

## Modulação em amplitude

### parte II

- AMDSB-SC
- SSB
- FDM
- AMVSB

am II

marcelo bj

1

### Modulação em amplitude com portadora suprimida - AMDSB-SC

- ❖ Como já foi comentado anteriormente, a portadora  $c(t)$  que transporta a informação, é completamente independente do sinal de informação  $m(t)$ .
  - Assim, sua transmissão representa um gasto inútil de potência.
    - Na modulação AMDSB mais de 50% da potência é desperdiçado na transmissão da portadora.
  - Para eliminar esta desvantagem podemos suprimir a portadora utilizando a técnica da **Modulação em Amplitude com Portadora Suprimida - AMDSB-SC**.
- ❖ Neste tipo de modulação o sinal modulado é igual ao produto do sinal da portadora pelo sinal na banda base, isto é, o sinal mensagem, assim:

$$\begin{aligned} s(t) &= m(t)c(t) \\ &= A_c m(t) \cos(2\pi f_c t) \end{aligned}$$

am II

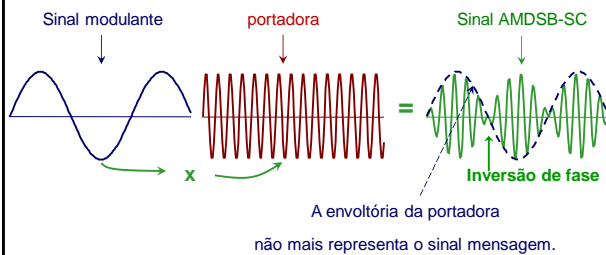
marcelo bj

2

- ❖ A equação que descreve o sinal AMDSB-SC no tempo é dada por:

$$s(t) = A_c m(t) \cos(2\pi f_c t)$$

- No domínio do tempo a modulação AMDSB-SC pode ser graficamente representada como abaixo:



am II

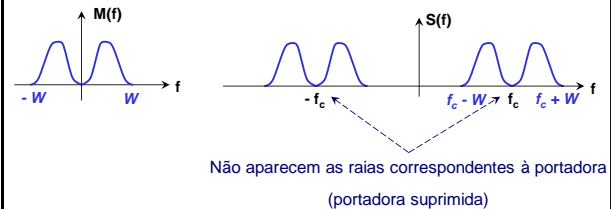
marcelo bj

3

### Espectro de amplitude

- ❖ Utilizando o teorema da modulação é fácil mostrar que o espectro de amplitude do sinal AMDSB-SC é dado por:

$$S(f) = \frac{A_c}{2} M(f - f_c) + \frac{A_c}{2} M(f + f_c)$$



- **Largura de faixa:  $B_w = 2W$**

am II

marcelo bj

4

### Modulação por um único tom

- ❖ Sejam os sinais modulante  $[m(t)]$  e a portadora  $[c(t)]$  dados por:

$$m(t) = A_m \cos(2\pi f_m t) \quad e \quad c(t) = A_c \cos(2\pi f_c t)$$

- Como a equação que descreve a modulação em amplitude com portadora suprimida é o produto de  $m(t)$  por  $c(t)$ , então:

$$s(t) = A_m A_c \cos(2\pi f_m t) \cos(2\pi f_c t)$$

- Desenvolvendo a equação acima:

$$s(t) = \frac{A_m A_c}{2} \cos[2\pi(f_c - f_m)t] + \frac{A_m A_c}{2} \cos[2\pi(f_c + f_m)t]$$

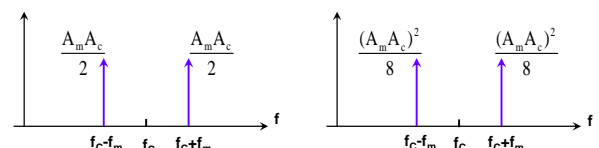
- Observe que na equação acima aparece somente o sinal modulante deslocado em torno de  $\pm f_c$ , a portadora não está presente na equação.

am II

marcelo bj

5

### Espectro unilateral de amplitude e de potência



- A potência total é a potência das bandas laterais:

$$P_T = \frac{(A_m A_c)^2}{8} + \frac{(A_m A_c)^2}{8} = \frac{(A_m A_c)^2}{4}$$

- A potência está contida somente nas bandas laterais,
- Economiza potência em relação ao AMDSB.

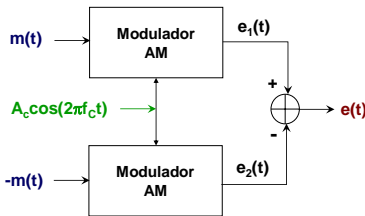
am II

marcelo bj

6

### Modulador balanceado

- ❖ Pode-se gerar a modulação AMDSB-SC através de dois moduladores AM idênticos, conforme o esquema abaixo:



$$\left. \begin{aligned} e_1(t) &= A_c [1 + km(t)] \cos(2\pi f_c t) \\ e_2(t) &= A_c [1 - km(t)] \cos(2\pi f_c t) \end{aligned} \right\} e(t) = 2kA_c m(t) \cos(2\pi f_c t)$$

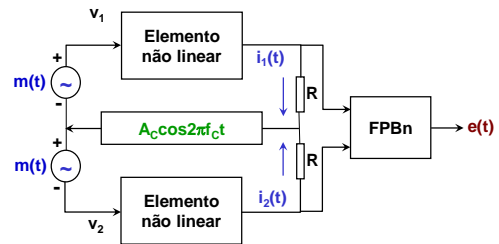
am II

marcelo bj

7

- ❖ Admitindo o modulador AM como um elemento não linear com lei quadrática, a relação entre entrada e saída é dada por:

$$i = Av + Bv^2$$



- analisando figura acima, as tensões  $v_1$  e  $v_2$  são dadas por:

$$v_1 = A_c \cos(2\pi f_c t) + m(t) \quad v_2 = A_c \cos(2\pi f_c t) - m(t)$$

am II

marcelo bj

8

- Assim, as correntes  $i_1$  e  $i_2$  são:

$$i_1 = A[A_c \cos(2\pi f_c t) + m(t)] + B[A_c \cos(2\pi f_c t) + m(t)]^2$$

$$i_2 = A[A_c \cos(2\pi f_c t) - m(t)] + B[A_c \cos(2\pi f_c t) - m(t)]^2$$

- Como a tensão na entrada do filtro passa-banda é:

$$v_s(t) = R\{i_1 - i_2\}$$

- Então:

$$v_s(t) = 2ARm(t) + \underbrace{4BRA_c m(t) \cos(2\pi f_c t)}_{\text{AMDSB-SC}}$$

- Na saída do filtro passa-banda tem-se o sinal AMDSB-SC.

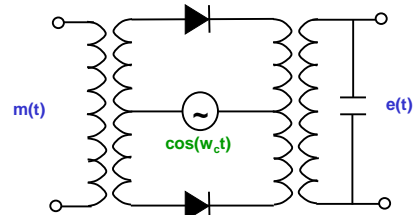
$$e(t) = 4BRA_c m(t) \cos(2\pi f_c t)$$

am II

marcelo bj

9

- Versão prática do modulador:



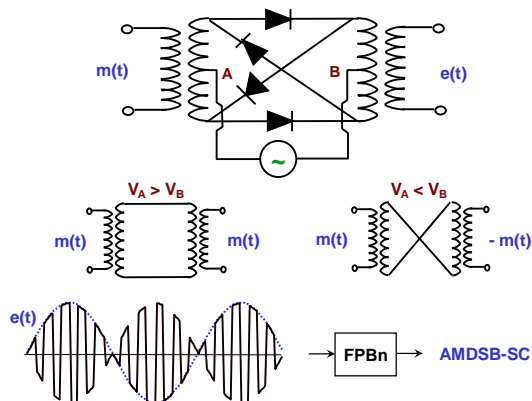
- Os diodos trabalham como elementos não lineares (chaveamento ou dispositivo com lei quadrática).
- A subtração das correntes é realizada no primário do transformador de saída.

am II

marcelo bj

10

### Modulador em anel

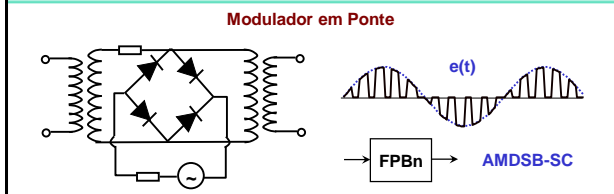
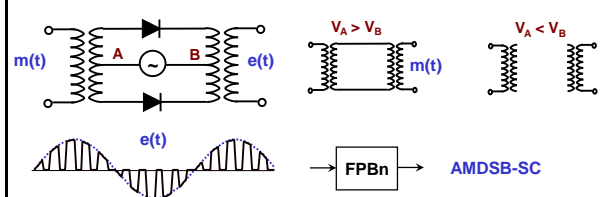


am II

marcelo bj

11

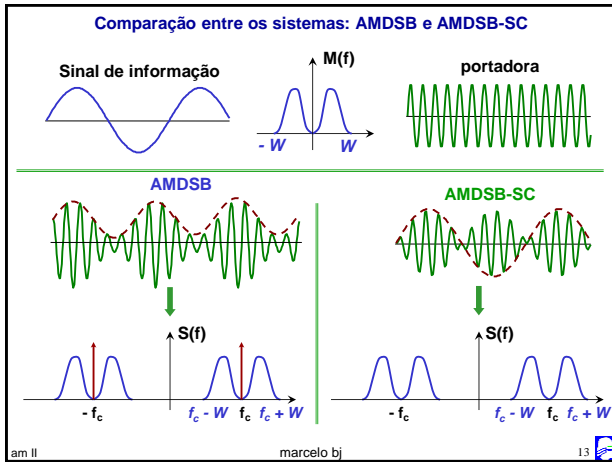
### Modulador série



am II

marcelo bj

12



**Demoduladores AMDSB-SC**

➤ **Demodulação:** É o processo de se extrair o sinal de informação da portadora de RF modulada.

**Detector de produto:**

$$s(t) = A_c m(t) \cos(2\pi f_c t) \rightarrow \text{FPB}_x \rightarrow \frac{A_c}{2} m(t)$$

Após o FPBx:  $\frac{A_c}{2} m(t)$

➤ **Problemas:**

- Necessidade de sincronismo de frequência e de fase.
- Uso de detector coerente.
- Necessidade de transmissão de informação da portadora.

am II marcelo bj 14

**Costas loop**

- ❖ Facilita a aquisição da portadora e consequente demodulação do sinal mensagem.
- utilizado tanto em comunicação analógica como digital.
- ❖ Emprega os “circuitos com malha travada” (*phase locked loop - PLL*) para recuperar a portadora.
- ❖ Ele utiliza dois circuitos PLL.
- os sinais de controle nas entradas dos multiplicadores estão em quadratura.
- as saídas dos multiplicadores,  $x_I(t)$  e  $x_Q(t)$  contêm um sinal de frequência baixa proporcional ao erro de fase entre os sinais de entrada e do VCO.
- este sinal de erro controla a frequência do VCO.
- operando no modo de malha travada o sinal do VCO tem a mesma frequência do sinal de entrada.

am II marcelo bj 15

**diagrama de blocos**

nas saídas dos multiplicadores:

$$x_I(t) = \frac{m(t)}{2} \{ \cos(\theta_i - \theta_o) + \cos(2w_o t + \theta_o + \theta_i) \}$$

$$x_Q(t) = \frac{m(t)}{2} \{ \sin(\theta_i - \theta_o) + \sin(2w_o t + \theta_o + \theta_i) \}$$

am II marcelo bj 16

➤ nas saídas dos filtros passa-baixa:

$$y_I(t) = \frac{m(t)}{2} \cos(\theta_i - \theta_o)$$

$$y_Q(t) = \frac{m(t)}{2} \sin(\theta_i - \theta_o)$$

➤ se a frequência do VCO é exatamente igual à frequência de entrada, então o erro de fase é nulo.

$$y_I(t) = \frac{m(t)}{2} \cos(0) = \frac{m(t)}{2} \quad \text{← sinal demodulado}$$

$$y_Q(t) = \frac{m(t)}{2} \sin(0) = 0$$

am II marcelo bj 17

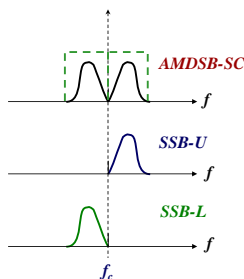
**Modulação em quadratura**

$$\begin{cases} e_1(t) = a(t) \cos(2\pi f_c t) \\ e_2(t) = b(t) \sin(2\pi f_c t) \\ e(t) = e_1(t) + e_2(t) \end{cases} \rightarrow \begin{cases} s_1(t) = \frac{1}{2} a(t) \\ s_2(t) = \frac{1}{2} b(t) \end{cases}$$

am II marcelo bj 18

### Modulação com banda lateral única - SSBSC

- ❖ Somente uma das bandas laterais (superior ou inferior) é utilizada para transmissão.
- ❖ Ela pode ser obtida através da modulação AMDSB-SC através da eliminação de uma das bandas laterais por meio de filtros.

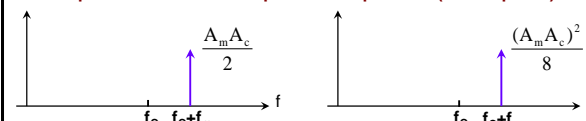


- ❖ Observe que a banda lateral inferior é uma réplica da superior.
- ❖ Assim, somente uma das bandas é transmitida nos sistemas SSB.
- ❖ A largura de banda utilizada é a metade dos sistemas AMDSB.
- ❖ A portadora também é suprimida.
- ❖ Descrições do sinal SSB:
  - No domínio da frequência.
  - No domínio do tempo (difícil).
  - Para facilidade: modulação por um único tom.

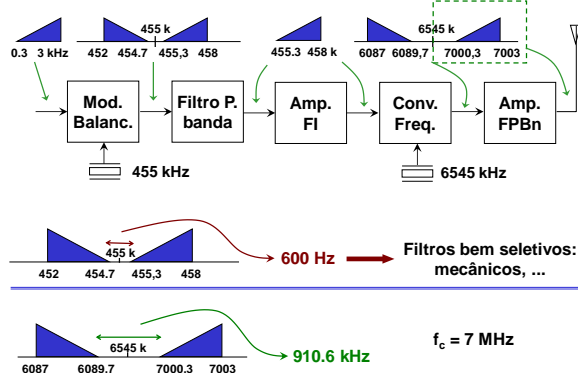
### Modulação por um único tom

- ❖ Sinal modulante:  $m(t) = A_m \cos(2\pi f_m t)$
- ❖ Portadora:  $c(t) = A_c \cos(2\pi f_c t)$
- ❖ AMDSB-SC:  $s(t) = \frac{A_m A_c}{2} \cos[2\pi(f_c - f_m)t] + \frac{A_m A_c}{2} \cos[2\pi(f_c + f_m)t]$
- ❖ SSB:  $s(t) = \frac{A_m A_c}{2} \cos[2\pi(f_c - f_m)t]$  ou  $\frac{A_m A_c}{2} \cos[2\pi(f_c + f_m)t]$

### Espectro unilateral de amplitude e de potência (SSB superior)



### Diagrama em blocos de um transmissor para SSB



### Modulação SSB por deslocamento de fase

- ❖ A modulação SSB pode ser descrita pela seguinte equação:

$$s(t) = \frac{A_c}{2} \{m(t)\cos(2\pi f_c t) \pm \hat{m}(t)\sin(2\pi f_c t)\}$$

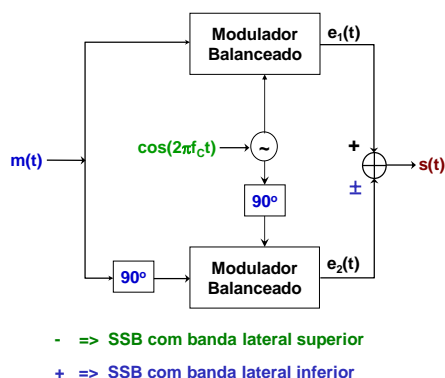
- - → SSB com banda lateral superior.
- + → SSB com banda lateral inferior.

- $\hat{m}(t)$  é a transformada de Hilbert de  $m(t)$

$$\hat{m}(t) = m(t) * \frac{1}{\pi} = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{m(\xi)}{t - \xi} d\xi$$

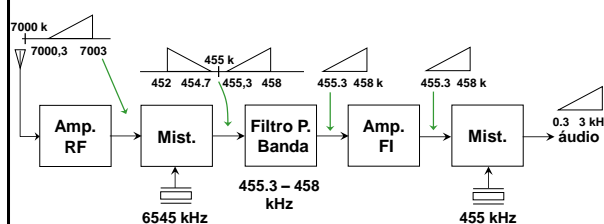
- A transformada de Hilbert, fisicamente, corresponde ao deslocamento de todas as componentes de frequência de  $m(t)$  por  $\pi/2$  radianos.
- O diagrama de blocos na próxima página pode ser utilizado para gerar o sinal SSB.

### Modulador SSB por deslocamento de fase



- => SSB com banda lateral superior
- + => SSB com banda lateral inferior

### Diagrama em blocos de um receptor SSB



- ❖ Demodulação: O processo de detecção do sinal SSB é o mesmo do sistema AMDSB-SC, isto é, utiliza-se um detector de produto.

**Detector de produto**

$$s(t) = A \cos[2\pi(f_c + f_m)t] \rightarrow \text{FPBx} \rightarrow m(t)$$

$\cos(2\pi f_c t)$

$$s(t) = A \cos[(w_c + w_m)t] \cos(w_c t)$$

$$= \frac{A}{2} \cos(w_m t) + \frac{A}{2} \cos[2w_c + w_m)t]$$

**Após o FPBx**  $\rightarrow m(t) = \frac{A}{2} \cos(w_m t)$

❖ **Aplicações:**

- telefonia: multiplexação por divisão de frequência

❖ **Vantagens sobre AM convencional:**

- Economia de potência na transmissão,
- Menor largura de faixa,
- Menor ruído,

❖ **Desvantagens:** custo (circuitos complexos, ...)

am II marcelo bj 25

**Vantagens do sistema SSB sobre o AM convencional**

❖ **Economia na potência de transmissão:**

- Menor transmissão de potência pela eliminação da portadora e de uma das bandas laterais.
- Importante em comunicações móveis.

❖ **Largura de faixa:**

- $BW_{SSB} = \frac{1}{2} BW_{DSB}$  (possibilidade de dobrar o número de canais).

❖ **Ruído:**

- Quanto menor a largura de faixa, menor a potência de ruído introduzida.

❖ **Desvantagens:**

- Circuitos mais complexos.
- Frequências estáveis.
- Portanto apresenta custo maior

am II marcelo bj 26

**Multiplexação por divisão da frequência - FDM**

❖ **Multiplexagem:**

- Técnica para combinar diversos sinais independentes para formar um único sinal.

❖ **Tipos:**

- FDM: multiplexação por divisão da frequência.
- TDM: multiplexação por divisão do tempo.
- **TDM:** Empregado em telefonia digital.

❖ **FDM:**

- Empregado em telefonia analógica
- Canal de voz: 300 a 3400 Hz
- Largura de faixa nominal de ocupação:  $\Rightarrow 4 \text{ kHz}$ .  $\Rightarrow 0 - 4 \text{ kHz}$
- Tipo de modulação:
- **SSB:** para alocar o número máximo de canais dentro da largura de faixa disponível pelo sistema.
- Possibilidade de se chegar a 10800 canais multiplexados.

am II marcelo bj 27

**Multiplexação por divisão da frequência**  
**Transmissor e receptor SSB**

transmissor

receptor

am II marcelo bj 28

**FDM para quatro canais**

am II marcelo bj 29

**Formação do sistema FDM**

❖ **Pré-grupo básico de 6 canais**

❖ **Grupo básico de 12 canais = Dois pré-grupos básicos**

Portadoras em 96 e 120 kHz

❖ **Super grupo básico de 60 canais = Cinco grupos básicos**

- Na faixa entre 312 e 552 kHz
- Pode-se chegar a 10800 canais.

am II marcelo bj 30

### Modulação com banda lateral vestigial - AMVSB

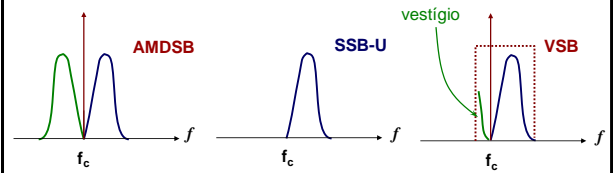
- ❖ **Aplicação:** Quando o sinal de informação contém componentes com frequências extremamente baixas.
  - **Exemplos:** sinais de vídeo e telegráficos.
- ❖ Neste caso a modulação SSB não é apropriada por causa da dificuldade em se isolar uma das bandas laterais.
- ❖ **Solução:**
  - utilizar um tipo de modulação intermediária entre a SSB e a DSB.
  - Na modulação VSB uma das bandas laterais é transmitida integralmente e somente uma parte da outra (**vestigio**) é transmitida.
  - **Geração:** por processo de filtragem.
- ❖ **Espectro de Amplitude da modulação AMVSB.**

am II

marcelo bj

31

### Espectro de amplitude da modulação AM-VSB.



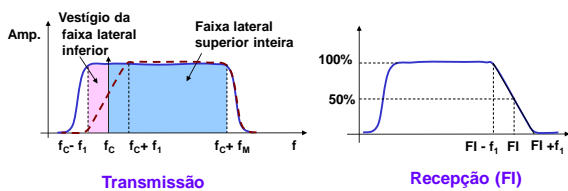
am II

marcelo bj

32

### Aplicação da modulação AM-VSB em televisão

- ❖ Para a transmissão de imagem com boa qualidade é necessária uma faixa de 4,2 MHz para as informações de vídeo.
- ❖ Se a modulação da portadora for em AM-DSB a largura de faixa resultante para o sinal modulado será de 8,4 MHz, não permitindo a instalação de muitas emissoras de TV.
- ❖ Para se conseguir uma faixa menor o sinal de vídeo é transmitido em AM-VSB



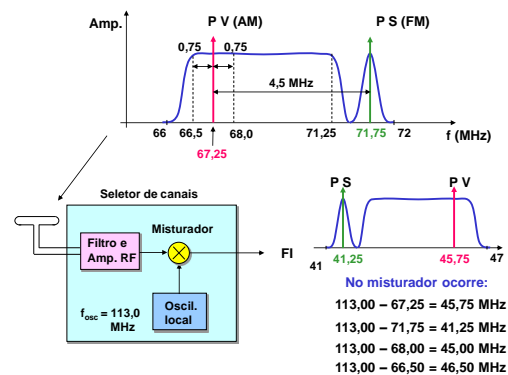
am II

marcelo bj

33

### AM-VSB em televisão

- ❖ Considerando que o receptor esteja sintonizando o canal 4



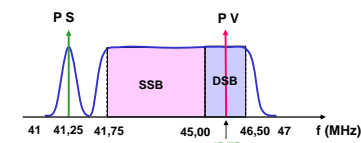
am II

marcelo bj

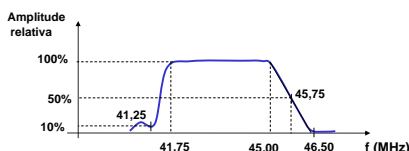
34

### AM-VSB em televisão

- ❖ Disposição de frequências na saída do seletor na faixa de 41 a 47 MHz



Resposta que o estágio de FI deve apresentar

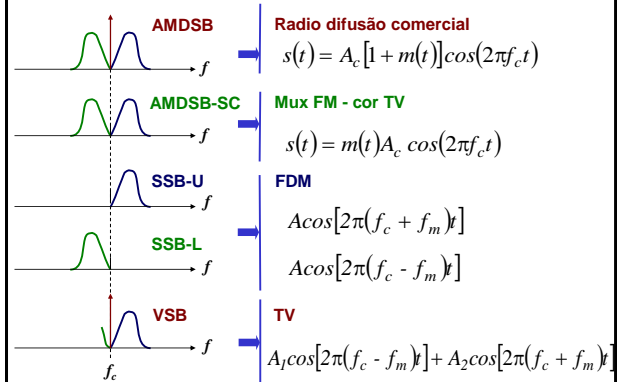


am II

marcelo bj

35

### resumo: formas de modulação em amplitude



am II

marcelo bj

36

## apêndice

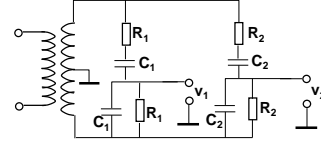
am II

marcelo bj

37

## deslocador de fase para SSB

- ❖ Circuito de banda larga para produzir uma variação de fase constante de  $90^\circ$  para a geração da modulação SSB.



- Este circuito é projetado para ser uma rede passa-tudo, com banda passante entre  $\omega_1$  e  $\omega_2$ .
  - $\omega_2 = 1/R_2C_2$  é a frequência de corte superior.
  - $\omega_1$  é estabelecida pelas outras constantes de tempo.

am II

marcelo bj

38

## Costas loop

- ❖ nas saídas dos multiplicadores tem-se o produto do sinal modulado pelas saídas do VCO (em fase (I) e em quadratura (Q)):

$$x_I(t) = m(t) \cos(\omega_o t + \theta_i) \cos(\omega_o t + \theta_o) = \frac{m(t)}{2} \{ \cos(\theta_i - \theta_o) + \cos(2\omega_o t + \theta_o + \theta_i) \}$$

$$x_Q(t) = m(t) \sin(\omega_o t + \theta_i) \sin(\omega_o t + \theta_o) = \frac{m(t)}{2} \{ \sin(\theta_i - \theta_o) + \sin(2\omega_o t + \theta_o + \theta_i) \}$$

- ❖ na entrada do filtro de faixa estreita tem-se o produto dos dois sinais nas saídas dos filtros passa-baixa dos multiplicadores:

$$v_1(t) = \frac{m^2(t)}{4} \cos(\theta_i - \theta_o) \sin(\theta_i - \theta_o)$$

$$v_1(t) = \frac{m^2(t)}{8} \{ \sin(2(\theta_i - \theta_o)) + \sin(0) \}$$

am II

marcelo bj

39

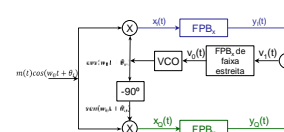
- ❖ na saída do filtro de faixa estreita / entrada do VCO:

$$v_0(t) = \frac{m^2(t)}{8} \sin(2(\theta_i - \theta_o))$$

- como o erro de fase é muito pequeno, então,

$$v_0(t) \approx \frac{m^2(t)}{4} (\theta_i - \theta_o) = k(\theta_i - \theta_o)$$

sinal de controle do vco  
(erro de fase)



am II

marcelo bj

40