

## Teoria da Modulação em Frequência e Fase

- ◆ **Modulação em frequência, FM**, é um sistema no qual a amplitude da portadora é feita constante, contudo, sua frequência é variada de acordo com as variações do sinal modulante.

# Modulação Angular

- ◆ **Modulação em fase, PM**, é um sistema similar no qual a fase da portadora é variada em vez da frequência, contudo, a amplitude permanece constante.

## Descrição do Sistema

- ◆ A equação de uma onda ou sinal não modulado, ou ainda a portadora, pode ser escrita como:

## Modulação Angular

$$x(t) = A \operatorname{sen}(\omega t + \mathbf{j})$$

◆ onde:

- $x(t)$  é o valor instantâneo da tensão ou corrente,
- $A$  é a amplitude máxima,
- $\omega$  é a velocidade angular (rad/s) e
- $\mathbf{j}$  é o ângulo de fase (rad).

## Modulação Angular

- ◆ A porção na qual a frequência da portadora é variada de seu valor não modulado é chamado de **desvio de frequência** e deve ser proporcional aos valores instantâneos da tensão modulante.

## Modulação Angular

- ◆ A razão na qual a variação de frequência ou oscilação ocorrem é igual a frequência do sinal modulante.
- ◆ A figura 01 apresenta a variação da frequência no tempo, na qual pode-se verificar ser idêntico com a variação da tensão modulante no tempo.

# Modulação Angular

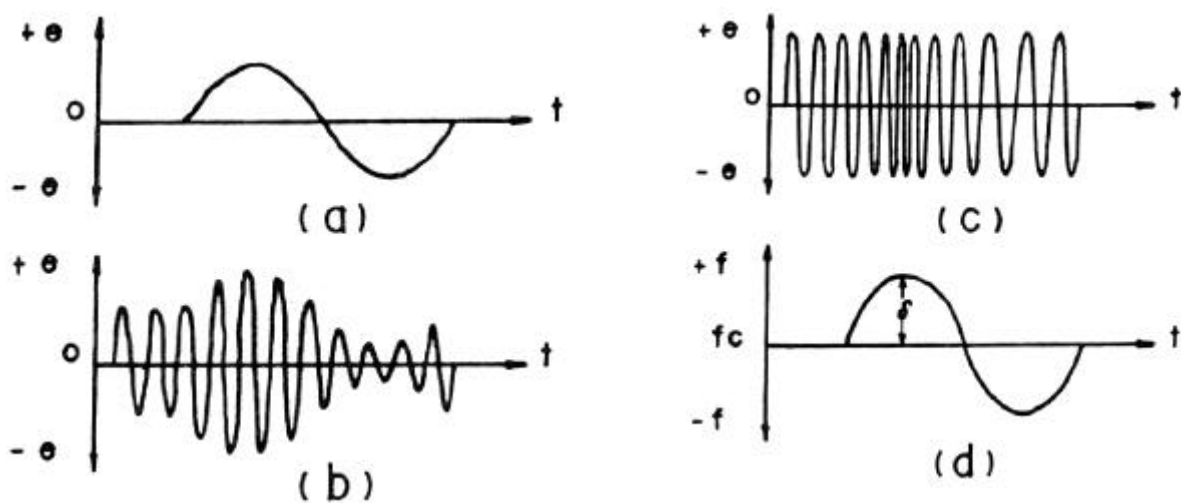


Figura 01 - Formas de onda com modulações básicas.

## Modulação Angular

- ◆ A amplitude da onda modulada em frequência permanece constante a todo o tempo, sendo a maior vantagem do sistema de modulação em frequência.



### Representação Matemática do FM

- ◆ A frequência instantânea  $f(t)$  da onda modulada em frequência será dado por:

$$f(t) = f_c \left( 1 + K_f \frac{E_m}{f_m} \cos \omega_m t \right)$$

## Modulação Angular

◆ onde:

- $f_c$  é a frequência da portadora não modulada ou frequência média,
- $k_f$  é a constante de proporcionalidade,
- $E_m \cos \mathbf{w}_m t$  é a equação da tensão modulante instantânea.

## Modulação Angular

- ◆ O **máximo desvio** para esse sinal ocorrerá quando o termo cosseno apresentar seu valor máximo, isto é  $\pm 1,0$ . Logo teremos:

$$f(t) = f_c \left( 1 + K_f E_m \right)$$

e o desvio máximo será dado por:

$$d = K_f E_m f_c$$

## Modulação Angular

- ◆ A amplitude instantânea do sinal modulado em frequência será dado por uma fórmula da forma:

$$e_{FM}(t) = A \text{ sen} \left[ F \left( \omega_c, \omega_m \right) \right]$$

onde  $F(\omega_c, \omega_m)$  é função das frequências portadora e modulante. Essa função representa um ângulo e será denominado de  $\mathbf{q}$ .

## Modulação Angular

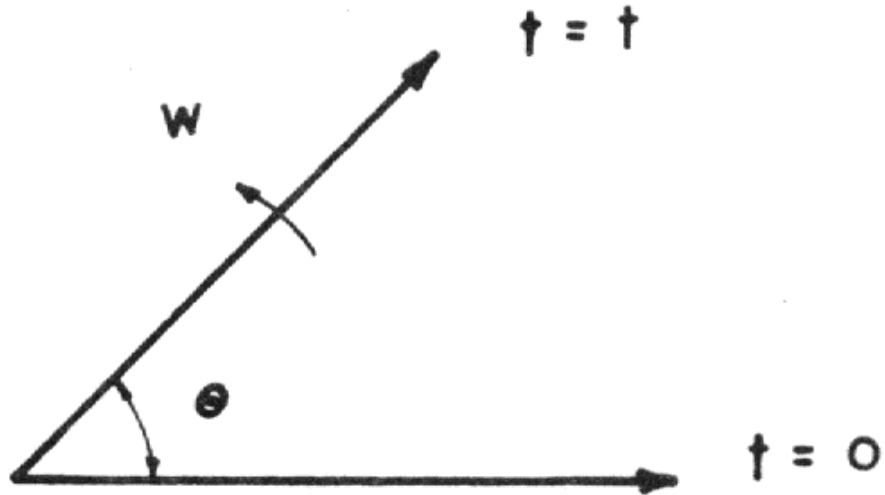


Figura 02 - Vetor representativo da Onda Modulada em Freqüência.

## Modulação Angular

◆ A figura 02 apresenta  $\theta$  sendo o ângulo traçado por um vetor A no tempo t.

◆ Se A girar com velocidade angular constante,  $\omega$ , esse ângulo  $q$  será dado por:

$$q = \omega \cdot t$$

## Modulação Angular

- ◆ Para determinarmos  $\mathbf{q}$  devemos integrar o valor de  $\omega$  em relação ao tempo:

$$\mathbf{q} = \int \mathbf{w} t = \int \mathbf{w}_c (1 + k_f E_m \cos \mathbf{w}_m t) dt$$

$$\mathbf{q} = \int \mathbf{w}_c dt + \int \mathbf{w}_c k_f E_m \cos \mathbf{w}_m t dt$$

## Modulação Angular

$$q = \omega_c t + \frac{k E_m \omega_c \sin \omega_m t}{\omega_m}$$

$$q = \omega_c t + \frac{k E_m f_c \sin \omega_m t}{f_m}$$



## Modulação Angular

$$\mathbf{q} = \mathbf{w}_c t + \frac{\mathbf{d}}{f_m} \text{sen } \mathbf{w}_m t$$

- ◆ A equação de tensão da onda modulada em frequência pode ser escrita já que conhecemos os valores de  $\mathbf{q}$ .

$$e(t) = A \text{sen} \left( \mathbf{w}_c t + \frac{\mathbf{d}}{f_m} \text{sen } \mathbf{w}_m t \right)$$

## Modulação Angular

- ◆ O índice de modulação para o FM,  $m_f$ , é definido pela relação entre o desvio de frequência e a frequência modulante.

$$m_f = \frac{d}{f_m}$$

## Modulação Angular

◆ Substituindo o valor de  $m_f$  na equação, temos:

$$e(t) = A \operatorname{sen} \left( \omega_c t + m_f \operatorname{sen} \omega_m t \right)$$

## Modulação Angular

- ◆ Verifica-se que o decréscimo da frequência modulante com a amplitude da tensão modulante permanecendo constante, o índice de modulação aumenta.
- ◆ Este fato servirá para distinguir a modulação em frequência da modulação em fase.

# Espectro de Frequência da Onda Modulada em Frequência.

- ◆ Considerando que a equação da onda modulada em frequência é o resultado de um **seno de um seno**, a única solução envolve o uso das funções de Bessel.

## Modulação Angular

- ◆ A solução desta função encontra-se sob a forma de um gráfico ou como uma tabela.

# Modulação Angular

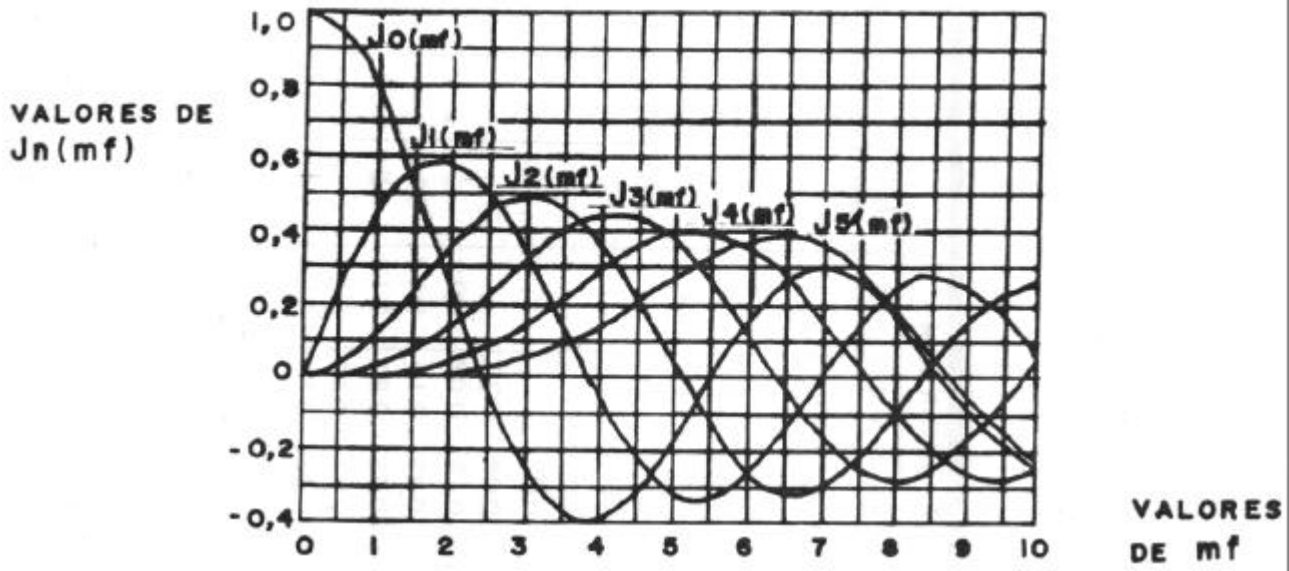


Figura 03 - Funções de Bessel.

# Modulação Angular

x (mf)	n OU ORDEM																
	J <sub>0</sub>	J <sub>1</sub>	J <sub>2</sub>	J <sub>3</sub>	J <sub>4</sub>	J <sub>5</sub>	J <sub>6</sub>	J <sub>7</sub>	J <sub>8</sub>	J <sub>9</sub>	J <sub>10</sub>	J <sub>11</sub>	J <sub>12</sub>	J <sub>13</sub>	J <sub>14</sub>	J <sub>15</sub>	J <sub>16</sub>
0.00	100	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0.25	098	012	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0.5	094	024	003	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1.0	077	044	011	002	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1.5	051	056	023	006	001	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2.0	022	058	035	013	003	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2.5	-005	050	045	022	007	002	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
3.0	-026	034	049	031	013	004	001	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4.0	-040	-007	036	043	028	013	005	002	—	—	—	—	—	—	—	—	—
5.0	-018	-033	005	036	039	026	013	005	002	—	—	—	—	—	—	—	—
6.0	015	-028	-024	011	036	036	025	013	006	002	—	—	—	—	—	—	—
7.0	030	000	-030	-017	016	035	034	023	013	006	002	—	—	—	—	—	—
8.0	017	023	-011	-029	-010	019	034	032	022	013	006	003	—	—	—	—	—
9.0	-009	024	014	-018	-027	-006	020	033	030	021	012	006	003	001	—	—	—
10.0	-025	004	025	006	-022	-023	-001	022	031	029	020	012	006	003	001	—	—
12.0	005	-022	-008	020	018	-007	-024	-017	005	023	030	027	020	012	007	003	001
15.0	-001	021	004	-019	-012	013	021	003	-017	-022	-009	010	024	028	025	018	012

Tabela 01 - Funções de Bessel de primeira ordem.



## Modulação Angular

◆ A equação desenvolvida será da forma:

$$\begin{aligned} e(t) = & AJ_0(mf) \operatorname{sen} \mathbf{w}_c t + \\ & + AJ_1(mf) \left[ \operatorname{sen}(\mathbf{w}_c + \mathbf{w}_m)t - \operatorname{sen}(\mathbf{w}_c - \mathbf{w}_m)t \right] + \\ & + AJ_2(mf) \left[ \operatorname{sen}(\mathbf{w}_c + 2\mathbf{w}_m)t + \operatorname{sen}(\mathbf{w}_c - 2\mathbf{w}_m)t \right] + \\ & + AJ_3(mf) \left[ \operatorname{sen}(\mathbf{w}_c + 3\mathbf{w}_m)t - \operatorname{sen}(\mathbf{w}_c - 3\mathbf{w}_m)t \right] + \\ & + AJ_4(mf) \left[ \operatorname{sen}(\mathbf{w}_c + 4\mathbf{w}_m)t + \operatorname{sen}(\mathbf{w}_c - 4\mathbf{w}_m)t \right] + \dots \end{aligned}$$

### Análise da Equação Expandida da Onda de FM.

- ◆ Verifica-se que cada par de faixa lateral é precedido pelo coeficiente  $J_n(m_f)$ , coeficiente da função de Bessel.

## Modulação Angular

- ◆ O sinal de FM apresenta um infinito número de faixas laterais, bem como a portadora.
- ◆ Cada faixa lateral ou raia lateral tem uma repetição de frequência de  $f_m$  ou  $\omega_m$

## Modulação Angular

- ◆ O índice de modulação determina quantas componentes de faixa laterais tem amplitude significativa na onda modulada em frequência.
- ◆ A distribuição das faixas laterais é simétrica em torno da frequência portadora.

## Modulação Angular

- ◆ Na onda de FM, a potência total transmitida **sempre** permanece constante.
- ◆ Um aumento da profundidade de modulação requer um aumento da **largura de faixa** exigida para o sinal.

## Modulação Angular

- ◆ Na prática, a largura de faixa para a onda de FM é aquela calculada para permitir que todas as componentes de faixa lateral de amplitude significativa seja considerada sob a mais precisa condições.

## Modulação Angular

- ◆ Na onda modulada em frequência, a amplitude da componente portadora não permanece constante com o aumento da profundidade de modulação.

## Modulação Angular

- ◆ É possível que a componente portadora da onda modulada em frequência desapareça completamente.
- ◆ Nestes casos, o índice de modulação é denominado de **EIGENVALUES**, — valor de nulo.



### Largura de Faixa e Espectro Exigido

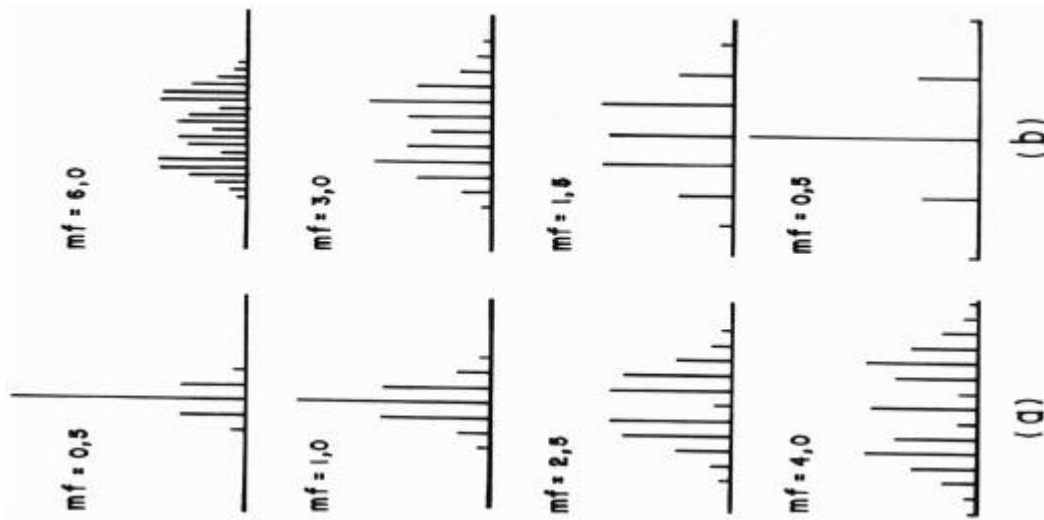
- ◆ Para calcular a largura de faixa exigida, precisamente, é necessário observar a tabela e verificar qual o último coeficiente  $J_n$  (mf) apresentado para aquele valor de índice de modulação.

## Modulação Angular

◆ Logo:

$$Bw = f_m \times 2 \times \text{coeficiente da maior faixa lateral significativa}$$

# Modulação Angular



**Figura 04 - Espectrograma de um sinal de FM.  
a - fm constante e aumento de  $\Delta f$**

## Modulação Angular

### b - $d$ constante e aumento de fm

- ◆ Uma regra prática, com boa aproximação, a largura de faixa exigida para conter a onda de FM é calcular duas vezes a soma do desvio mais a maior frequência modulante.

$$Bw = 2 x \left( d + f_{mmax} \right)$$

### Modulação em Fase

- ◆ Duas razões nos leva a considerar a modulação em fase em conjunto com a modulação em frequência:
  - ◆ a modulação em fase e a modulação em frequência representam o mesmo tipo de modulação, modulação angular;
  - ◆ é possível obter FM através da modulação em fase.

## Modulação Angular

- ◆ Através do Sistema Armstrong é possível obter a modulação em frequência pelo então denominado método indireto de geração de FM.

## Modulação Angular

- ◆ Se a fase  $\varphi$  da equação

$$e(t) = A \operatorname{sen}\left(\omega_c t + \mathbf{j}\right)$$

é variada tal que a amplitude do ângulo seja proporcional a amplitude instantânea da tensão modulante, a onda resultante será de PM.

## Modulação Angular

- ◆ A equação para a onda de PM será:

$$e(t) = A \operatorname{sen}\left(\omega_c t + \beta_m \operatorname{sen} \omega_m t\right)$$

onde  $\beta_m$  é o valor máximo da variação do ângulo introduzido por esse sinal modulante.



## Modulação Angular

- ◆ De forma a unificar a expressão temos

$$e(t) = A \operatorname{sen} \left( \omega_c t + m_p \operatorname{sen} \omega_m t \right)$$

## Modulação Angular

- ◆ Comparando as equações do sinal de FM e de PM, verificamos que elas são idênticas, diferenciando apenas na definição do índice de modulação.

### Comparação entre Sistemas:

### Modulação em Frequência e em Fase.

- ◆ Na modulação em fase o desvio de fase é proporcional a amplitude do sinal modulante, independente de sua frequência.

## Modulação Angular

- ◆ Na modulação em frequência o desvio de frequência é proporcional a amplitude da tensão modulante.
- ◆ Sob condições idênticas, FM e PM são indistinguíveis para uma frequência modulante simples.

## Modulação Angular

- ◆ Quando a frequência modulante é variada, o índice de modulação de PM permanecerá constante embora o índice de modulação de FM aumentará, para uma redução da frequência modulante.

## Modulação Angular

- ◆ O efeito prático é que se transmissões de FM são recebidas por um Rx de PM as baixas frequências terão um maior desvio de fase do que teria para transmissão de PM.
- ◆ Conseqüentemente, o sinal reproduzido apresentará o sinal modulante intensificado em graves.

## Modulação Angular

- ◆ Um sinal de PM recebido por um sistema de FM aparecerá necessitando de graves, podendo estas deficiências serem corrigidas pelo intensificador de graves aplicado ao sinal modulante.

### Modulação em Frequência e em Amplitude

- ◆ A amplitude da onda modulada em FM é independente do índice de modulação, logo baixo nível de modulação poderá ser utilizado e todos os amplificadores poderão ser em classe C — mais eficientes.



## Modulação Angular

- ◆ Os amplificadores manuseiam uma potência constante e toda a potência do sinal de FM é útil.
- ◆ No AM, a maior parte é a portadora que não indica nenhuma variação de modulação.

## Modulação Angular

- ◆ Existe um grande decréscimo no ruído por duas razões:
  - ◆ menor nível de ruído quando o FM é empregado;
  - ◆ os receptores de FM são dotados de limitadores de amplitude para remover as variações provocadas pelo ruído.

## Modulação Angular

- ◆ É possível reduzir o nível do ruído, adicionalmente, pelo aumento do desvio de frequência
- ◆ Existe uma faixa de guarda ou faixa de segurança entre estações de FM, tanto que existe menor interferência do que no AM.

## Modulação Angular

- ◆ Operando na parte superior da faixa de VHF e na faixa de UHF o sinal de FM propaga em onda espacial em um limitado raio de recepção — pode-se operar vários transmissores independentes, a uma mesma frequência.

## Modulação Angular

- ◆ O sinal de FM exige um canal mais largo, de 7 a 15 vezes maior que o necessário para o sinal de AM.
- ◆ Equipamentos transmissores e receptores de FM tendem ser mais complexos, logo são onerosos.

## Modulação Angular

- ◆ A área de recepção é muito menor do que para sinais de AM, sendo uma desvantagem para comunicações móveis sobre uma grande área.

### Ruído na Modulação em Frequência.

- ◆ A modulação em frequência é mais imune ao ruído do que a modulação em fase.

### Efeitos do Ruído na Portadora Triângulo de Ruído.

- ◆ Uma frequência simples de ruído afeta a saída de um Rx apenas se ela cai dentro da faixa passante deste Rx: a portadora e a tensão de ruído misturar-se-ão e uma frequência diferença audível interfere com a recepção do sinal.



## Modulação Angular

- ◆ Considerando este fato vetorialmente, vê-se que o vetor ruído é sobreposto ao vetor portadora, girando em torno dela com uma velocidade angular relativa  $\omega_n - \omega_c$ .

## Modulação Angular

- ◆ O máximo desvio na amplitude para o valor médio será  $E_n$  e o máximo desvio de fase será:

$$j = \text{sen}^{-1} \left( \frac{E_n}{E_c} \right)$$

## Modulação Angular

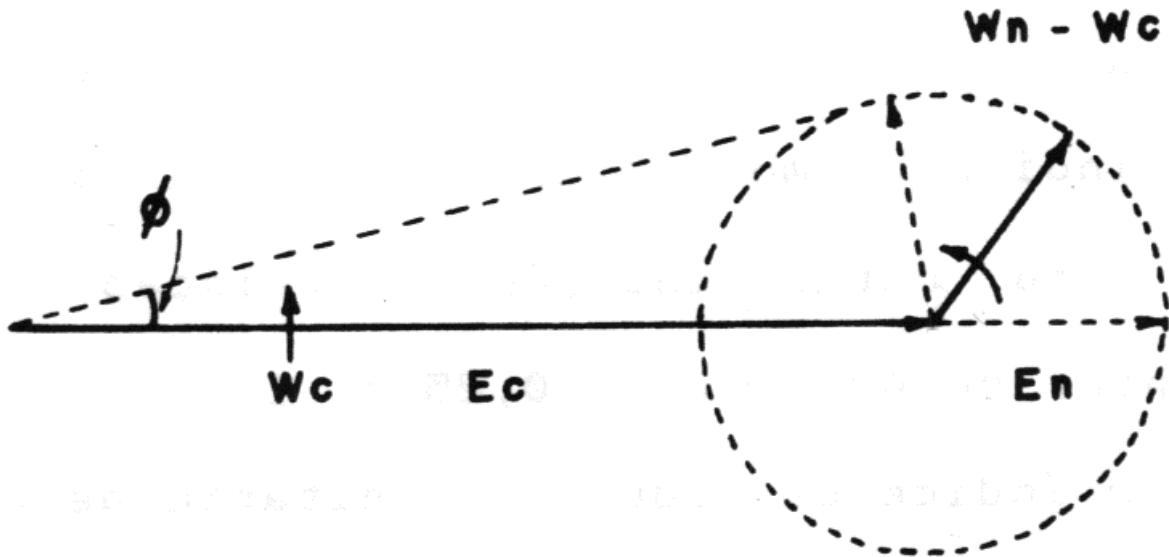


Figura 05 - Efeitos do vetor ruído na portadora.

## Modulação Angular

- ◆ Considerando  $E_n = E_c / 4$ , o índice de modulação em amplitude para esta condição será:

$$m_a = \frac{E_n}{E_c} = \frac{0,25}{1,0} = 0,25$$

## Modulação Angular

◆ O máximo desvio será:

$$\mathbf{j} = \text{sen}^{-1}\left(\frac{E_n}{E_c}\right) = \text{sen}^{-1}\left(\frac{0,25}{1,0}\right) = 14,5^\circ$$

## Modulação Angular

- ◆ O Rx de AM não será afetado pela variação de fase, mas o Rx de FM será molestado pela variação de amplitude.
- ◆ Essa variação poderá ser removida pelo limitador de amplitude.

## Modulação Angular

- ◆ Façamos a comparação sob condições que promovem o pior caso possível para o FM; consideremos um sinal modulante de 15 kHz e índice de modulante unitário.

## Modulação Angular

◆ Sob estas condições a relação sinal - ruído, relação S/R, para o

Rx de AM será:

$$\frac{S}{R} = \frac{0,25}{1,0} = 0,25$$



## Modulação Angular

- ◆ Para o FM devemos converter o índice de modulação unitário de radianos para graus.
- ◆  $1 \text{ rad} = 57,3^\circ$  e a relação será:

$$\mathbf{j} = \text{sen}^{-1}\left(\frac{E_n}{E_c}\right) = \text{sen}^{-1}\left(\frac{0,25}{1,0}\right) = 14,5^\circ$$

apenas pouca coisa pior.

## Modulação Angular

- ◆ Variações na frequência do ruído modulante não afetam a relação S/R para o Rx de AM.
- ◆ Para o FM a relação S/R permanece constante; logo o índice de modulação e o máximo desvio de fase também permanecem.

## Modulação Angular

- ◆ Se a frequência do ruído é difundida na faixa passante do Rx a saída do ruído no Rx diminuiria uniformemente com a largura de faixa do ruído para o FM enquanto que ela permanece constante para o AM.

## Modulação Angular

- ◆ O triângulo de ruído no FM é a distribuição do ruído ao longo do espectro de frequência do sinal.
- ◆ A correspondente distribuição no AM é, certamente, um retângulo.

## Modulação Angular



Figura 06 - Distribuição do ruído na faixa - Triângulo de ruído.  
a - valor máximo  $m_f = 1,0$

## Modulação Angular

**b - valor mínimo mf - 5,0**

- ◆ Comparando as duas distribuições, verifica-se que o FM apresenta uma melhoria de apenas para uma relação S/R de tensão  $\sqrt{3}:1$  e de 3:1 para uma relação S/R de potência, quando comparado ao AM.

## Modulação Angular

- ◆ O limitador de amplitude é um dispositivo acionado pela intensidade de sinal e tende a rejeitar o sinal mais fraco se dois sinais simultâneos são recebidos.

## Modulação Angular

- ◆ Se o pico da tensão do ruído excede a tensão do sinal, o sinal será excluído pelo limitador. Sob condições de relação S/R muito baixa, o sistema de AM será superior.



## Modulação Angular

- ◆ É importante citar que  $m_a = 1$  é o máximo índice de modulação permitido ao AM, enquanto no FM não existe limitações.
- ◆ Limita-se apenas o desvio máximo em 75 kHz para o serviço de radiodifusão comercial de faixa larga.

## Modulação Angular

- ◆ Para uma dada S/R existente na saída do limitador em amplitude do Rx de FM ela será reduzida proporcionalmente ao aumento do índice de modulação.
- ◆ A relação S/R de potência será proporcional ao quadrado do índice.

## Modulação Angular

- ◆ A partir desta afirmativa, quando  $m_f = 5$ , o mais alto índice de modulação permitido, quando  $f_m = 15$  kHz, a S/R será de 25:1, igual a 14 dB melhor do que no AM.
- ◆ O FM ainda possui propriedades que permite a troca da largura de faixa com a S/R, o que não pode ser feito no AM.

## Modulação Angular

- ◆ A modulação em fase tem essa propriedade e todas as propriedades de imunidade ao ruído igual ao do FM, exceto o triângulo de ruído.

## Modulação Angular

- ◆ Sob condições idênticas, o FM terá uma S/R de 4,7 dB melhor do que o PM, indicando a preferência do FM para transmissões práticas.

## Modulação Angular

- ◆ Não se pode aumentar a largura de faixa e o máximo desvio indefinidamente para o FM.
- ◆ Quando um pulso é aplicado a um circuito sintonizado sua amplitude máxima é proporcional a raiz quadrada da largura de faixa do circuito.

## Modulação Angular

- ◆ Se um pulso, utilizando uma grande largura de faixa e um grande desvio, é aplicado a um circuito sintonizado de uma seção de RF resultará em um pulso grandes proporções.

## Modulação Angular

- ◆ No limitador, se o pulso excede a cerca da metade do sinal portadora, este falha e quando este pulso excede a amplitude da portadora, o limitador torna-se ainda pior, limitando o sinal.
- ◆ Dizemos nessa situação que o Rx foi capturado pelo ruído.



## Modulação Angular

- ◆ O **desvio de 75 kHz** é um compromisso entre os dois efeitos discutidos.

### Pré-ênfase e Dê-ênfase

- ◆ O triângulo de ruído mostrou que o ruído tem um maior efeito nas mais altas frequências modulantes do que nas frequências mais baixas.

## Modulação Angular

- ◆ Se as frequências mais altas são artificialmente intensificadas ou reforçadas no transmissor e, correspondentemente cortadas no receptor, uma melhoria na imunidade ao ruído será esperada.

## Modulação Angular

- ◆ O reforço nas mais altas frequências modulantes, de acordo com uma curva pré-disposta, é denominada de pré-ênfase e a compensação no receptor é denominada de dê-ênfase.

# Modulação Angular

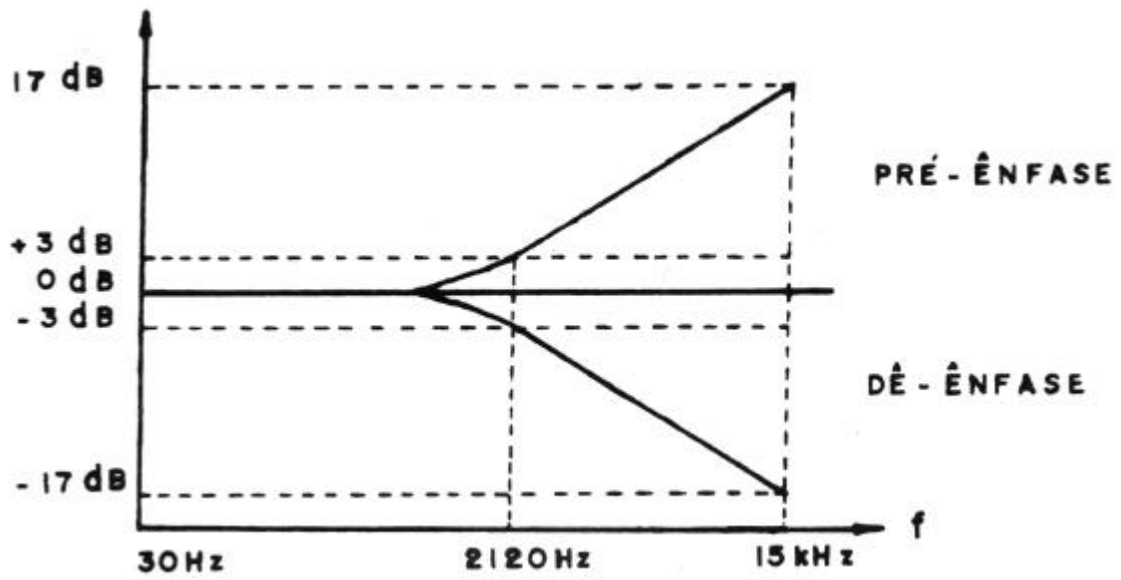


Figura 08 - Curva de ênfase de 75 μs

## Modulação Angular

- ◆ Se dois sinais modulantes têm a mesma amplitude inicial e um deles é pré-enfatizado em duas vezes, ao passo que o outro não é alterado, sendo eles de frequência muito baixa, então o Rx terá dê-enfatizado o primeiro por um fator igual a 2 para assegurar que ambos tenham a mesma amplitude na saída do Rx.

## Modulação Angular

- ◆ Antes da demodulação, nos intervalos susceptíveis a interferência do ruído o sinal enfatizado tem duas vezes o desvio daquele não enfatizado e desta forma será mais imune.

## Modulação Angular

- ◆ A pré-ênfase na radiodifusão de FM e nas transmissões de som de TV foram padronizadas em  $75\mu\text{s}$  mas um número de outros serviços utilizam o valor de  $50\mu\text{s}$ .



## Modulação Angular

- ◆ O uso do microsegundo define uma curva de resposta que está a 3dB abaixo da frequência cuja constante de tempo RC é 75μs ou 50μs. Essa frequência é dada por:

$$f = \frac{1}{2p\sqrt{RC}}$$

sendo 2120 Hz para 75μs e de 3180 Hz para 50μs.

# Modulação Angular



Figura 07 - Circuito de ênfase de 75 μs

a - Pré - ênfase

b - Dê - ênfase

## Modulação Angular

- ◆ Deve-se considerar que, quando a pré-ênfase é aplicada, o sinal resultante não sobremodule a portadora, excedendo o desvio de 75 kHz ou distorção ocorrerá.

## Modulação Angular

- ◆ Existe um limite prático para a pré-enfatização sendo, sempre, um compromisso entre a proteção para as altas frequências modulantes de um lado e o risco de sobremodulação por outro.

## Modulação Angular

- ◆ Se ênfase fosse aplicada a modulação em amplitude, algum resultado seria conseguido, mas não tão grande como no FM, uma vez que as mais altas frequências modulantes no AM não são afetadas pelo ruído mais do que as outras o são.

## Modulação Angular

- ◆ Outra dificuldade seria sua implantação, desde que extensas modificações seriam necessárias sob o ponto de vista do vasto número de receptores em uso.

### Outras formas de interferências

### Interferência do Canal Adjacente

- ◆ A modulação em frequência oferece não apenas melhor S/R, mas também melhor discriminação contra sinais interferentes, não importando a fonte.

## Modulação Angular

- ◆ Cada canal do sistema de FM faixa larga ocupa 200 kHz sendo que apenas 180 kHz são utilizados, resultando em 20 kHz como banda de guarda.
- ◆ Esta banda de guarda é um modo direto de obter-se uma maior redução da interferência do canal adjacente.



### Interferência do Co-Canal - Efeito Captura

- ◆ Relembremos que o limitador utiliza o princípio de deixar passar o sinal mais forte e elimina o mais fraco.
- ◆ Torne-se necessário que o sinal tenha pelo menos duas vezes a amplitude de pico do ruído para seu funcionamento adequado.

## Modulação Angular

- ◆ Analisemos a situação de dois Tx e um Rx operando em uma mesma frequência.
- ◆ Se o segundo Tx tem sinal menor do que a metade do primeiro, conseqüentemente o segundo Tx será inaudível não provocando nenhuma interferência.

## Modulação Angular

- ◆ Se o Rx move em direção ao segundo Tx teremos então uma situação na qual o segundo Tx será audível ora o primeiro até um ponto no qual o primeiro será totalmente excluído.
- ◆ Dizemos, nesta situação, que o Rx foi capturado pelo segundo Tx.

## Modulação Angular

- ◆ Se o Rx está entre os dois Tx, próximo ao centro, e as condições de desvanecimento prevalecem, haverá uma alternância na recepção de um ou de outro Tx.

### Comparação entre o FM Faixa Larga e o FM Faixa Estreita

- ◆ O FM faixa larga foi definido como aquele no qual o índice de modulação, normalmente, excede a unidade.

## Modulação Angular

- ◆ O FM faixa estreita é normalmente próximo a unidade, desde que a máxima frequência modulante é usualmente de 3,0 kHz e o máximo desvio é tipicamente de 5 kHz.

## Modulação Angular

- ◆ O sistema de FM faixa larga ocupará 15 vezes a largura de faixa do sistema faixa estreita sendo utilizado na radiodifusão para entretenimento, enquanto que o faixa estreita é empregado em equipamentos de comunicações.

## Modulação Angular

- ◆ Aplicações do FM faixa estreita: serviço de comunicação móvel em FM, incluindo a polícia, ambulância, rádio taxi, serviços de reparos aplicando o rádio controle e serviços tais como *flying doctor*.



## Modulação Angular

- ◆ Apesar das altas frequências serem atenuadas, a fala resultante será perfeitamente clara e compreensível.
- ◆ Desvios máximos de 5 a 10 kHz serão permitidos e o espaço do canal não será muito maior do que na radiodifusão de AM.

## Modulação Angular

- ◆ Sistemas com desvios ainda menores poderão ser encontrados.

Pré-ênfase e dê-ênfase são também utilizados.

### Sistema de Mutiplex - FM estereofônico.

- ◆ O transmissor de FM estéreo é um sistema de modulação no qual a informação é enviada ao receptor de modo a capacitá-lo a reproduzir um material estéreo original.

## Modulação Angular

- ◆ Semelhante ao sistema de TV a cores, sofreu a desvantagem de ser concebido, mais complicado do que o necessário, a fim de assegurar um modo compatível com o sistema monoral já existente.

## Modulação Angular

- ◆ Logo nos não teremos um canal direito e um esquerdo sendo transmitido simultaneamente e independentemente.
- ◆ A realidade é que temos a soma dos dois canais como um único canal e a diferença com um outro canal.

## Modulação Angular

- ◆ A soma é utilizada como sinal modulante da portadora de FM e transmitida de maneira usual, permitindo a recepção para Rx monoral.

## Modulação Angular

- ◆ A diferença modula uma subportadora de 38 kHz, modulação em amplitude com portadora suprimida. As faixas laterais estendem-se de 23 a 53 kHz.
- ◆ O sinal original de 30 Hz a 15 kHz juntamente com o sinal diferença na faixa de 23 a 53 kHz modulam a portadora.

## Modulação Angular

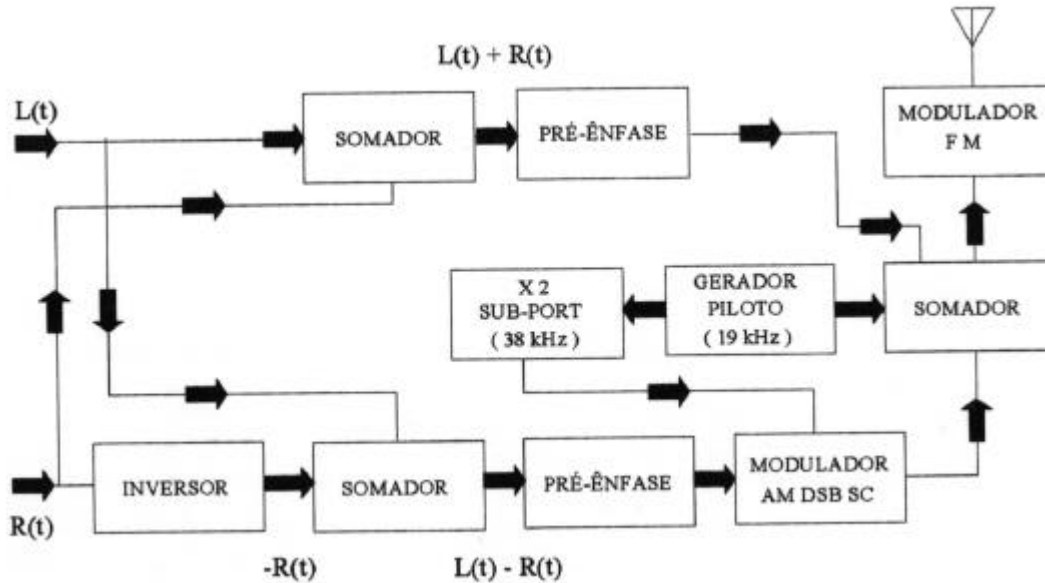
- ◆ As frequências de 23 a 53 kHz são filtradas para um Rx mono-  
ral, logo são ignoradas.
- ◆ Para um Rx estéreo, todo o sinal é demodulado e para facilitar  
este processo uma portadora piloto de 19 kHz, metade do valor  
da subportadora, é transmitida.



## Modulação Angular

- ◆ Os sinais soma e diferença são então adicionados e subtraídos em redes de combinação separadas para produzir os canais direito e esquerdo.
- ◆ Estes sinais alimentam cada cadeia de amplificadores, reproduzindo os canais do sistema.

# Modulação Angular



## Codificação do FM Estereofônico

### Geração de Modulação em Frequência.

- ◆ O requisito principal à geração de FM é uma frequência de saída variável com variações proporcionais a amplitude instantânea da tensão modulante.

## Modulação Angular

- ◆ Requisitos subsidiários são aqueles em que a amplitude modulada seja constante e o desvio dependente da frequência modulante.

## Métodos de FM.

- ◆ Se a capacitância ou a indutância de um circuito sintonizado LC podem ser variados, modulação em frequência de alguma forma resultará.

## Modulação Angular

- ◆ Se essa variação é feita diretamente proporcional a tensão modulante aplicada, um verdadeiro FM será obtido.
- ◆ Existem vários dispositivos cuja reatância podem ser variada pela aplicação de tensão.

## Modulação Angular

- ◆ As reatâncias a três terminais incluem o FET, transistor bipolar e a válvula.
- ◆ São dispositivos normais no qual o arranjo elaborado apresenta esta propriedade. O dispositivo mais comum a dois terminais é o diodo varicap.

### Métodos Diretos Modulador de Reatância Básico

- ◆ O circuito apresentado é um circuito básico de um modulador de reatância utilizando FET.



## Modulação Angular

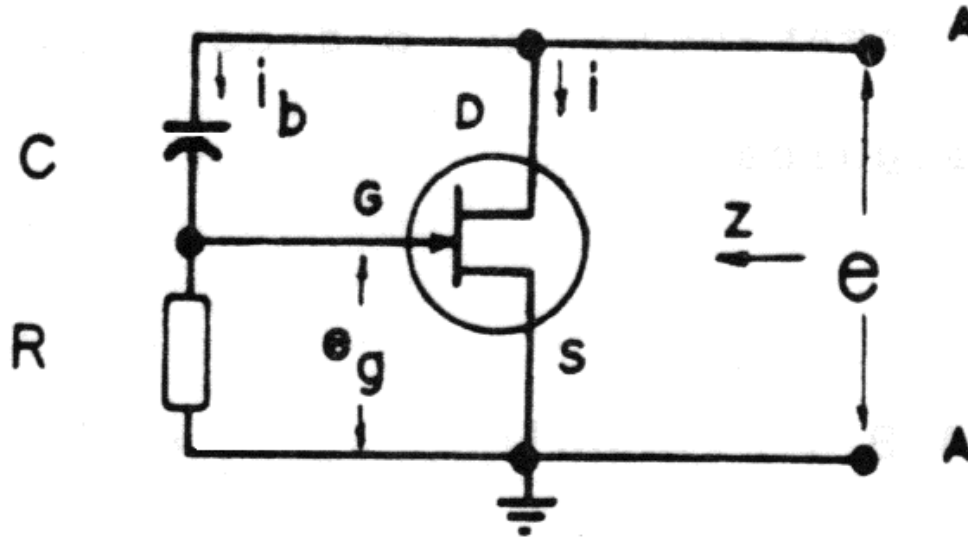


Figura 09 - Modulador de Reatância Básico

## Modulação Angular

- ◆ Comporta-se como uma reatância a três terminais que, conectada a um circuito tanque do oscilador, realiza a modulação em frequência.
- ◆ Ele pode ser feito indutivo por uma variação simples de componentes.

## Modulação Angular

- ◆ Apresenta uma reatância proporcional à transcondutância do componente cuja variação poderá ser feita dependente da polarização de gate e de suas variações.

### Teoria dos Moduladores de Reatância.

- ◆ Para determinarmos a impedância  $Z$  uma tensão  $e$  será aplicada aos terminais A-A e calcula-se a corrente.
- ◆ A tensão dividida pela corrente fornecerá a impedância.

## Modulação Angular

- ◆ Dois requisitos devem ser satisfeitos:
  - ◆ a corrente  $i_b$  da rede de polarização deve ser desprezível comparada a corrente de dreno - a impedância da rede de polarização deve ser suficientemente grande para ser ignorada;

## Modulação Angular

- ◆ a impedância dreno-gate deve ser maior do que a impedância gate-fonte, preferivelmente numa relação de 5:1.

## Modulação Angular

◆ Analisando o circuito, podemos escrever:

$$e_g = i_d \cdot R = \frac{e \cdot R}{R - jX_c}$$

$$i_d = g_m \cdot e_g = \frac{g_m \cdot e \cdot R}{R - jX_c}$$

## Modulação Angular

◆ A impedância vista nos terminais A-A será:

$$Z = \frac{e}{i_d} = \frac{e}{\frac{g_m \cdot e \cdot R}{R - jX_c}}$$

$$Z = \frac{R - jX_c}{g_m R}$$



## Modulação Angular

$$Z = \frac{1}{g_m} \cdot \frac{1 - jX_c}{R}$$

◆ Se  $X_c \gg R$  a equação será reduzida para:

$$Z = \frac{-jX_c}{g_m \cdot R}$$

## Modulação Angular

◆ Esta impedância é uma reatância e pode ser escrita:

$$X_{eq} = \frac{X_c}{g_m \cdot R} = \frac{1}{2 \cdot \mathbf{p} \cdot f \cdot g_m \cdot R \cdot C}$$

$$X_{eq} = \frac{1}{2 \cdot \mathbf{p} \cdot f \cdot C_{eq}}$$

## Modulação Angular

- ◆ Pela equação verifica-se que sob condições a impedância de entrada do dispositivo é uma reatância dada por:

$$C_{eq} = g_m \cdot R \cdot C$$

## Modulação Angular

- ◆ Analisando a equação vemos:
  - ◆ a capacitância equivalente depende da transcondutância do dispositivo e pode ser variada com a tensão de polarização;

## Modulação Angular

- ◆ a capacitância pode ser ajustada pela modificação dos componentes R e C;
- ◆ a expressão  $gm.R.C$  tem dimensão correta de capacitância.

## Modulação Angular

- ◆ Se  $R$  não é muito menor do que  $X_c$ , a tensão de gate não estará defasada exatamente de  $90^\circ$  com a tensão aplicada  $e$ , nem com a corrente de dreno  $i$ .
- ◆ Como consequência a impedância de entrada não será puramente reativa.

## Modulação Angular

- ◆ Neste caso, a componente resistiva, para esse modulador, será  $1/g_m$ .
- ◆ Desde que ela varia com a tensão modulante aplicada, aparecerá no circuito oscilador uma variação do  $Q$  — logo uma variação da tensão de saída.

## Modulação Angular

- ◆ O resultado será uma modulação em amplitude residual.
- ◆ Se a situação é inevitável, o oscilador modulador deverá ter acoplado a sua saída um limitador de amplitude.



## Modulação Angular

- ◆ A impedância gate-dreno na prática é feita cinco a dez vezes a impedância gate-fonte,  $X_c = n R$  logo podemos escrever:

$$X_c = \frac{1}{\omega C} = n.R$$

$$C = \frac{1}{n.\omega.R} = \frac{1}{2.p.f.n.R}$$

## Modulação Angular

$$C_{eq} = g_m \cdot R \cdot C = \frac{g_m \cdot R}{2 \cdot \mathbf{p} \cdot f \cdot n \cdot R}$$

$$C_{eq} = \frac{g_m}{2 \cdot \mathbf{p} \cdot f \cdot n}$$

- ◆ A última equação é de grande importância prática já que partimos da frequência de operação e da relação  $X_c/R$ .

### Tipos de Moduladores de Reatância.

- ◆ Existem quatro arranjos diferentes para o modulador de reatância, que produzem o mesmo resultado.
- ◆ Eles estão colocados na tabela 2 com suas respectivas fórmulas de cálculo da reatância.

## Modulação Angular

NOME	$Z_{gd}$	$Z_{gs}$	CONDIÇÃO	FÓRMULA DA REATÂNCIA
RC CAPACITIVO	C	R	$X_c \gg R$	$C_{eq} = gm.RC$
RC INDUTIVO	R	C	$R \gg X_c$	$L_{eq} = \frac{R.C}{gm}$
RL INDUTIVO	L	R	$X_L \gg R$	$L_{eq} = \frac{L}{gm.R}$
RL CAPACITIVO	R	L	$R \gg X_L$	$C_{eq} = \frac{gm.L}{R}$

Tabela 02 - Tipos de Moduladores de Reatância

## Modulação Angular

- ◆ O requisito geral é que a corrente de dreno deve ser muito maior do que a corrente da rede de polarização.
- ◆ Na figura 10 temos um modulador de reatância transistorizado, capacitivo RC, operando um circuito tanque de um oscilador Clapp-Gouriet.

# Modulação Angular

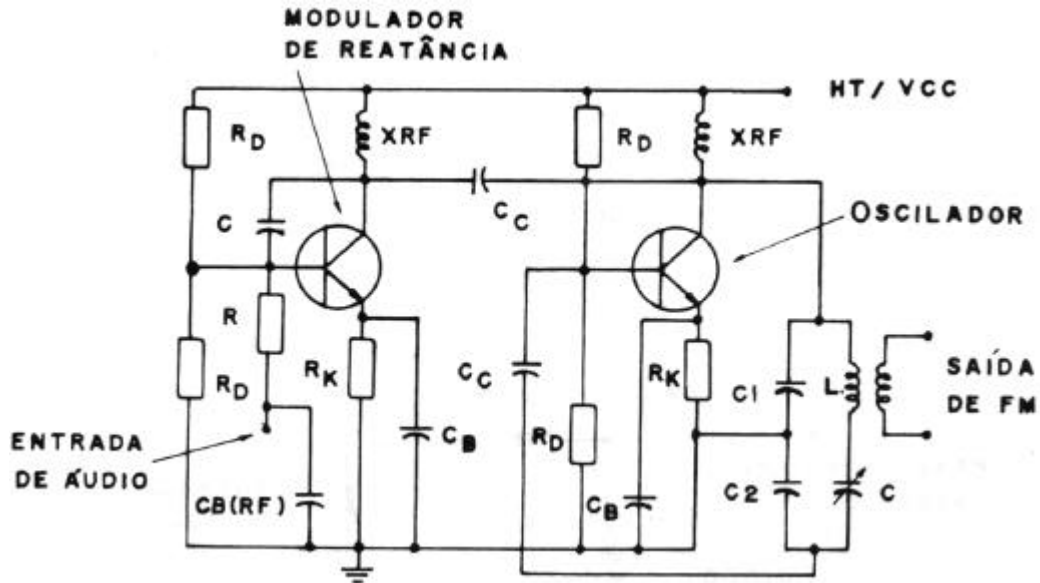


Figura 10 - Modulador de Reatância Transistorizado

## Modulação Angular

- ◆ Qualquer modulador de reatância pode ser conectado ao circuito sintonizado de qualquer oscilador LC, exceto o oscilador a cristal.
- ◆ A condição de que o oscilador utilizado não deve ser daqueles que requerem dois circuitos sintonizados para a sua operação.

## Modulação Angular

- ◆ O Hartley e o Colpitts ou Clapp-Gouriet são os mais comumente utilizados.
- ◆ Choques de RF são utilizados para a isolação de pontos do circuito para CA, enquanto permanecem inativos para CC.



### Modulador à diodo Varicap.

- ◆ O diodo varicap pode ser empregado para modulação de FM; na verdade ele é empregado como modulador de reatância para produzir correção automática de frequência para transmissores de FM.

# Modulação Angular

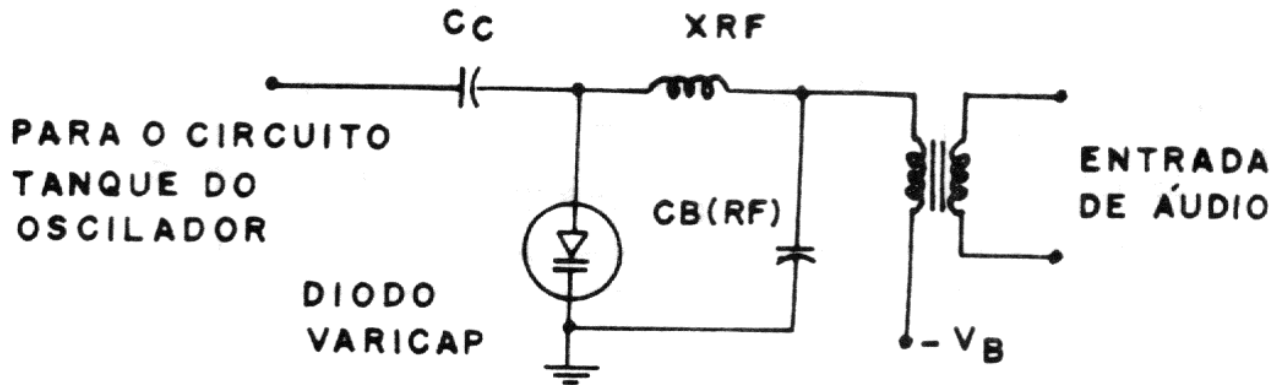


Figura 11 - Modulador à Diodo Varicap

## Modulação Angular

- ◆ No circuito, verifica-se que o diodo foi polarizado inversamente para produzir o efeito da capacitância de junção e desta forma uma variação da polarização que está em série com ele varia sua capacitância.

## Modulação Angular

- ◆ Embora seja um modulador de reatância muito simples, ele tem a desvantagem de utilizar um dispositivo a dois terminais.
- ◆ Suas aplicações estão um tanto limitadas. É empregado como controle automático de frequência e sintonia remota.

### Modulador de Reatância Estabilizado - AFC

- ◆ Embora o oscilador utilizado no Tx de FM não seja controlado a cristal, ele deve ter uma estabilidade de frequência igual a dos osciladores a cristal.

# Modulação Angular

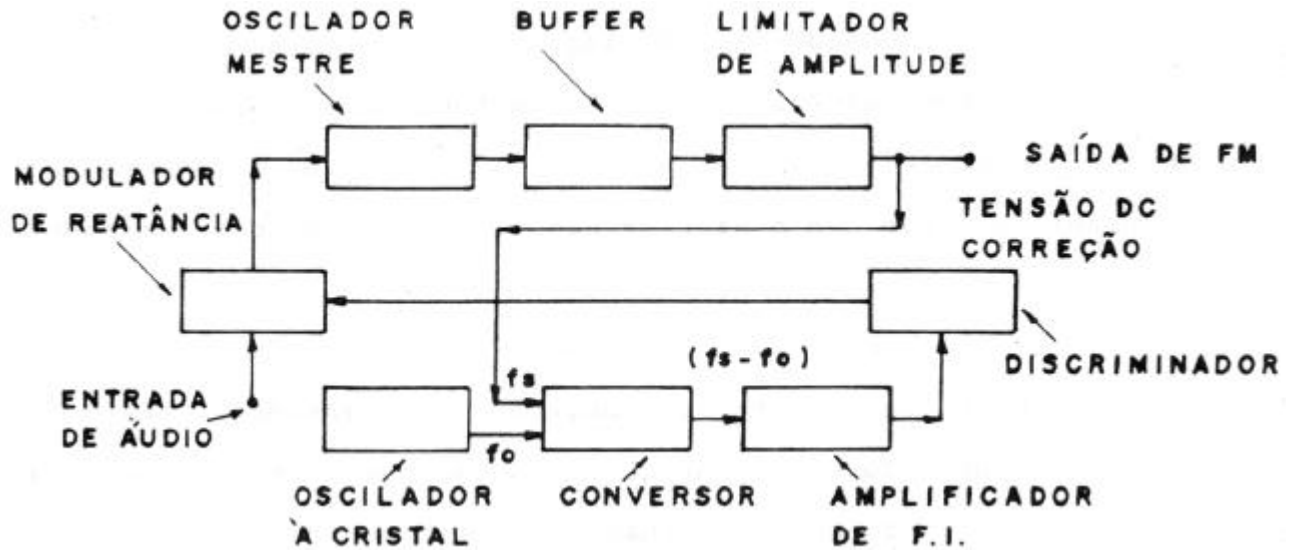


Figura 12 - Transmissor utilizando AFC típico

## Modulação Angular

- ◆ Sugere-se estabilizar a frequência deste oscilador através de um modulador de reatância, sendo muito similar a sintonia de controle automático de frequência, AFC.
- ◆ O modulador de reatância opera o circuito tanque do oscilador LC, cuja saída é isolada por um *buffer*.

## Modulação Angular

- ◆ A saída do *buffer* alimenta o limitador em amplitude do amplificador de potência em classe C.
- ◆ Uma fração da saída é tomado do limitador e alimenta o conversor que também recebe um sinal de um oscilador a cristal.



## Modulação Angular

- ◆ O sinal diferença resultante, que normalmente tem sua frequência entre um décimo a um vigésimo da frequência do oscilador mestre é amplificada e alimenta um discriminador de fase.

## Modulação Angular

- ◆ A saída do discriminador é conectada ao modulador de reatância e produz uma tensão DC de correção, contrariando qualquer variação na frequência média do oscilador mestre.

### Operação do sistema AFC.

- ◆ A constante de tempo do discriminador é muito grande, da ordem de 100 ms, logo ele reagirá a variações lentas na frequência de entrada, mas as variações normais de frequência do FM, — desde que elas são rápidas.

## Modulação Angular

- ◆ O discriminador deve ser conectado para produzir uma saída positiva para um aumento de frequência de entrada e uma saída negativa para uma diminuição.

## Modulação Angular

- ◆ Quando a frequência do oscilador flutua tendendo a aumentar sua frequência, uma frequência maior será aplicada ao conversor.
- ◆ Desde que a saída do oscilador a cristal é estável, uma saída com uma frequência maior será alimentada ao discriminador.

## Modulação Angular

- ◆ O discriminador é sintonizado para uma certa frequência diferença entre os dois osciladores; sendo a frequência de entrada maior, uma tensão contínua positiva estará em sua saída para este aumento de frequência.

## Modulação Angular

- ◆ Esta tensão é alimentada em série com a entrada do modulador de reatância, aumentando sua transcondutância.
- ◆ A capacitância de saída do modulador é dada por  $C_{eq} = gm.R.C$  — logo, será aumentada e, por conseguinte, diminuirá a frequência central deste oscilador.

## Modulação Angular

- ◆ O aumento de frequência que provoca essa atividade foi corrigida.
- ◆ Quando o oscilador flutua, tendendo a diminuir a frequência, uma tensão de correção negativa é obtida através deste circuito e a frequência do oscilador é aumentada.



## Modulação Angular

- ◆ Essa tensão contínua de correção pode ser utilizada para AFC em vez de alimentar um diodo varicap conectado ao tanque do oscilador.
- ◆ Alternativamente, um sistema usando amplificador amplia está tensão e alimenta um servo motor que está conectada a um *trimmer* no oscilador.

### Razões para a Conversão de Frequência.

- ◆ É possível estabilizar a frequência do oscilador diretamente em vez de fazer a conversão de frequência com a saída de um oscilador a cristal — a performance do circuito será sofrível.

## Modulação Angular

- ◆ Deve-se ter em mente que a estabilidade do circuito depende da estabilidade do discriminador.
- ◆ O discriminador é uma rede passiva e pode-se supor que ele seja mais estável do que o oscilador principal por um fator de 3:1 pelo menos.

## Modulação Angular

- ◆ Um oscilador LC bem projetado, poderíamos esperar uma flutuação em torno de 5 partes em 10.000 ou cerca de 2,5 kHz em cada 5 MHz; — nesse caso, a estabilidade tornaria melhor apenas cerca de 800 Hz quando muito.

## Modulação Angular

- ◆ Quando o discriminador é sintonizado para uma frequência de  $1/20$  da frequência do oscilador principal, embora a flutuação percentual seja a mesma, a flutuação real, em Hertz, é  $1/20$  daquela prevista, ou seja de 40 Hz.
- ◆ O oscilador principal será mantida aproximadamente 40 Hz de sua frequência de 5 MHz.

## Modulação Angular

- ◆ O resultado é uma proporção direta à relação com a frequência do discriminador.
- ◆ Não é possível fazer a redução de frequência muito maior do que a relação de 20:1.

## Modulação Angular

- ◆ A razão para isso é apenas em caráter prático; a largura de faixa da curva "S" do discriminador tornaria insuficiente para englobar a máxima flutuação possível da frequência do oscilador principal, ficando a estabilidade insensível.

## Modulação Angular

- ◆ Esta discussão é empregada para a estabilidade de qualquer oscilador LC que não possa ser a cristal.
- ◆ A diferença é a falta de modulação existente nestes osciladores que, por sua vez, permitem que a constante de tempo do discriminador possa ser mais rápida.



### Método Indireto.

- ◆ Os moduladores pelo método direto apresentam a desvantagem de serem baseados num oscilador que não é estável o bastante para a proposição de radiodifusão.

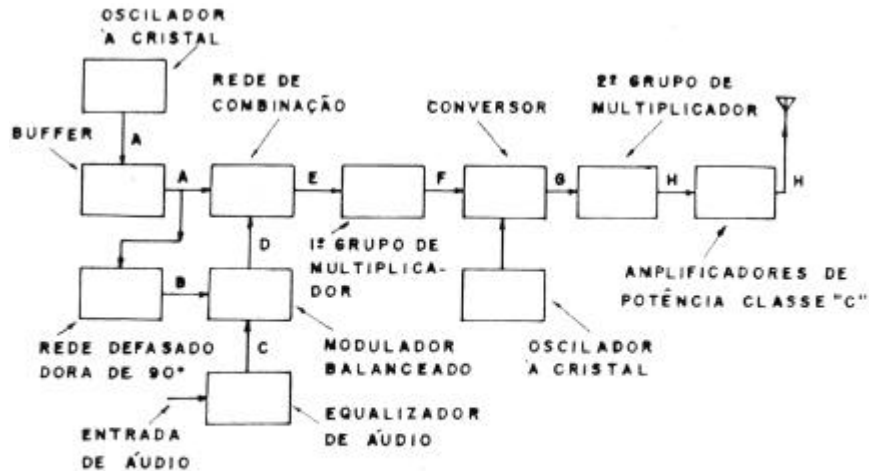
## Modulação Angular

- ◆ Desta forma necessitam de estabilidade através de um modulador de reatância, aumentando a complexidade do circuito.
- ◆ É possível gerar um sinal de FM por meio da modulação em fase, onde um oscilador a cristal pode ser utilizado.

## Modulação Angular

- ◆ Este sistema é denominado Sistema Armstrong e precede historicamente ao modulador de reatância.
- ◆ O diagrama em blocos deste sistema está apresentado na figura 13.

# Modulação Angular



A - APENAS PORTADORA    B - PORTADORA A 90°    C - ÁUDIO EQUALIZADO  
D - FAIXAS LATERAIS    E - FM (MUITO BAIXO fc e mf)    F - FM (MÉDIO fc e  
BAIXO mf)    G - FM (BAIXO fc e mf)    H - FM (ALTO fc e mf)

Figura 13 - Diagrama em Blocos do Sistema Armstrong para a Geração de FM

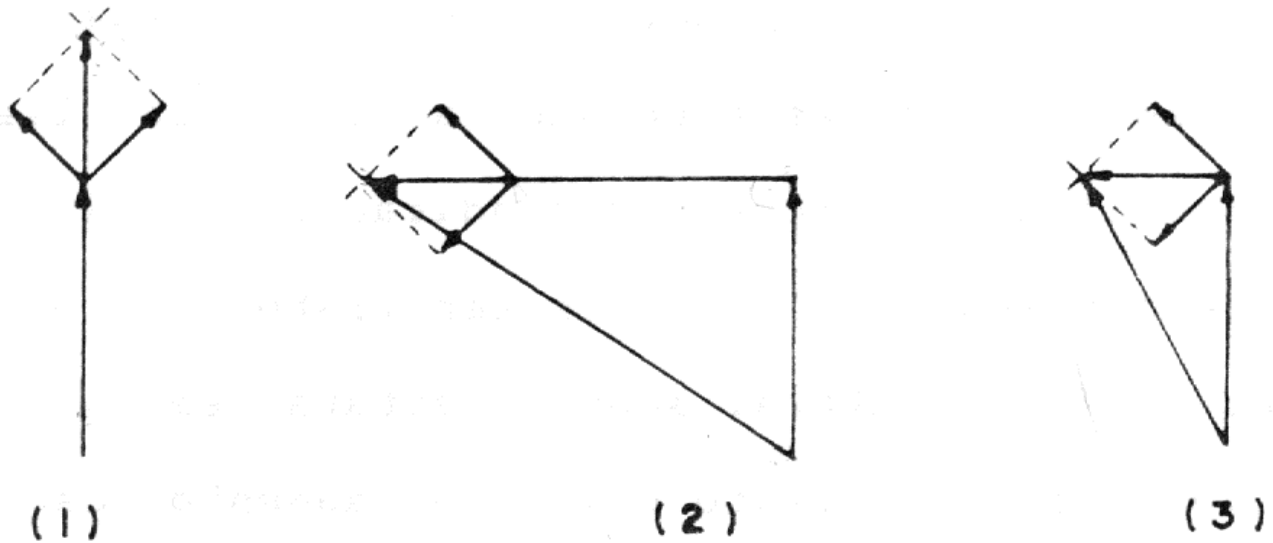
## Modulação Angular

- ◆ A saída propriamente dita do sistema termina na rede de combinações; os outros blocos são incluídos para mostrar a obtenção de um sinal de FM faixa larga.

## Modulação Angular

- ◆ O efeito da conversão do sinal de FM varia a frequência central e o efeito da multiplicação de frequência amplia a frequência central e igualmente o desvio.

## Modulação Angular



**Figura 14 - Diagramas Vetoriais da Modulação em Fase**

## Modulação Angular

- ◆ Uma análise do diagrama fasorial do sinal modulado em amplitude, verifica-se que o vetor resultante das faixas laterais está sempre em fase com a portadora modulada, tanto que existe variação de amplitude mas não variação de fase ou de frequência.



## Modulação Angular

- ◆ Se a tensão modulada em amplitude é adicionada a uma tensão não modulada, de mesma frequência, e as duas estejam continuamente defasadas de  $90^\circ$  alguma forma de modulação em fase será obtida.

## Modulação Angular

- ◆ Com a portadora do sinal modulado em amplitude removida, resulta apenas as duas faixas laterais que serão, posteriormente, adicionadas à portadora.

## Modulação Angular

- ◆ A resultante das duas faixas laterais sempre estará em quadratura com a tensão portadora e tanto maior o aumento da tensão modulante, maior será o desvio de fase.

## Modulação Angular

- ◆ A tensão resultante do processo é uma modulação em fase, mas existe uma pequena modulação em amplitude que pode ser removida utilizando um limitador em amplitude.

## Modulação Angular

- ◆ A saída do limitador em amplitude será modulado em fase — desde que a modulação em frequência é o necessário, a tensão modulante deve ser equalizada antes de penetrar no modulador balanceado.

## Modulação Angular

- ◆ O sinal de PM pode ser modificado em FM pela prévia intensificação dos graves do sinal modulante.
- ◆ Um circuito equalizador RL é apresentado, onde na radiodifusão de FM,  $\omega_L = R$  para 30 Hz.

# Modulação Angular

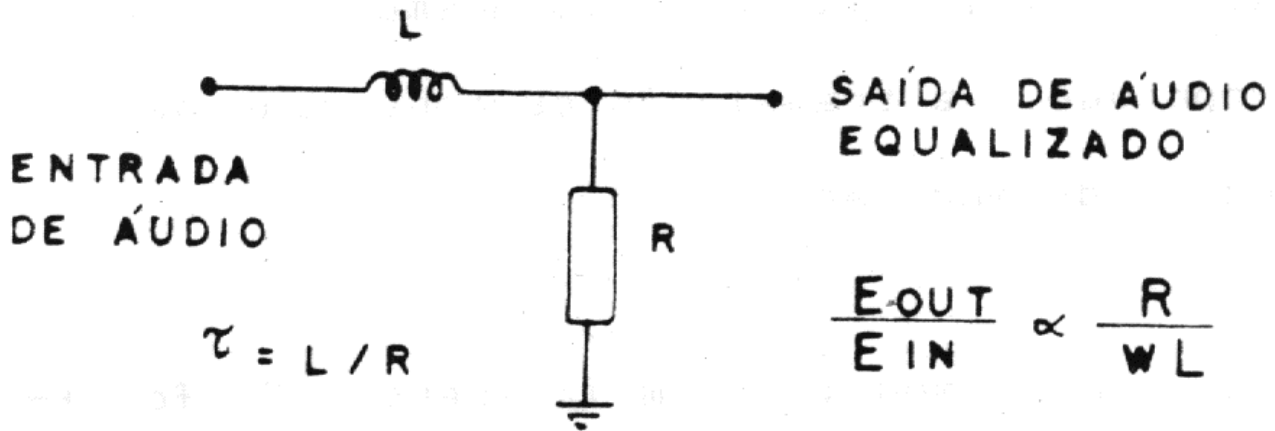


Figura 15 - Equalizador RL

## Modulação Angular

- ◆ Com o aumento da frequência a saída do equalizador diminuirá a uma relação de 6dB/ oitava satisfazendo as exigências.
- ◆ A mais conveniente frequência de operação para cristal e do modulador em fase é próximo a 1 MHz.



## Modulação Angular

- ◆ Como as frequências de transmissão são normalmente muito maior que esse valor, multiplicadores de frequência devem ser utilizados.

### Efeitos na Conversão de Frequência do Sinal de FM.

- ◆ Investigações apresentam que o índice de modulação é multiplicado pelo mesmo fator que a portadora central, contudo a conversão ou translação de frequência não afeta o índice de modulação.

## Modulação Angular

- ◆ Se um sinal de FM,  $fc \pm d$  alimenta um dobrador de frequência o sinal de saída conterà duas vezes a frequência de entrada para as frequências extremas:  $2fc+d$  e  $2fc - d$ .
- ◆ O desvio de frequência foi claramente dobrado  $\pm 2d$  — logo o índice de modulação também foi duplicado.

## Modulação Angular

- ◆ A divisão de frequência reduz pelo mesmo fator tal como a multiplicação amplia.
- ◆ Quando a onda modulada é convertida o resultado na saída contem a frequência diferença e muitas outras.

## Modulação Angular

- ◆ Considerando o sinal modulado  $f_c \pm d$  convertido com uma frequência  $f_o$  produzirá as frequências extremas:  $f_c - f_o - d$  e  $f_c - f_o + d$ .

## Modulação Angular

- ◆ Verifica-se que o sinal de FM foi transladado para uma frequência central mais baixa  $f_c - f_o$ , mas o desvio permaneceu o mesmo,  $\pm d$ .
- ◆ É possível aumentar ou reduzir a frequência central do sinal de FM sem afetar o desvio.

### Considerações sobre o Sistema Armstrong.

- ◆ Partindo da definição da modulação em fase, estabelece que o ângulo de desvio de fase deve ser proporcional a tensão modulante.

## Modulação Angular

- ◆ De fato, o que foi verificado é que a tangente do ângulo do desvio de fase é proporcional a amplitude modulante mas não o ângulo.



## Modulação Angular

- ◆ Um axioma trigonométrico diz que a tangente de um ângulo é igual ao valor do ângulo medido em radianos, se o ângulo é pequeno.

## Modulação Angular

- ◆ Logo devemos fazer o ângulo do desvio de fase pequeno, sendo de fato diminuto, correspondendo a um desvio de frequência máximo em torno de 60 Hz a uma frequência de 1 MHz.
- ◆ Por outro lado o limitador de amplitude não será mais necessário.

## Modulação Angular

- ◆ Para obter o desvio suficiente para a radiodifusão, ambos, conversão e multiplicação de frequência são necessários, contudo para comunicações em FM a multiplicação pode ser unicamente suficiente.

## Modulação Angular

- ◆ Partindo-se de uma frequência inicial de 1MHz e desvio de 60 Hz é possível obter desvio de 10,8 kHz a 180 MHz.
- ◆ Por exemplo, se as condições iniciadas são utilizadas, e desvio de 75 kHz com frequência central de 100 MHz é exigido, fo deve ser multiplicada por 100 e o desvio de 1250 vezes.

## Modulação Angular

- ◆ O conversor e o oscilador a cristal no meio da faixa de multiplicação são utilizados para compatibilizar os dois fatores de multiplicação.

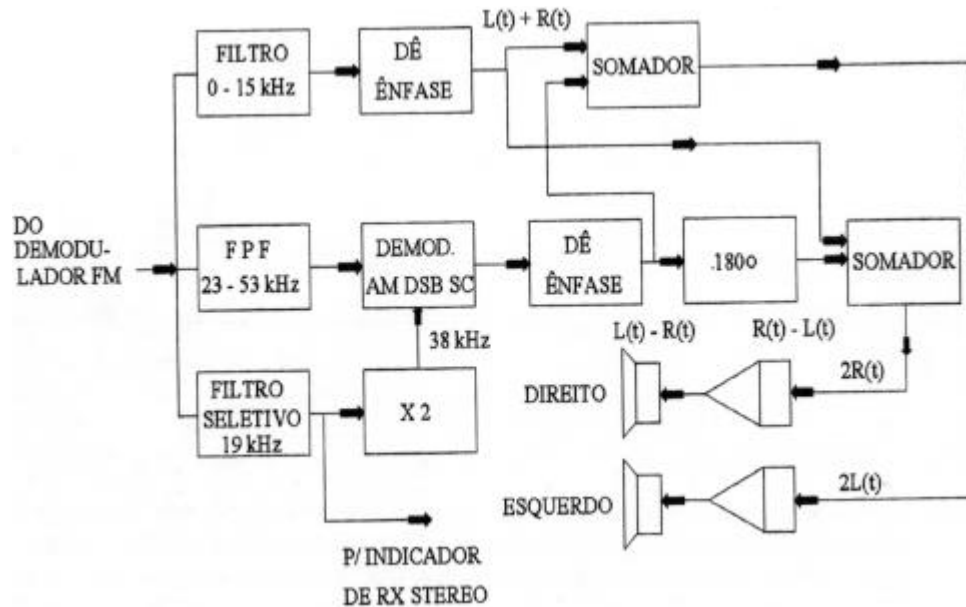
## Modulação Angular

- ◆ Após aumentar a portadora a cerca de 6 MHz, ela é convertida com a saída de um oscilador a cristal, cuja frequência é tal que produza uma diferença de  $6 \text{ MHz} / 12 = 480 \text{ kHz}$ .

## Modulação Angular

- ◆ A frequência central foi reduzida mas o desvio permanece inalterado. Logo, ambos, podem ser multiplicados pelo mesmo fator para proporcionar a frequência central desejada.

# Modulação Angular



## Decodificação do FM Estereofônico