

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

Centro Tecnológico

Departamento de Engenharia Elétrica

# Princípios de Comunicações I

**Modulação Analógica**  
**Semestre Letivo 2020/1**

**Prof.: Jair A. Lima Silva**

**DEL-UFES**

# Índice

## **I. Tipos de Modulação de Amplitude**

- a. Modulador de Produto
- b. AM-DSB/TC
- c. AM-DSB/SC
- d. AM-SSB/SC
- e. AM-SSB/TC

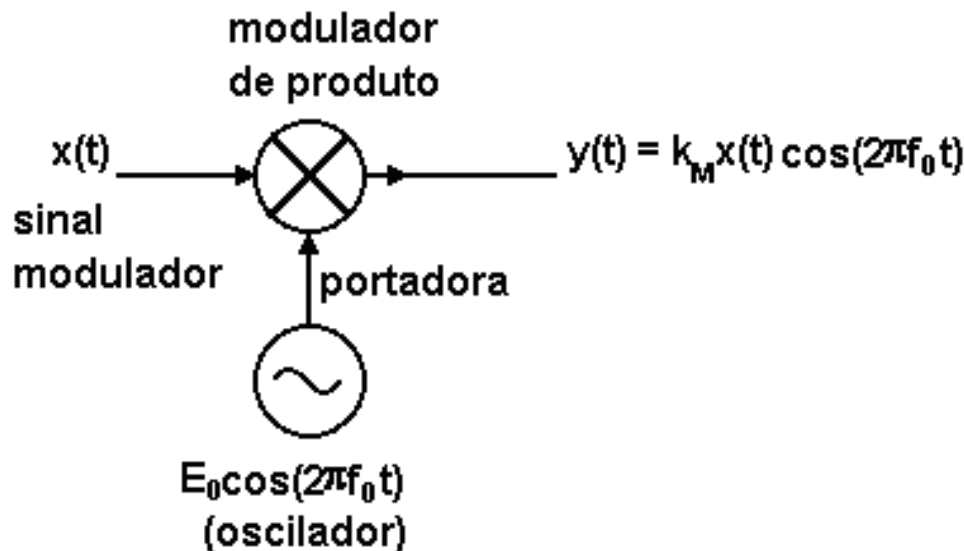
## **II. Potência de Sinais Modulados em Amplitude**

## a. 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:

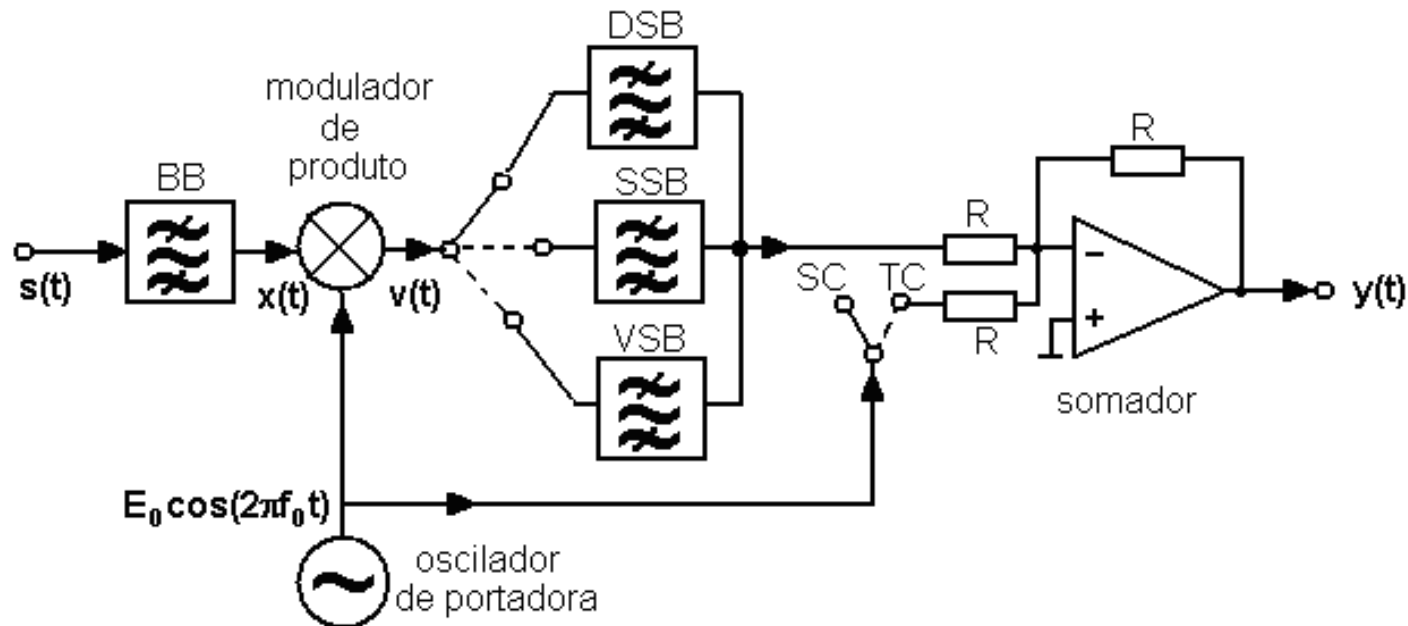
$$y(t) = k_M x(t) \cos(2\pi f_0 t)$$

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



## a. 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**.

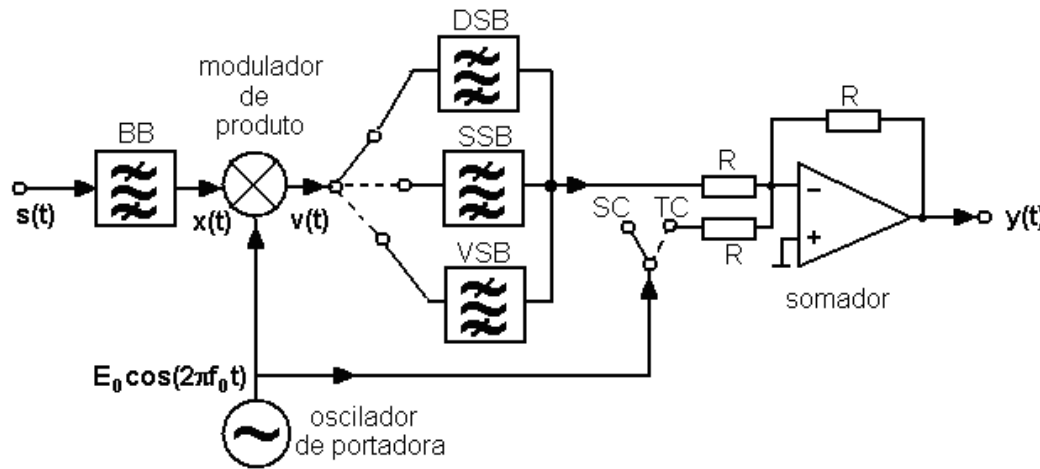


### Circuito somador

**TC** : portadora transmitida

**SC** : portadora suprimida

## a. 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  $f_a < f_m < f_b$

## b. Modulação 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  $x(t)$ , obtendo-se o sinal modulado  $y(t)$  na forma:

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

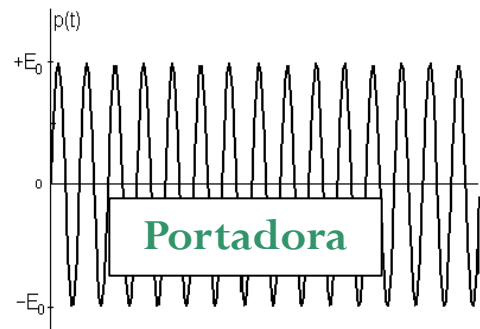
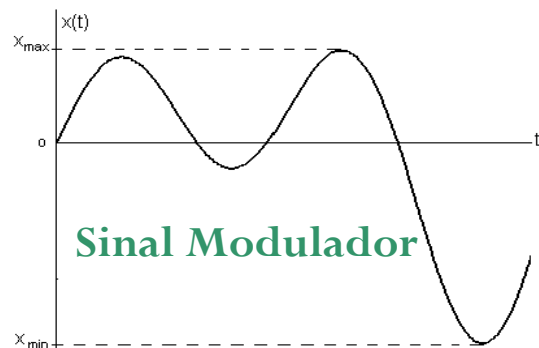
$$y(t) = \left[ E_0 + k_M x(t) \right] \cos(2\pi f_0 t)$$

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

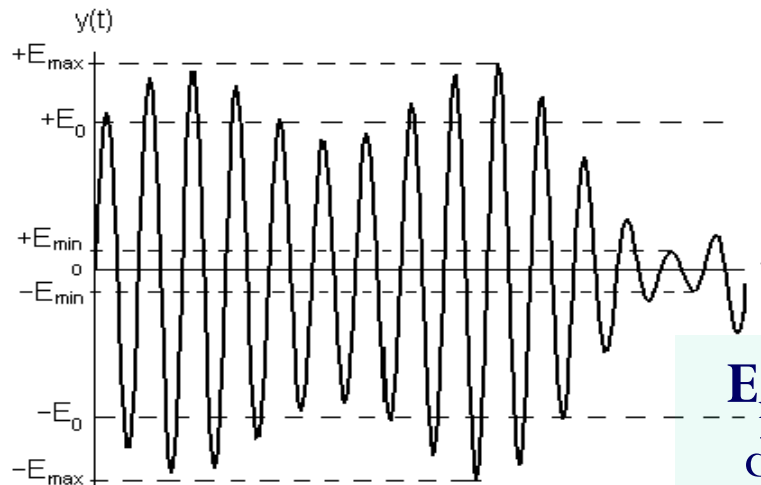
## b. Modulação AM-DSB/TC

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.

## b. Modulação AM-DSB/TC

É definido como **Índice de Modulação de Amplitude** a variação relativa de amplitude do sinal modulado 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



## b. Modulação AM-DSB/TC

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

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

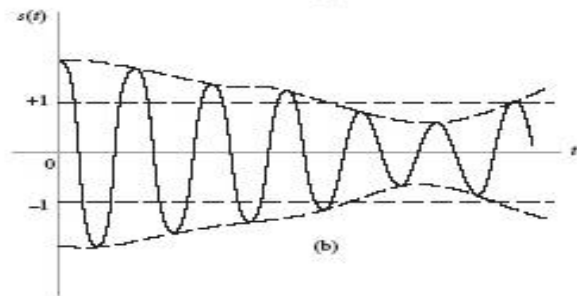
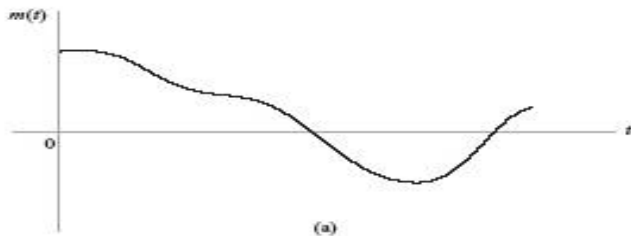
Se  $|x_{\min}| = |x_{\max}| = P$  :

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

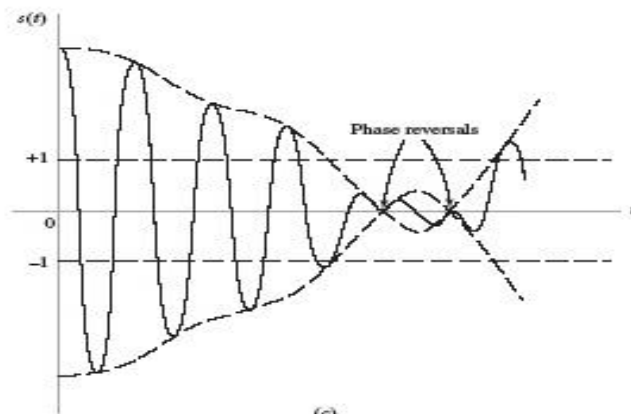
## b. Modulação AM-DSB/TC

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

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



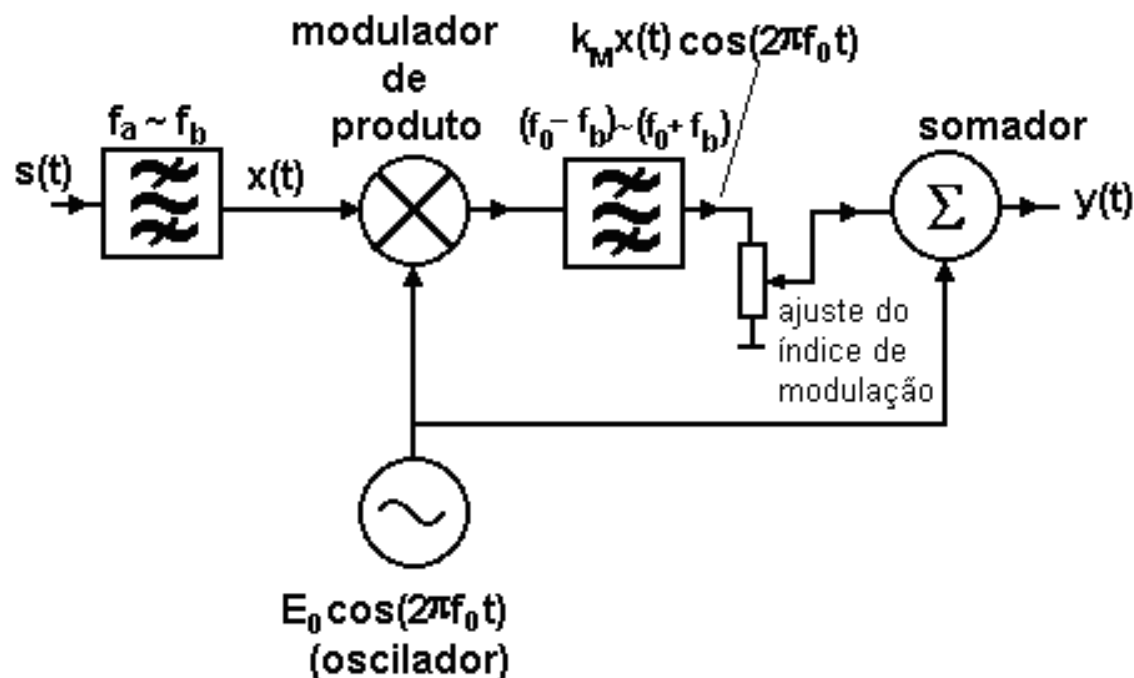
$$m_- < 1$$



$$m_- > 1$$

## b. Modulação AM-DSB/TC

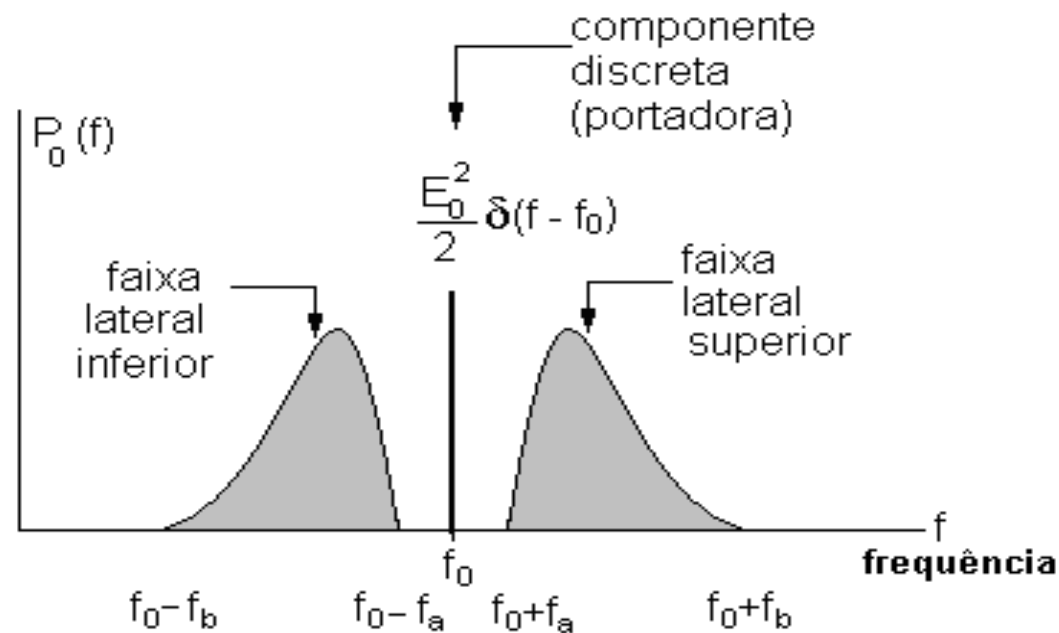
Quando a **Sobremodulação** ocorre é necessário fazer o ajuste do índice de modulação (ajustar  $k_M$ ).



## b. Modulação AM-DSB/TC

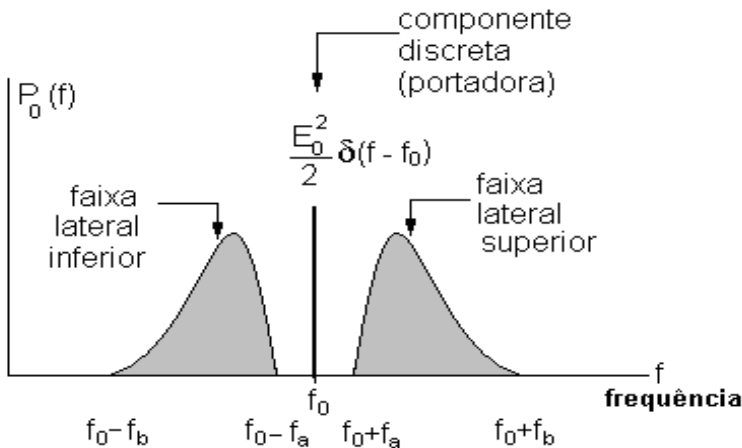
### Espectro AM-DSB/TC

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**.



## b. Modulação 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 ( $f_a \sim f_b$  )

$$P_0(f) = \frac{k_M^2}{2} P_X(f - f_0) + \frac{E_0^2}{2} \delta(f - f_0)$$

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  $B = 2f_b$ .

## b. Modulação 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  $m \leq 1$  para que não ocorra dispersão. Multiplicando os termos de  $y(t)$  e aplicando a identidade trigonométrica obtém-se

$$\cos(a)\cos(b) = \frac{1}{2} [\cos(a-b) + \cos(a+b)]$$

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

## b. Modulação AM-DSB/TC

Até agora analisamos a situação mais simples da modulação AM-DSB/TC, onde o sinal modulante  $x(t)$  é uma harmônica simples. Esta situação leva ao sinal modulado  $y(t)$  representado abaixo.

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

Se o sinal modulante  $\mathbf{x(t)}$  for composto - uma somatória de componentes senoidais com amplitudes e frequências distintas,

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

a saída  $\mathbf{y(t)}$  resultante da modulação de  $\mathbf{x(t)}$  sobre a portadora  $E_0 \cos(2\pi f_0 t)$  será a 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** o que permite trabalhar com componentes espectrais individuais e seus respectivos produtos de modulação.

O fato da modulação de amplitude ser linear faz com que a análise destes sistemas com sinais  $\mathbf{x(t)}$  compostos se torne bastante simples.

## b. Modulação AM-DSB/TC

### Vantagens:

- Simplicidade de implementação do modulador e do demodulador.

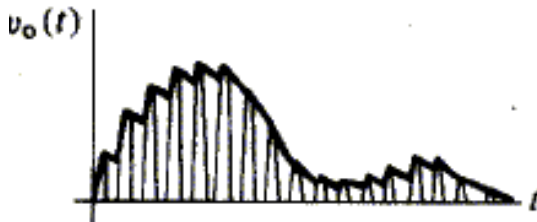
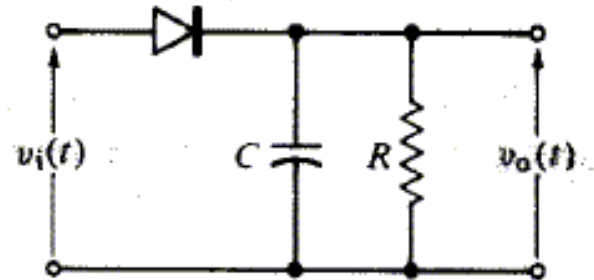
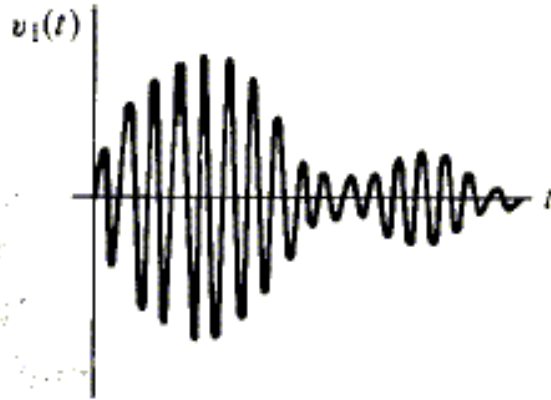
### Desvantagens:

- 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.



## b. Modulação AM-DSB/TC

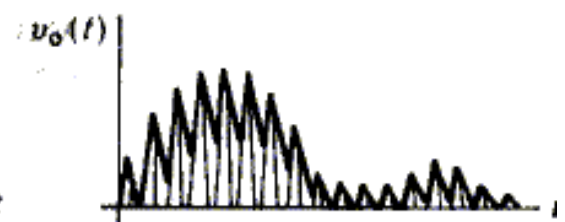
Desde que  $m_{\text{}} \leq 1$  o sinal de banda base  $\mathbf{x(t)}$  pode ser recuperado com um detector de envoltória



RC correto



RC muito grande



RC muito pequeno

## b. Modulação AM-DSB/TC – Aplicações

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.

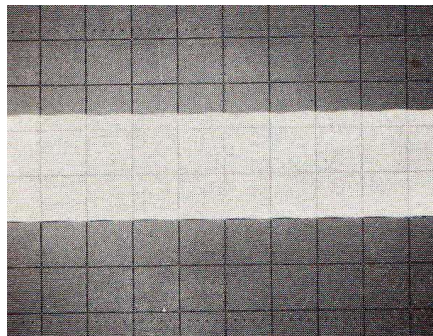
Modulação **AM-DSB/TC**, com  $m \leq 100\%$

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

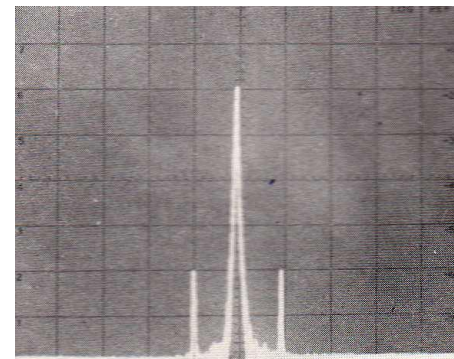
As emissoras de rádio em AM utilizam um espaço no espectro de frequência que vai desde 530 KHz até 1.600 KHz.

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

Espectro de um sinal modulado AM-DSB/TC com  $m = 2\%$



osciloscópio



Analizador de espectro

## b. Modulação AM-DSB/TC - Exercícios

**5.1)** 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.

- Determine o índice de modulação de amplitude produzido pelo sinal senoidal.
- 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?

**5.7)** 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%.

- Qual a constante de modulação do modulador AM-DSB/TC?
- Represente graficamente o sinal modulado obtido no domínio do tempo, indicando valores de tensão e tempo.
- Represente o espectro de amplitude do sinal modulado no intervalo de 490 a 510kHz.
- Qual é a potência do sinal modulado contida no intervalo de frequência acima dissipada em uma resistência de  $50\Omega$ ?

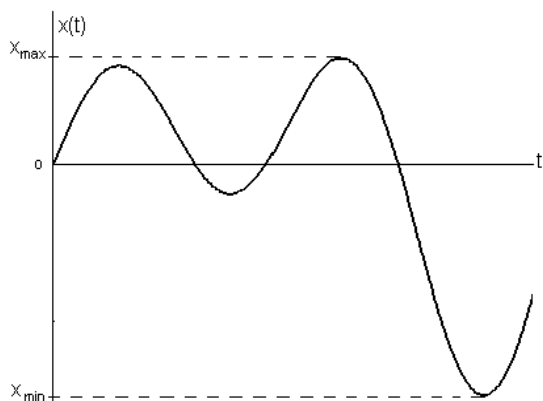
## c. Modulação AM-DSB/SC

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

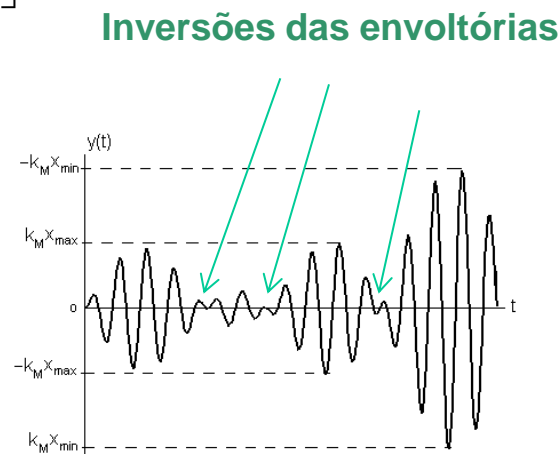
O sinal **y(t)** na saída do bloco modulador é:  $y(t) = k_M x(t) \cos(2\pi f_o t)$

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

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



**Sinal modulador**



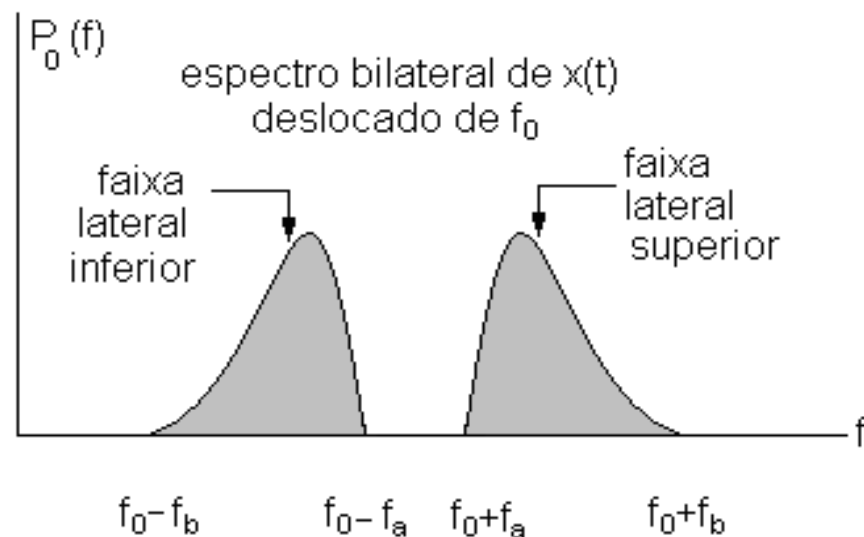
**Sinal modulado**

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

## c. Modulação AM-DSB/SC

### Espectro AM-DSB/SC

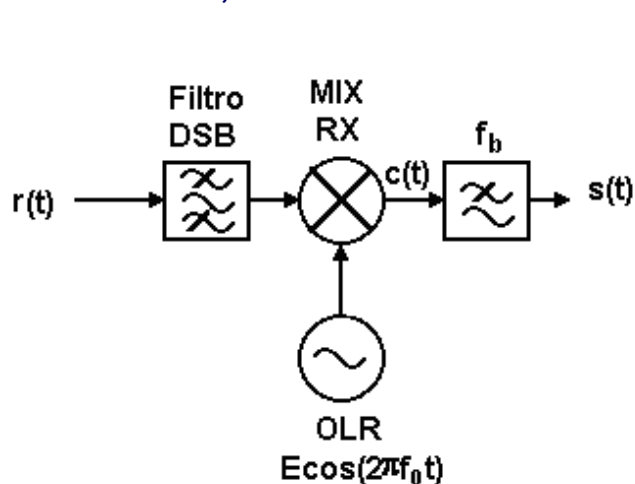
Assim como a modulação **AM-DSB/TC**, o espectro do sinal modulado na **AM-DSB/SC** é  **$B = 2f_b$** . Porém, a vantagem que esta última modulação apresenta em relação a primeira é que não precisa desperdiçar potência transmitindo a portadora.



## c. Modulação 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 **detecção síncrona**, também chamada de **detecção 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 ORL for síncrona com a portadora da transmissão (mesma frequência e mesma fase), o sinal  $c(t)$  na saída do **MIX RX** é:

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

## c. Modulação 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  $x(t)$ .



## c. Modulação 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.

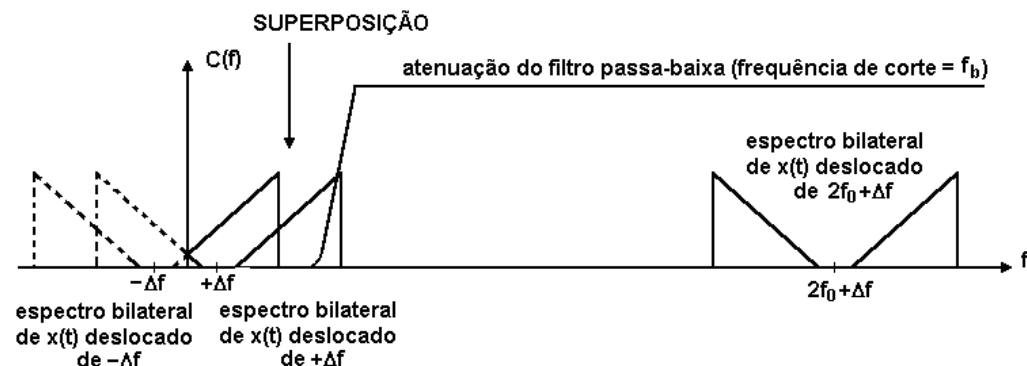
Seja a portadora da OLR  $E \cos[2\pi(f_0 + \Delta f)t]$

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

$$c(t) = \underbrace{k_d x(t)}_{\text{Sinal } x(t) \text{ centrado nas frequências } \pm \Delta f} \cos(2\pi\Delta f t) + k_d x(t) \cos[2\pi(2f_0 + \Delta f)t]$$

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

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





## c. Modulação AM-DSB/SC

### Demodulador AM-DSB/SC

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

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

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  $|\cos(\phi)| \leq 1$

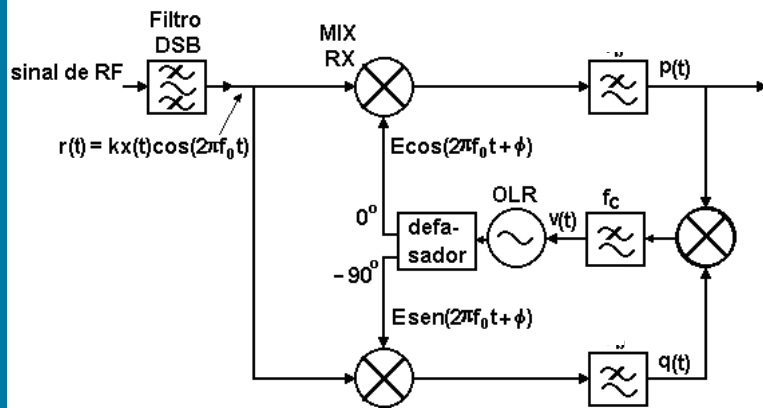
Se  $\phi = \phi(t)$ , o sinal na saída é distorcido .

A solução é garantir o sincronismo entre as portadoras de transmissão e de recepção. Para isto existem métodos de sincronização.

## c. Modulação AM-DSB/SC

### Método de Sincronização Loop de Costas

O método de sincronização da portadora mais utilizado é o Loop de Costas.

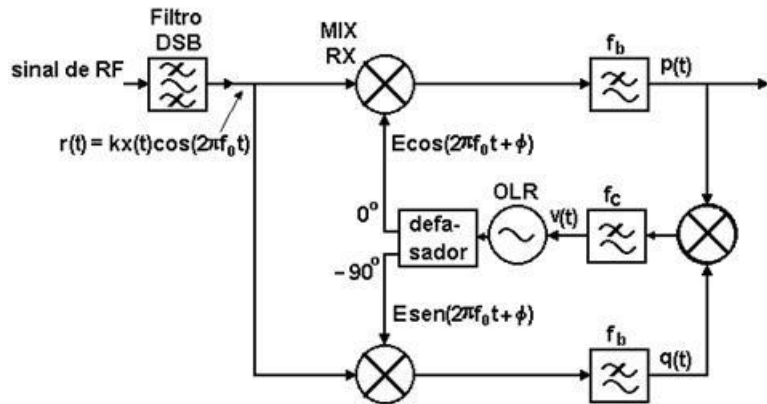


Esse receptor consiste em dois detectores coerentes alimentados com o mesmo sinal  $r(t)$ , mas com sinais individuais do oscilador local que estão em quadratura de fase entre si. A frequência do oscilador local é ajustada para ter a mesma frequência da portadora transmitida  $f_0$ . Esses dois detectores 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.

## c. Modulação AM-DSB/SC

### Método de Sincronização Loop de Costas



$$r(t) = kx(t)\cos(2\pi f_0 t) \quad \text{Sinal recebido}$$

$$E \cos(2\pi f_0 t + \phi) \quad \text{Portadora do OLR}$$

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

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

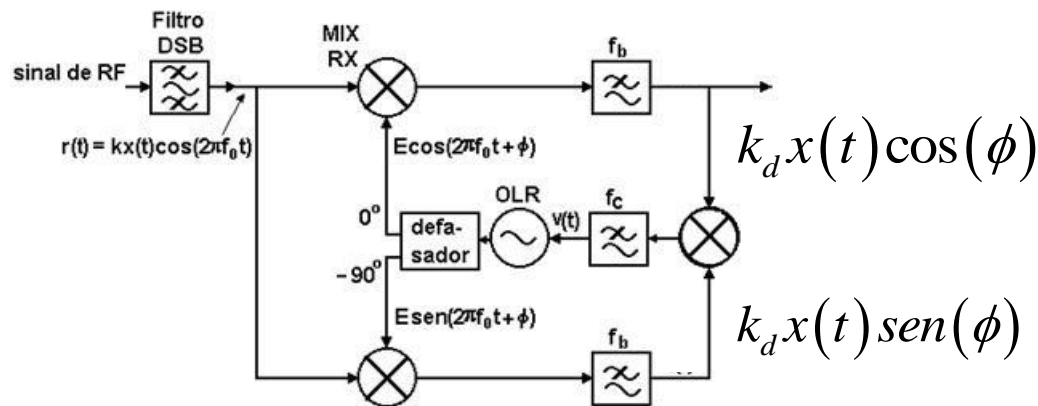
$$q(t) = k_d x(t) \sin(\phi) + k_d x(t) \sin(2\pi 2f_0 t + \phi) \quad \text{Sinal na saída do MIX RX do detector Q}$$

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

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

## c. Modulação AM-DSB/SC

### Método de Sincronização Loop de Costas



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 gerado no **VCO** é uma função da tensão de alimentação  $v(t)$ .

## d. Modulação 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  $x(t) = A \cos(2\pi f_m t)$ , o sinal modulado  $y(t)$  na saída do modulador é:

$$y(t) = \frac{k_M A}{2} \cos[2\pi(f_0 + f_m)t]$$

Faixa lateral superior  
selecionada

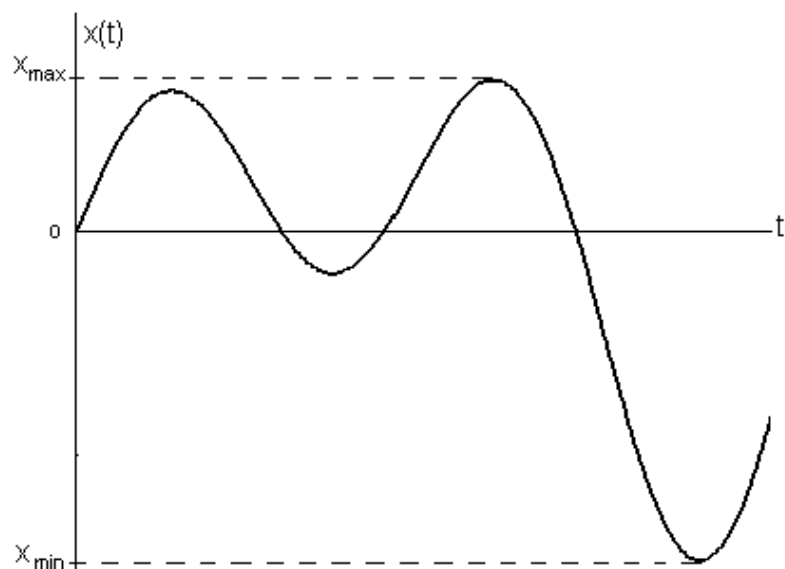
$$y(t) = \frac{k_M A}{2} \cos[2\pi(f_0 - f_m)t]$$

Faixa lateral inferior  
selecionada

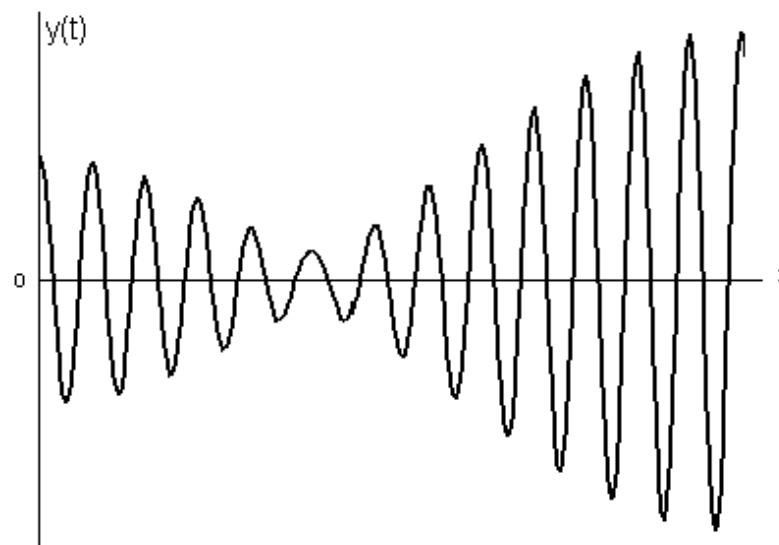
Note que ao contrário das modulações anteriores, o sinal modulado em **AM-SSB/SC** considerando  $x(t)$  cossenoidal é uma cossenoide com amplitude constante.

## d. Modulação AM-SSB/SC

A envoltória do sinal modulado AM-SSB/SC **não** guarda **semelhança** com o sinal modulador  $x(t)$



Sinal modulador

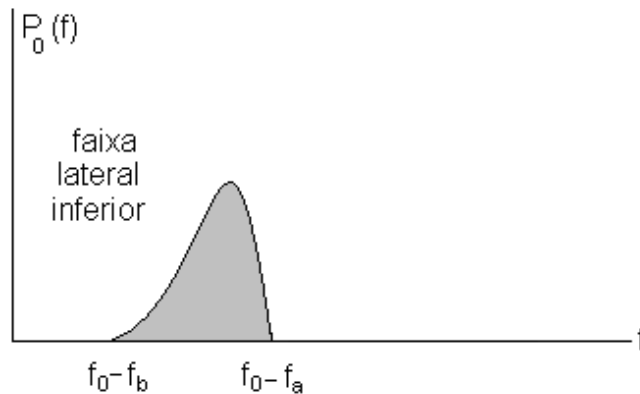


Sinal modulado AM-SSB/SC com faixa lateral superior transmitida

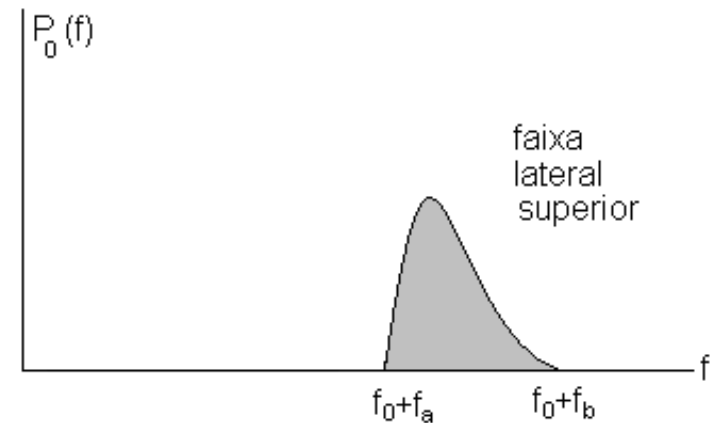
## d. Modulação AM-SSB/SC

O espectro do sinal modulado em AM-SSB/SC equivale a somente uma das bandas resultantes do processo de modulação (inferior ou superior). A banda do sinal modulado é igual a banda do sinal modulador.

$$B = f_b - f_a$$



**Faixa lateral inferior  
transmitida**



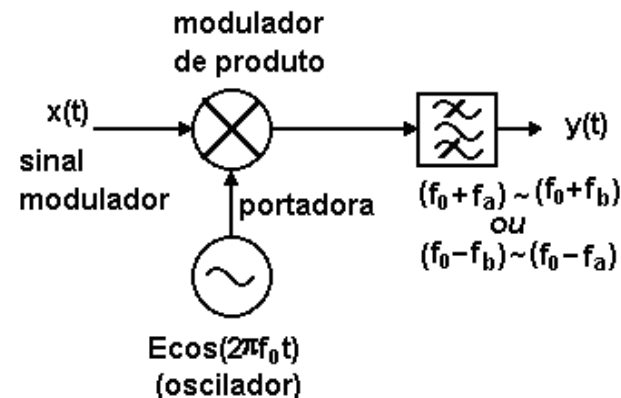
**Faixa lateral superior  
transmitida**

## d. Modulação AM-SSB/SC

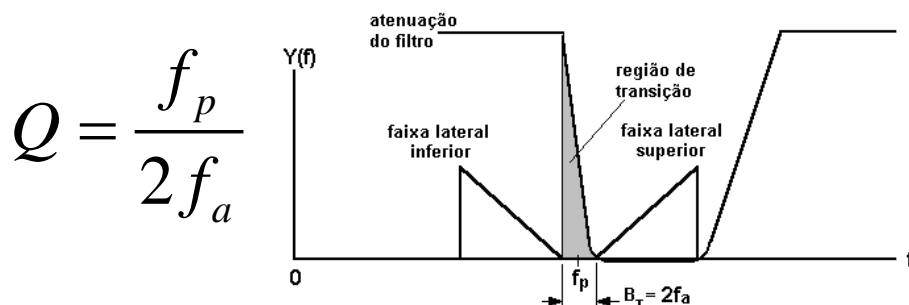
### Modulador AM-SSB/SC por filtragem

É a forma mais simples de implementação de um modulador.

A energia do sinal na saída do modulador é a energia contida em uma das bandas laterais.



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 –  $2f_a$ , onde  $f_a$  é a menor frequência do sinal  $x(t)$



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.

$$Q_{\max} \geq \frac{f_p}{2f_a} \longrightarrow f_p \geq f_b \quad (\text{evitar superposição}) \longrightarrow f_b \leq f_p \leq 2f_a Q_{\max}$$



## d. Modulação AM-SSB/SC

### Modulador AM-SSB/SC por filtragem

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.

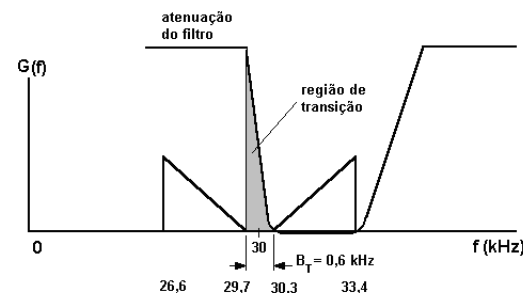
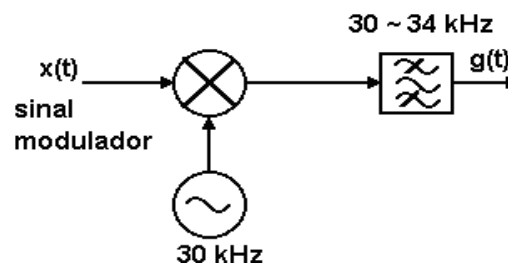
**Exemplo:** Deseja-se transmitir o sinal  $x(t)$  com espectro de  $f_a = 0,3$  kHz a  $f_b = 3,4$  kHz, modulado em **AM-SSB/SC** com portadora com frequência  $f_0 = 2$  MHz. A viabilidade técnica/econômica do filtro é  $Q_{\max} = 50$ .

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

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

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

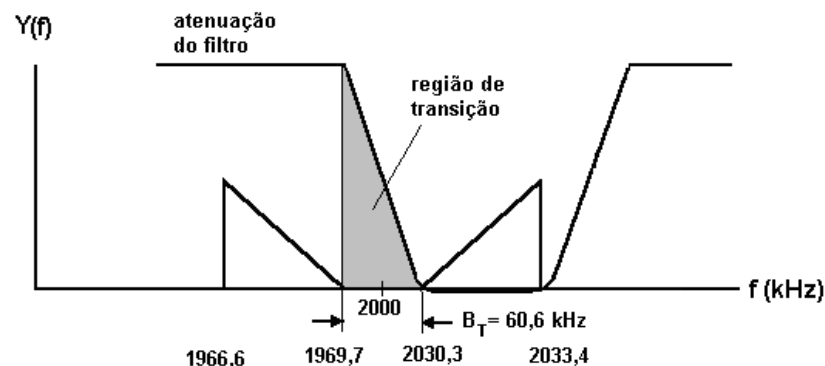
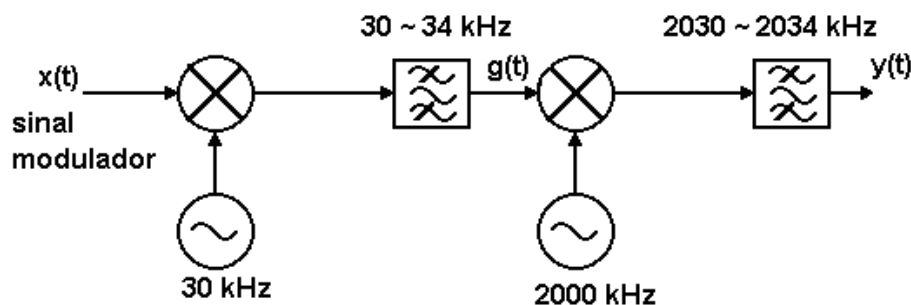


## d. Modulação AM-SSB/SC

### Modulador AM-SSB/SC por filtragem *Continuação do exemplo*

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.**

## d. Modulação AM-SSB/SC

### Modulador AM-SSB/SC por desvio de fase

É possível se evitar as dificuldades da filtragem na produção do sinal AM-SSB/SC. Para tanto foi idealizado o processo de **deslocamento de fase**. Funciona da seguinte forma:

Suponha o sinal  $x(t) = A \cos(2\pi f_m t)$

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

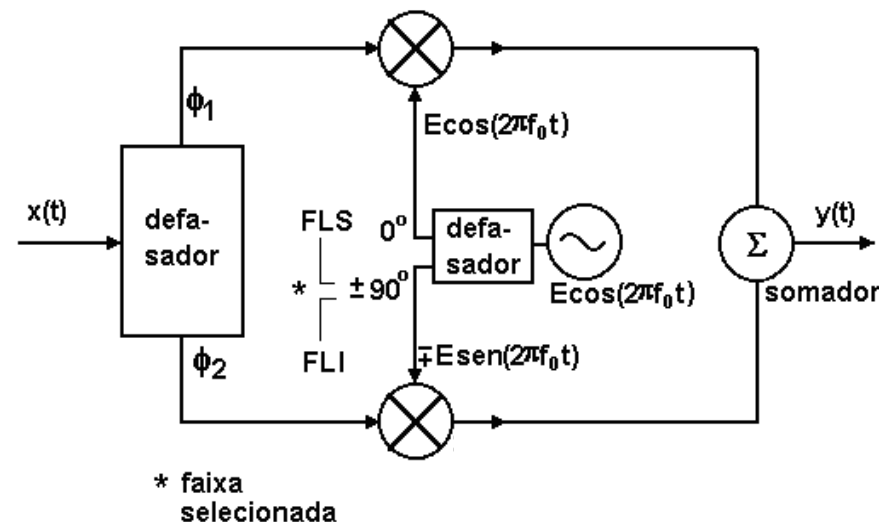
$$x_1(t) = A \cos(2\pi f_m t)$$

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

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

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

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

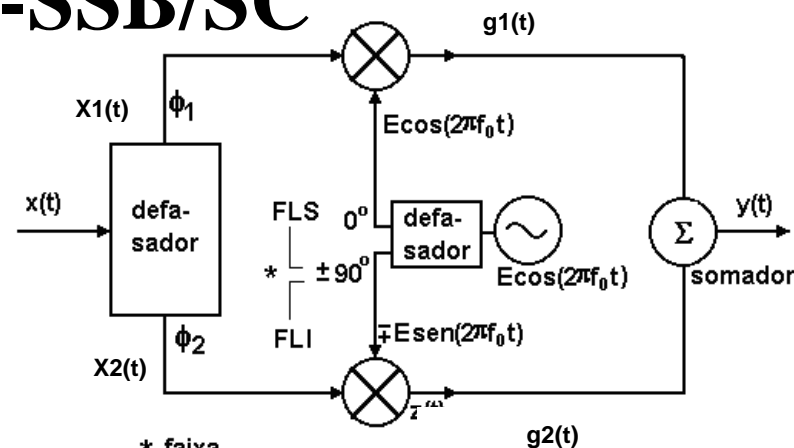


## d. Modulação AM-SSB/SC

### 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:

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

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

**Somente a faixa lateral superior irá passar**

• 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:

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

**Somente a faixa lateral inferior irá passar**

## d. Modulação AM-SSB/SC

### Demodulador AM-SSB/SC

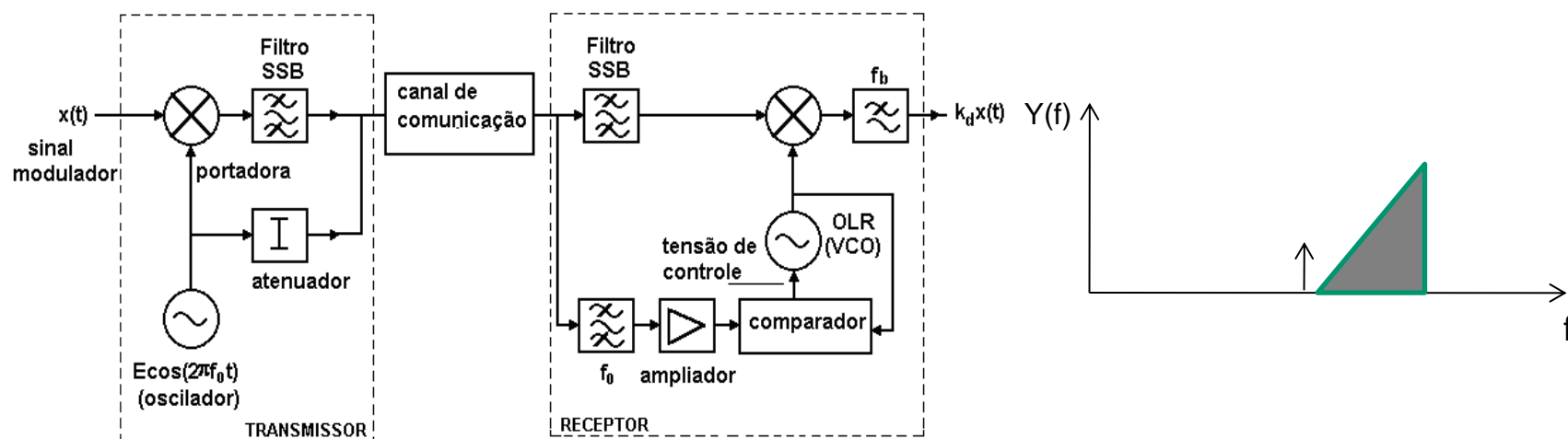
A demodulação **AM-SSB/SC**, da mesma forma que na demodulação **AM-DSB/SC**, só pode ser feita **por detecção síncrona**. Isto significa que deve haver sincronismo (mesma frequência e mesma fase) entre as portadoras da transmissão e da recepção. Porém, as técnicas empregadas na detecção síncrona do 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:

## d. Modulação AM-SSB/SC

### Demodulador AM-SSB/SC com 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.

## d. Modulação AM-SSB/SC

### Demodulador AM-SSB/SC com Oscilador de Alta Estabilidade

O uso de uma portadora piloto para cada sinal se torna inviável quando se tem multiplexação FDM (Multiplexação por divisão de frequência), pois aumentaria a potência total transmitida além de propiciar a interferência com outros sinais do sistema. Nestes sistemas 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 junto com o sinal FDM.

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**.

## e. Modulação AM-SSB/TC

**AM-SSB/TC** é a sigla em inglês para **Modulação de Amplitude-Faixa Lateral Única/Portadora transmitida**.

Esta modulação une as vantagens de se ter banda de transmissão reduzida e detecção/demodulação simplificada utilizando um detector de envoltória.

O sinal modulado na saída do modulador **AM-SSB/TC** é dado por:

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

**Sinal AM-SSB/TC na saída de um MOD por filtragem.**

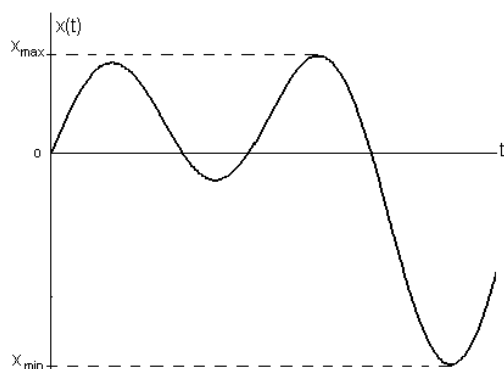
$$y(t) = k_m A \cos(2\pi(f_0 \pm f_m)t) + E_0 \cos(2\pi f_m t)$$

**Sinal AM-SSB/TC na saída de um modulador por desvio de fase**

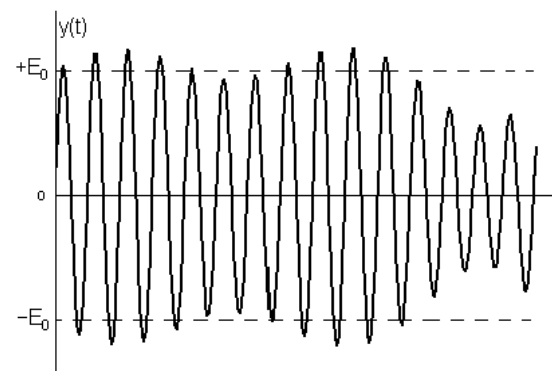


## e. Modulação AM-SSB/TC

Comparando o sinal na saída do modulador **AM-SSB/TC**, com o sinal na saída do modulador **AM-DSB/TC**, observamos que a envoltória do sinal **AM-SSB/TC** corresponde à de um sinal **AM-DSB/TC** com metade do índice de modulação. Isto permite a demodulação do sinal **AM-SSB/TC** com um detector de envoltória.



Sinal modulador



Sinal AM-SSB/TC

Na modulação **AM-SSB/TC** a condição de índice de modulação  $m \leq 1$  também precisa ser atendida para que não ocorra sobremodulação.

## II. Potência de Sinais Modulados em Amplitude

A potência média de um sinal modulado  $\mathbf{y(t)}$  é dada por:  $P_T = \frac{\overline{y^2(t)}}{R}$

É chamada de **potência média normalizada** a potência média dissipada em um resistor  $R=1\Omega$ .

A **potência média da portadora** senoidal é:  $P_0 = \frac{E_0^2}{2R}$

O **valor quadrático médio** do sinal modulador  $\mathbf{x(t)}$  é:  $\sigma^2 = \overline{x^2(t)}$

O **índice de modulação de amplitude** é:  $m = \frac{k_M P}{E_0}$  onde  $\mathbf{P = |x(t)|_{max}}$

Denomina-se **fator de pico** a relação :  $k = \frac{P}{\sigma}$

## II. Potência de Sinais Modulados em Amplitude

Para sinais moduladores com valor médio nulo (sinais periódicos e simétricos em relação ao eixo do tempo), as potências dissipadas nas diferentes modulações AM são:

### AM-DSB/TC

A potência média do sinal modulado **AM-DSB/TC** sobre a resistência  $R$  é:

$$P_T = P_0 \left[ 1 + \frac{k_M^2}{E_0^2} \overline{x^2(t)} \right] = P_0 \left[ 1 + \left( \frac{k_M \sigma}{E_0} \right)^2 \right] = P_0 \left[ 1 + \left( \frac{m}{k} \right)^2 \right]$$

### AM-DSB/SC

A potência média do sinal modulado **AM-DSB/SC** sobre a resistência  $R$  é:

$$P_T = \frac{k_M^2}{2R} \overline{x^2(t)} = \frac{(k_M \sigma)^2}{2R}$$

Essa potência se divide igualmente entre as faixas laterais inferior e superior

## II. Potência de Sinais Modulados em Amplitude

### AM-SSB/SC

Na modulação **AM-SSB/SC** uma das faixas laterais é suprimida, logo, a potência do sinal modulado **AM-SSB/SC** sobre R é a metade do sinal **AM-DSB/SC**.

$$P_T = \frac{k_M^2}{4R} \overline{x^2(t)} = \frac{(k_M \sigma)^2}{4R}$$

### AM-SSB/TC

A potência média do sinal modulado **AM-SSB/TC** sobre a resistência R é:

$$P_T = P_0 \left[ 1 + \frac{k_M^2}{2E_0^2} \overline{x^2(t)} \right] = P_0 \left[ 1 + \frac{1}{2} \left( \frac{k_M \sigma}{E_0} \right)^2 \right]$$

# Atividades Síncronas – Atividade 4 e 5 do Classroom

