

Modulação Linear em Onda Contínua

1. Introdução

Caracteriza-se pela translação direta em frequência do espectro da mensagem. Um sinal contínuo, denominado portadora ("carrier"), tem sua amplitude alterada por um outro sinal, denominado "modulante" que contém a informação desejada. O sinal modulante pode ser voz, vídeo ou dados. A largura de banda do sinal modulado varia entre uma e duas vezes a largura de banda do sinal modulante. Como exemplos de modulação linear em onda contínua citam-se: modulação em AM (empregada em rádio difusão em ondas médias, de 550 kHz a 1650 kHz); faixa lateral vestigial (VSB, empregada na modulação do sinal de vídeo em radiodifusão de sons e imagens - TV); faixa lateral única (SSB), empregada em comunicações ponto a ponto, civis e militares e por rádio-amadores; e faixa lateral dupla com portadora suprimida (DSB-SC).

Os diversos tipos de modulação em amplitude distinguem-se entre si por: largura de banda, eficiência espectral; eficiência de potência e simplicidade de demodulação (custo).

Vejamos a seguir algumas distribuições espectrais dos sinais modulados em amplitude

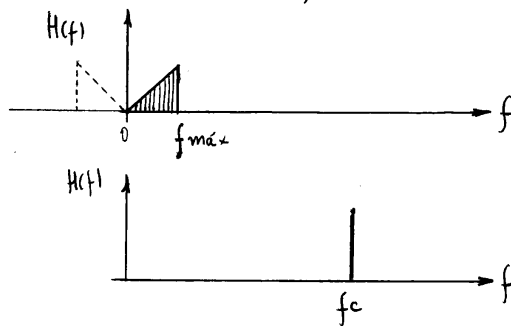


Figura 1

espectro do sinal modulante
 f_{\max} : mais alta frequência do sinal modulante

f_c : frequência da portadora.
 Observe que $f_c \gg f_{\max}$

1) modulação linear em onda contínua

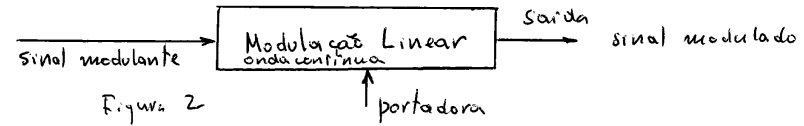
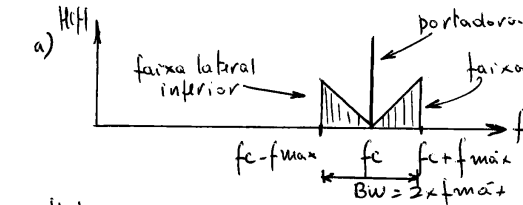


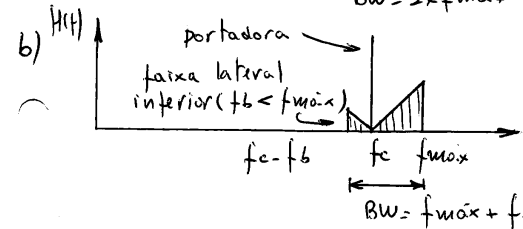
Figura 2

Exemplos de distribuição espectral.



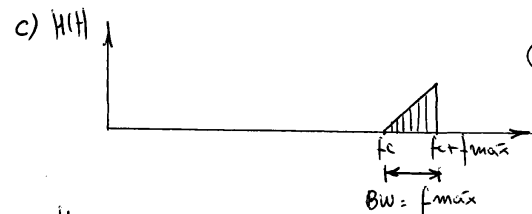
AM

- grande simplicidade (baixo custo) de demodulação;
- baixa eficiência de potência e de espectro



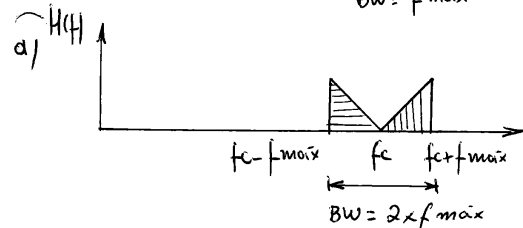
VSB

- relativa simplicidade de demodulação
- adequada à sinais de vídeo



SSB

- elevada eficiência espectral
- elevada eficiência de potência
- elevado custo de demodulação (filtro e oscilador local)



DSB-SC

- baixa eficiência espectral

Figura 3

2. Sinais em AM

A envoltória do sinal modulado reproduz a forma do sinal modulante. A informação está contida na envoltória do sinal transmitido. A portadora não possui informação em si própria.

2) modulação linear em onda contínua

2.1 Índice de Modulação em AM

O índice de modulação nos sistemas de rádio difusão tem seu valor máximo especificado em legislações específicas e a não observância desse valor limite pode acarretar sanções legais. O índice de modulação em AM, representado pela letra "m" e definido por:

$$m = \frac{V_{m\max} - V_{m\min}}{V_{m\max} + V_{m\min}}$$

Equação 1

$V_{m\max}$: máximo valor do sinal modulado

$V_{m\min}$: valor mínimo do sinal modulado

O índice de modulação é geralmente expresso em porcentagem. Neste caso $0 \leq m \leq 100\%$, ou como um número fracionário $0 \leq m \leq 1$. Na prática "m" é limitado a cerca de 80%.

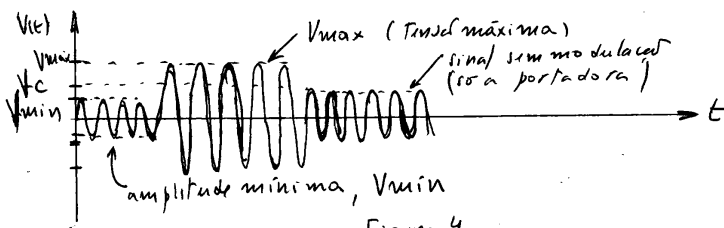


Figura 4

Quando $m > 1$ (ou $> 100\%$) ocorre a reversão de fase ou sobre-modulação do sinal. Neste caso, a envoltória do sinal transmitido NÃO é mais a réplica do sinal modulante. Diz-se então que ocorreu uma "DISTORÇÃO DE ENVELOPE". Veja a figura abaixo

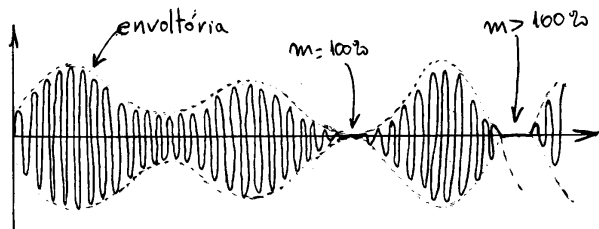


Figura 5

3/ modulação linear em onda contínua

2.2 Largura de banda em AM

A largura de banda dos sinais modulados em amplitude está mostrada na figura 3. Observe que toda a informação necessária está contida em apenas UMA banda lateral. Assim, transmitir-se a portadora e outra banda lateral e desperdício de potência. No entanto NÃO transmitir-se as duas bandas e a portadora, requer filtros mais seletivos e osciladores locais com elevada estabilidade, o que acresce o custo dos receptores. Em AM a largura de banda total é o dobro da banda do sinal de informação.

2.3 Distribuição de Potência em AM

A distribuição de potência de sinais modulados em AM pode ser obtida a partir da "eficiência de potência das faixas laterais", dada por

$$\eta_{AM} = \frac{m}{m+2}$$

Equação 2

m	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.85	0.9	1
η	0	4.7%	9%	13%	17%	20%	23%	26%	29%	31%	33%	33.3%
												29.8%

Exemplo. Para 100W de potência transmitida, a máxima eficiência é obtida quando $m=1$ e assim tem-se que $\eta = 1/3$. Logo 2/3 da potência total não é consumida pela portadora, ou seja, 66,6W. O restante da potência divide-se pelas DUAS bandas laterais. No caso de dois tons tem-se 16,6W para cada tom.

Observe que:

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{m\max} = V_{pc} (1+m) \\ V_{m\min} = V_{pc} (1-m) \end{array} \right\} \parallel \left\{ \begin{array}{l} \text{Quando } m=0 \\ V_{m\max} = V_{pc} \\ V_{m\min} = V_{pc} \end{array} \right\} \parallel \left\{ \begin{array}{l} \text{Quando } m=1 \\ V_{m\max} = 2V_{pc} \\ V_{m\min} = 0 \end{array} \right.$$

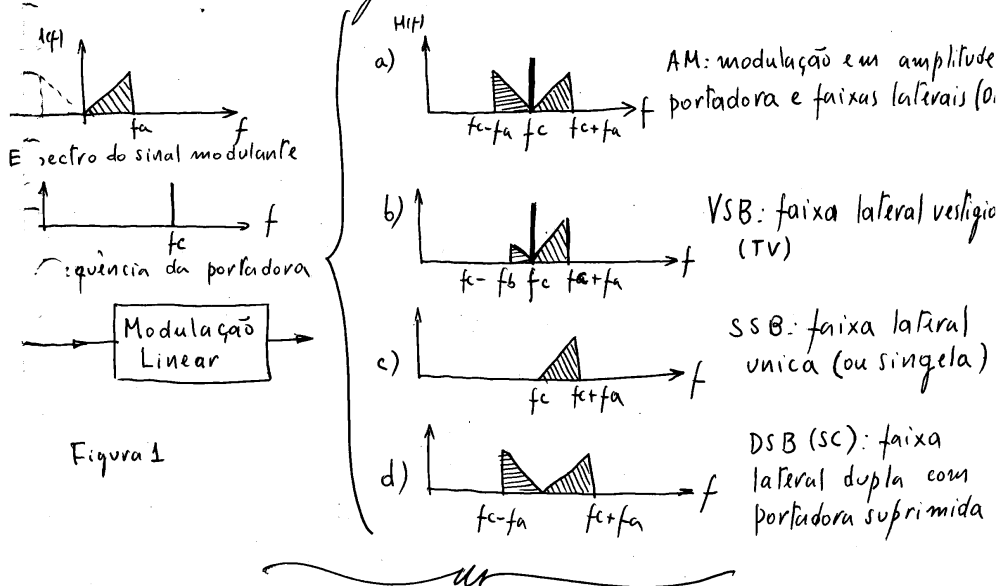
Onde V_{pc} é a tensão de pico da portadora

4/ modulação linear em onda contínua

Modulação Linear em Onda Contínua

Gibson

Caracteriza-se pela translação em frequência direta do espectro da mensagem. A largura do sinal modulado varia entre 1X e 2X a largura de banda do sinal modulante.



Sinais em AM (amplitude modulada): a envoltória do sinal modulado reproduz a forma do sinal modulante.

1.1 Índice de modulação $m = \frac{V_{max} - V_{min}}{V_{max} + V_{min}}$ ou 100%

$0 \leq \mu \leq 1$ → é o correto!

sem modulação → modulação máxima

Figura 2

Quando $\mu > 1$ (ou 100%), ocorre reversão de fase, ou sobre-modulação, neste caso, a envoltória do sinal modulado não mais é uma réplica do sinal modulante !!! → Distorção de envelope

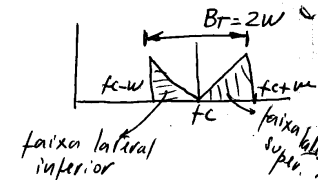
Na prática limita-se μ a 85%

Gibson

①

1.2 Largura de Banda: $B_T = 2W$

AM necessita do dobro da largura de banda de sinal em banda base.



1.3 Distribuição de Potência

Portadora: no mínimo 50% da potência total!
 Faixas laterais: o restante...

Eficiência de potência das bandas laterais (mas duas) $\eta_{SB} = \frac{m}{m+2}$

$V_{max} = V_c(1+\mu)$
 $V_{min} = V_c(1-\mu)$
 $\mu = 0 \Rightarrow \begin{cases} V_{max} = V_c \\ V_{min} = V_c \end{cases}$
 $\mu = 1 \Rightarrow \begin{cases} V_{max} = 2V_c \\ V_{min} = 0 \end{cases}$

Exemplo: Para 100 (ou) W de potência transmitida, a máxima eficiência é obtida quando $\mu = 1$, e assim:

66.6 W : só na portadora
 33.3 W + 33.3 W : nas bandas laterais

Reembre-se: a portadora não transporta informação da mensagem, mas facilita muito o processo de demodulação

desvantagem: baixa eficiência
 vantagem: receptor simples e de baixo custo

1.4 Equação geral

$x_c(t) = A_c \cos \omega_c t [1 + \mu x(t)]$

$\omega_c = 2\pi f_c$

Sinal da portadora
 Sinal de AM completo
 Índice de modulação
 Sinal modulante: é a informação, a mensagem. Pode ser tom, sinal de voz.

$X_c(f) = (f-f_c) + (f+f_m)$

faixas de pico é 2X a tensão de pico da portadora não modulada

Obs) Quando $\mu = 1$ (100%): a potência de pico de saída de um transmissor modulado por um tom é 4X a potência da portadora não modulada. (a potência média é 1.5X)
 (a tensão/corrente média é $\sqrt{1.5}$ X)

②

II. Sinais em DSB ("double-side band suppressed-carrier modulation")

A envoltória nao reproduz a forma do sinal modulante (reversões de fase) → não é possível a detecção por envelope! Requer um processo de demodulação mais complexo. A portadora nao é transmitida

1.1 Índice de modulação: $\mu=1$, e suprime-se a portadora

1.2 Largura de banda: $B_T = 2W$ (igual a AM)

1.3 Distribuição de Potência

Para um mesmo sinal de entrada, um transmissor DSB produz 4x a potência de banda lateral de um transmissor AM. Assim:

DSB	X	AM
Conserva potência		Requer maior potência
Demodulação mais complexa		Simples detecção por envelope

1.4 Equação Geral

$$x_c(t) = A_c \cos \omega_c t \cdot x(t)$$

Obs.) A restrição em transmissores é dada pela PEP (potência de pico da envoltória → "peak envelope power") possível pelo equipamento.

III. Sinais em SSB (banda lateral única): cada banda contém a mesma informação (mensagem). Assim, aliás de não transmitir-se a portadora, transmite-se apenas uma das duas bandas laterais.

SSB não é apropriado para transmissões de pulsos, dados digitais ou sinais com transições abruptas. Mesmo áudio, tem que filtrar a (leva a picos de tensão)

3.1 Índice de modulação:

3.2 Largura de banda: $B_T = W$ (economia de espectro e economia de potência)

3.3 Distribuição de potência: apenas na faixa desejada

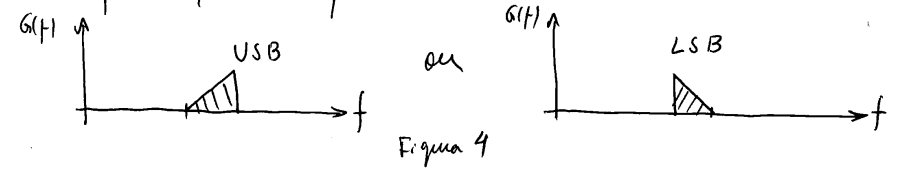
LSB: faixa inferior →
 ↳ ou uma é transmitida ↳
 USB: faixa superior

3.4 Equação Geral:

$$x_c(t) = \frac{1}{2} A_c A_m \cos(\omega_c \pm \omega_m) t$$

↑ USB
 ↓ LSB

Obs. Representação no espectro:



A representação no tempo é muito difícil, bem como determinar-se a potência de pico de envelope.

O processo de filtragem e demodulação é mais caro e complexo do que para AM.

IV Sinais em VSB (faixa lateral vestigial)

Empregada para sinais modulantes com grande largura de banda e reduzido conteúdo espectral de baixa frequência. A conservação de espectro chama por SSB, mas os sistemas de SSB práticos apresentam uma resposta de baixa frequência não nula. O DSB é melhor mas requer o dobro da largura de banda. A solução? Claro! VSB!!
 (Televisão (vídeo), fac-símil, sinais de dados em alta velocidade)

4.1 Índice de modulação

para VSB+C: é definido.
 (Televisão)

4.2 Largura de banda: $B_T = W + \beta \approx W$

4.3 Distribuição de potência: não tão concentrada quanto SSB
 - nem tão aberta quanto DSB

4.4 Equação geral: $x_c(t) = \frac{1}{2} A_c [x(t) \cos \omega_c t - x_q(t) \sin \omega_c t]$

$\beta \ll W \rightarrow VSB \approx SSB$; $\beta \uparrow \rightarrow VSB \approx DSB$

Obs: Para VSB+C pode usar detecção por envelope, para μ pequeno e β não muito pequeno:

$$A(t) \approx A_c [1 + \mu x(t)]$$

	Eficiência	Largura de Banda	Simplicidade do Receptor
AM	BAIXA	ALTA	ALTA
DSB	MÉDIA	MÉDIA	MÉDIA
SSB	ALTA	BAIXA	BAIXA
VSB	MÉDIA/ALTA	MÉDIA/BAIXA	MÉDIA

Gibson 5

V Moduladores e Transmissores em AM/DSB

5.1 Moduladores de Produto

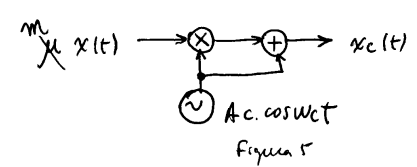


Figura 5

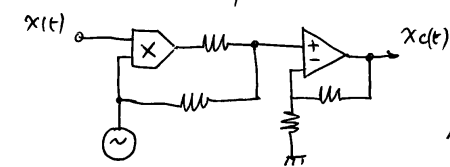


Figura 6

Modulador de produto para AM
 Tem que ter um sistema não linear ou variante no tempo.

5.2 Modulador Quadrático (modulação baixo nível)

$$v_{out} = a_1 v_{in} + a_2 v_{in}^2$$

\rightarrow AM (filtrando)
 Se $a_1=0 \rightarrow$ DSB (quadrático perfeito)

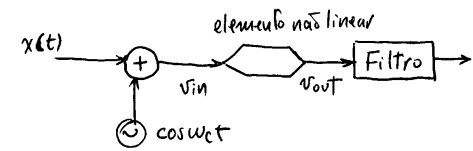


Figura 7

5.3 Modulador Balanceado

(DSB) SC
 porque não existe circuito quadrático perfeito...

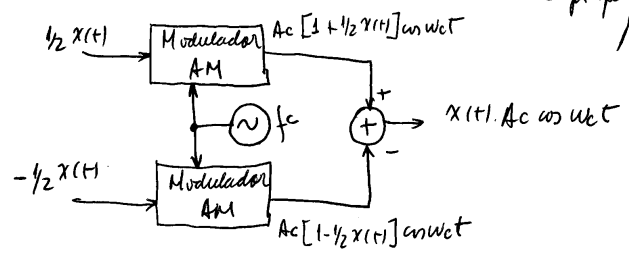


Figura 8

5.4 Modulador Comutado

(modulação em alto nível)

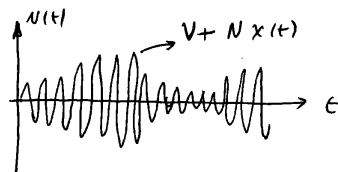
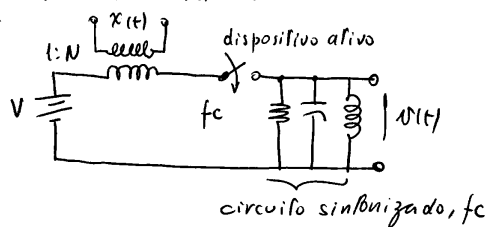


Figura 9

5.5 Transmissor de AM (alto nível)

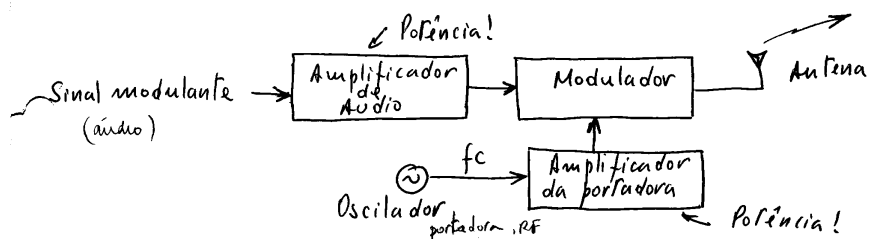


Figura 10

VI Moduladores e Transmissores em SSB/VSB

6.1 Modulador Balanceado

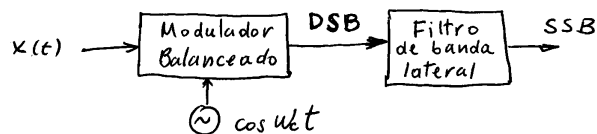
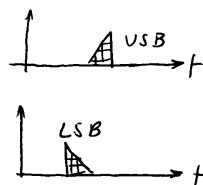


Figura 11



6.2 Geração de SSB

6.2.1 Dois Passos

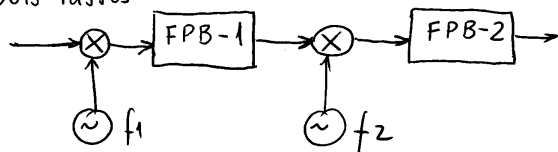


Figura 12

6.2.2 Método do Desvio de Fase (Phase Shift Method)

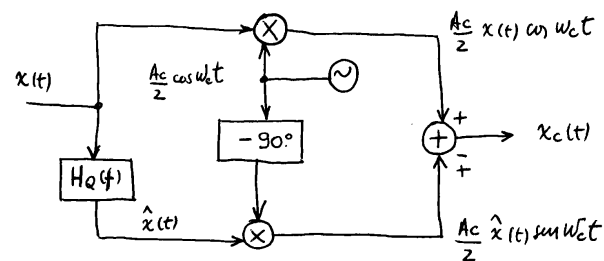


Figura 13

$H_q(f)$: desviador de fase de quadratura (rede irrealizável, na prática é realizada uma aproximação, o que leva a distorções em baixas frequências)

6.2.3 Modulador SSB de Weaver

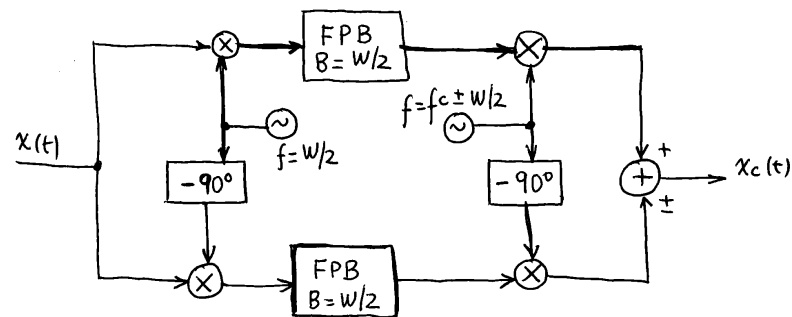


Figura 14

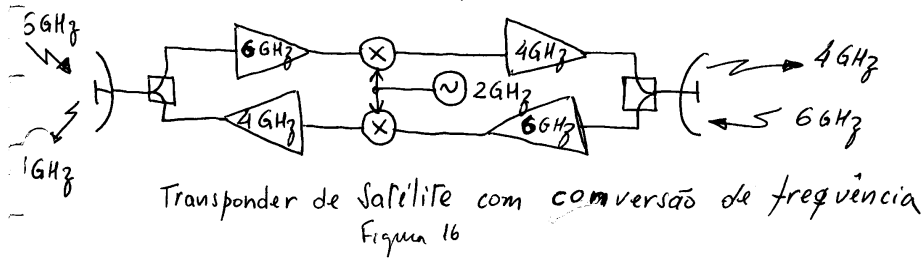
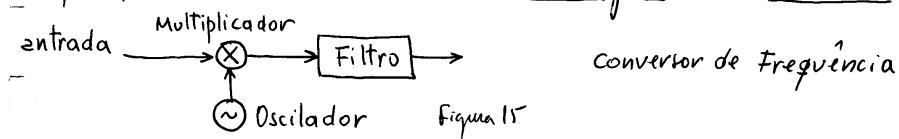
VII Conversão de Frequência e Demodulação

7.1 Conversão de Frequência

$$x(t) \cdot \cos w_1 t \cdot \cos w_2 t = \frac{1}{2} x(t) \cos(w_1 + w_2)t + \frac{1}{2} x(t) \cos(w_1 - w_2)t$$

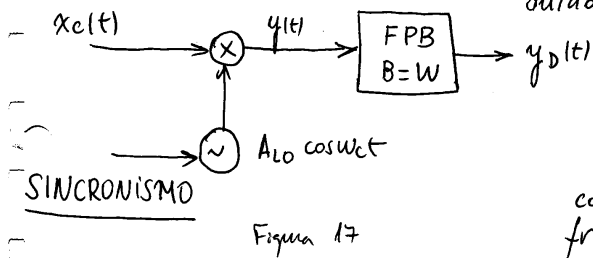
O produto consiste de duas frequências diferentes, $f_1 + f_2$ e $|f_1 - f_2|$. Os dispositivos que realizam esta operação são denominados de conversores de frequência ou misturadores.

A operação é denominada de heterodinagem ou mistura.



7.2 Detecção Síncrona

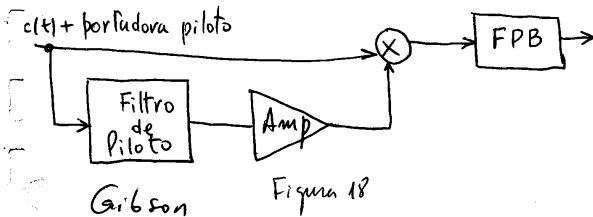
(Todos os tipos de modulação linear podem ser detectados por um demodulador de produto)



Supõe-se que o oscilador local está exatamente sincronizado com a portadora, em fase e em frequência, daí o nome, detecção síncrona ou detecção coerente.

↳ (difícil) solução, mandar parte da portadora (pilot carrier)

7.3 Detecção Homódina



Sincronismo

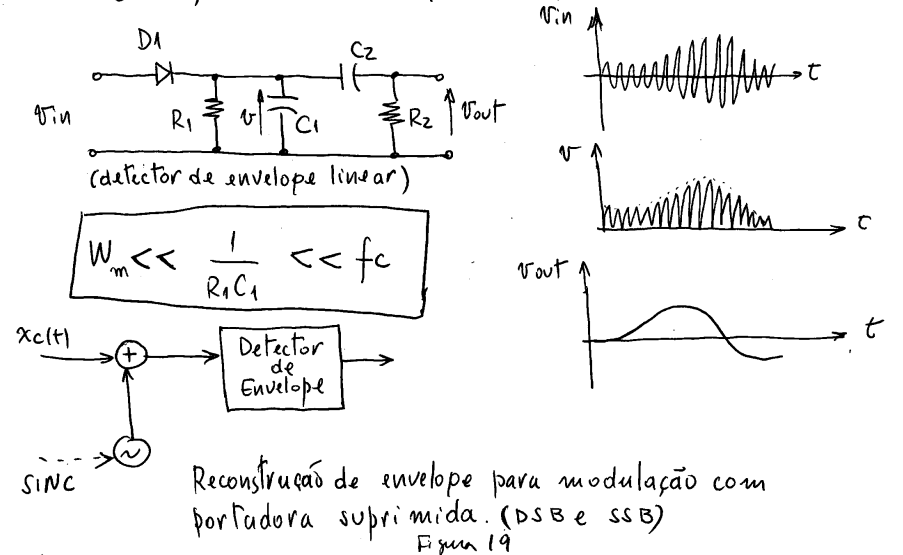
• Desvio de frequência: afeta DSB e SSB (mais em DSB já que um par de tons é gerado, desvios $< \pm 10$ Hz são toleráveis)

• Desvio de fase: novamente DSB é mais sensível (para LO e f_c em quadratura o sinal detectado dessa parece). Em SSB aparece como distorção por retardo, tolerável pelo ouvido humano, e pouco perturbador por tanto.

7.4 Demodulação Síncrona em AM

É maluco! Caro e desnecessário!!! Quase nunca é usado. Detectores síncronos funcionam em AM, mas tem custo muito, muito mais simples e barato.

7.5 Detecção de Envelope (AM)



Reconstrução de envelope para modulação com portadora suprimida. (DSB e SSB)