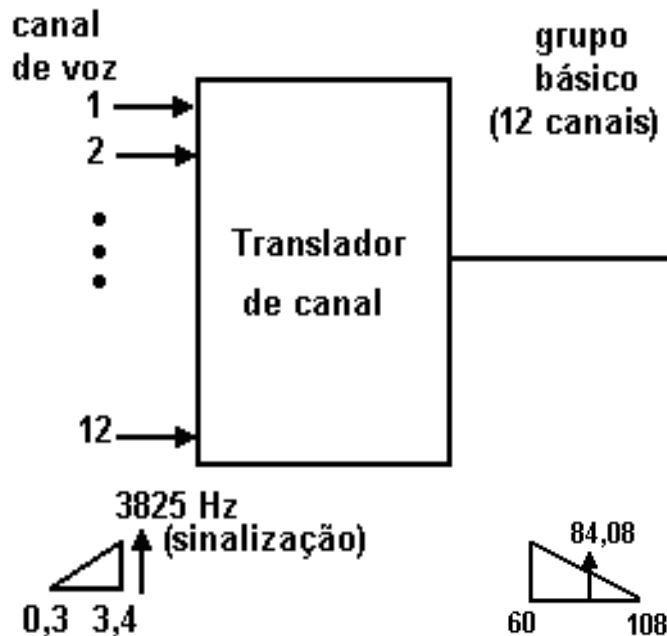
- O escalonamento em frequência - chamado de *hierarquia FDM* é estabelecido em recomendação do ITU-T. Para isso utilizam-se **Transladores de canal** composto por um MODEM (**M**odulador e **D**emodulador) para cada canal.



**Translador de Canal**

## 5. Multiplexação FDM

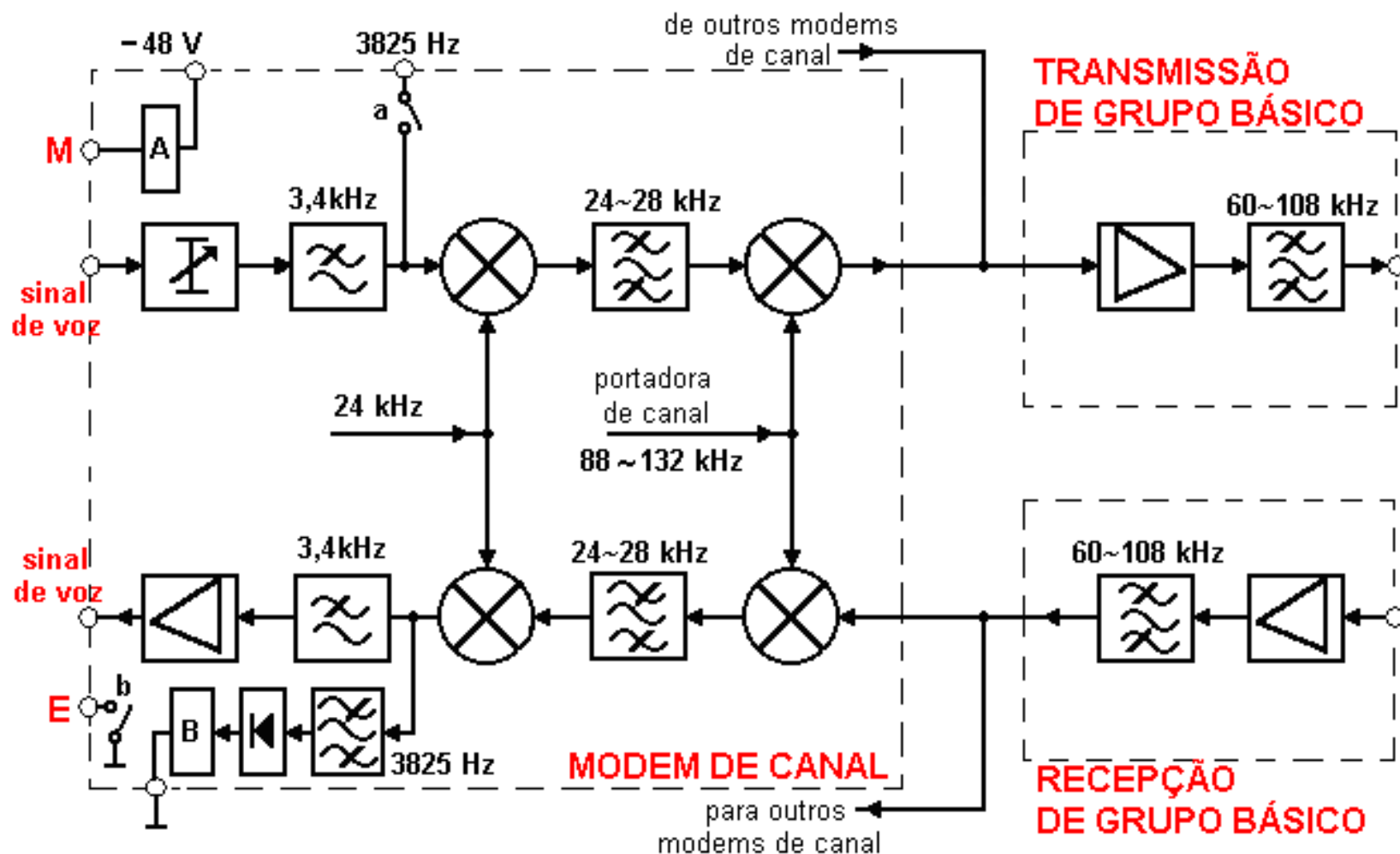
Recebe em sua entrada até **12 canais**, sendo que cada canal contém além do espectro do sinal de voz (0.3 a 3.4 kHz), uma frequência de sinalização em **3825 Hz**.



A saída do translador de canal é formado um **grupo básico** (12 canais ocupando a banda de 60kHz a 108kHz) e um sinal de monitoramento na frequência de 84,08kHz.

# 5. Multiplexação FDM

## Modem de Canal (do Translador)



## 5. Multiplexação FDM

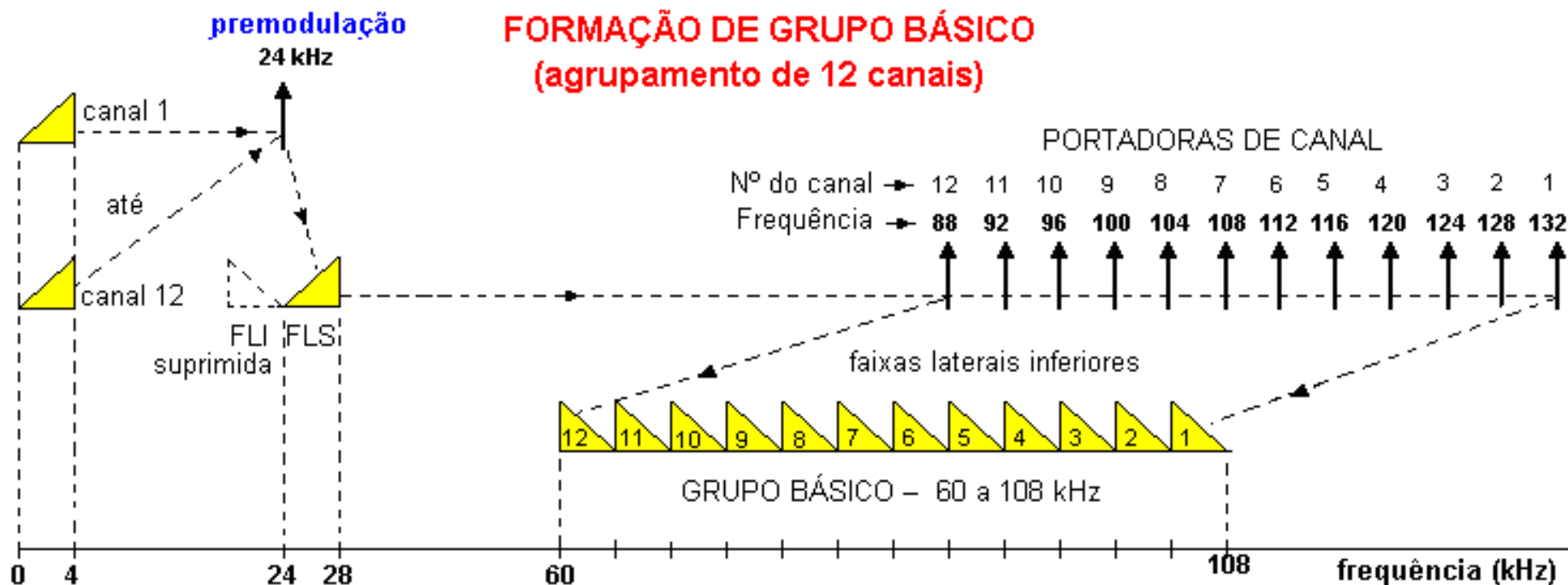
### Modem de Canal (do Translador)

- Cada um dos **12 canais** é filtrado, somado à frequência de sinalização e modulado em amplitude a uma **portadora de 24 kHz**.
- O sinal gerado **AM-DSB/SC** passa por um filtro SSB que elimina a faixa lateral inferior.
- Na sequência o sinal **AM-SSB/SC** modula novamente uma portadora. Esta portadora é individual para cada um dos 12 canais e vai de 88 kHz a 132 kHz, espaçadas de 4 kHz.
- Um único filtro passa-faixa (60kHz a 108kHz), seleciona somente as faixas laterais inferiores dos 12 canais.

# 5. Multiplexação FDM

## Modem de Canal (do Translador)

### Olhando o Espectro do Grupo Básico



## 5. Multiplexação FDM

### Meios de Comunicação

A banda base FDM depende do canal de comunicação:

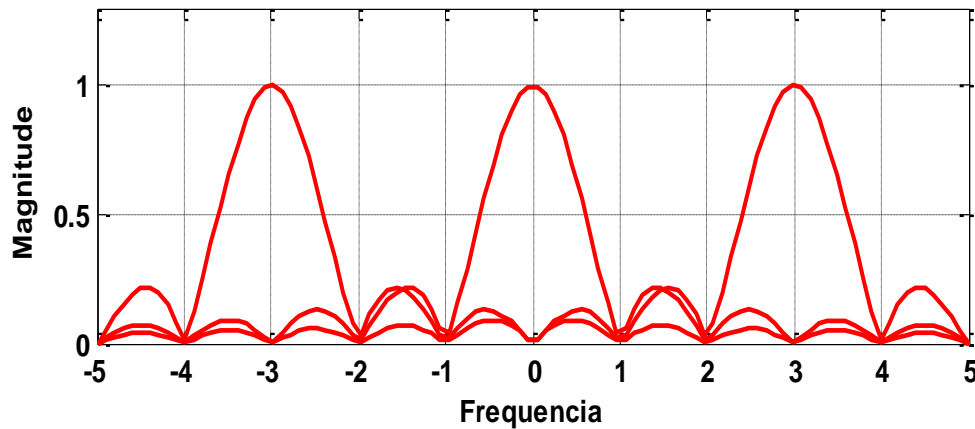
- O par simétrico de fios metálicos suporta FDM de até 24 canais de voz;
- O enlace de rádio suportam sistemas FDM com até 2700 canais de voz;
- O cabo coaxial suporta FDM com até 10800 canais de voz.



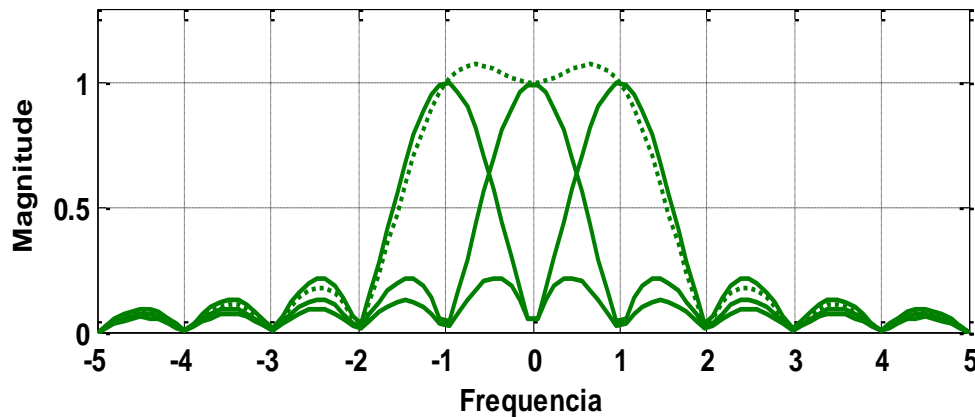
# 6. Multiplexação OFDM

## *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*

FDM



OFDM



- Economia de Espectro
- Manutenção da Ortogonalidade
  - $\Delta_f = 1/T_N$  (Frequência)
  - No inteiro de ciclos (Tempo)
- Banco de Filtros

