

TELECOMUNICAÇÃO

© Prof. Engº Luiz Antonio Vargas Pinto
Versão 1.2
27 de agosto de 2011



Prefácio	3
A questão da transmissão.....	4
Propagação.....	4
John Clerk Maxwell (matemático)	4
Heinrich Rudolf Hertz (Físico)	5
A Onda eletromagnética.....	5
Aspectos da transmissão.....	5
Polarização.....	7
Quanto ao λ	7
Características do meio de propagação.....	8
Classificação das ondas.....	9
Ondas Celestes	9
Ondas Terrestres	9
Linha de visada.....	10
Influência da frequência.....	10
Considerações.....	10
O processo de modulação.....	11
Modulação em Amplitude (AM).....	12
Espectro de potência.....	13
Circuitos de AM.....	13
Desvantagens	13
Vantagens	13
Transmissão.....	14
Recepção.....	14
Esquema básico.....	14
A série de Fourier.....	17
Ruído.....	19
Filtros.....	20
Tipos	20
Passivo.....	20
Casos específicos.....	20
Ativo.....	21
Modulação em Frequência (FM).....	21
Moduladores de FM.....	22
Limitadores.....	23
Demoduladores de FM.....	25
a) Diferenciação Direta:.....	26
b) Demoduladores de domínio da frequência.....	26
c) Diferenciador com retardo de tempo.....	27
Apêndice A.....	31
FM Teoria Avançada	31
Apêndice B.....	36
Diferenciadores e Integradores	36
Circuitos básicos Passivos:.....	36
Circuitos ativos:.....	36

Prefácio

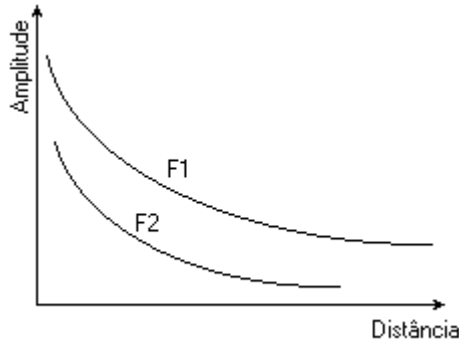
Este é um material desenvolvido durante aulas básicas de sistemas de telecomunicação. Por ser de caráter prático (aula) pode conter alguns erros.

Longe da pretensão de ser um trabalho único e final, pretendo atualiza-lo tanto quanto possível.

Qualquer dúvida ou sugestão pode ser encaminhado para mim pelo site www.vargasp.com na seção "Contato" na página principal.

A questão da transmissão

Áudio } Quanto á freqüência
 Rádio }



F1 > F2
Figura 1

A transmissão direta de áudio é feita de forma física na passagem de energia da origem para o átomo próximo e assim sucessivamente. Chamamos de Áudio as frequências audíveis.

O limite da audição humana, de 20 Hz a 20 KHz, impede uma

expansão dos sinais além de poucas dezenas de metros. Daí a primeira necessidade de pesquisar novos meios de propagação. Na tabela de referência temos que:

AF → Áudio-freqüência - som } Subsônico
RF → Radiofreqüência - não audível } Supersônico
 Ultrassônicos

Propagação

Testes demonstram a participação ativa da freqüência no alcance. Ora, frequências elevadas (agudos) alcançam distâncias muito superiores mas não são audíveis. Porém, o funcionamento ideal em altas frequências apresentam de início dois inconvenientes:

1. Propagação no espaço
2. irradiação na antena

Maxwell desenvolveu (equacionou) as equações que descrevem a propagação da luz em espaço aberto. Hertz, por sua vez, comprovou cientificamente as 4 equações de Maxwell.

John Clerk Maxwell (matemático)

☆13 Junho 1831 Edinburgh, Escócia
 † 5 Novembro 1879 Cambridge, Cambridgeshire, Inglaterra



Lei de Gauss para a eletricidade	$\oint \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{q}{\epsilon_0}$
Lei de Gauss para o magnetismo	$\oint \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0$
Lei de Faraday -Lenz	$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = - \frac{d\Phi_B}{dt}$
Lei de Ampère	$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 i$

Heinrich Rudolf Hertz (Físico)

☆ 1857

† 1894



A Onda eletromagnética

Maxwell compreendeu que o fenômeno da propagação da luz no espaço aberto, diferente da propagação por transferência de energia era na realidade um fenômeno similar ao da ressonância, onde um efeito elétrico

cria um campo magnético, que por sua vez induz um campo elétrico e assim sucessivamente, gerando um sinal que se re-compõe, se propagando de modo diretivo, conforme a figura 2:

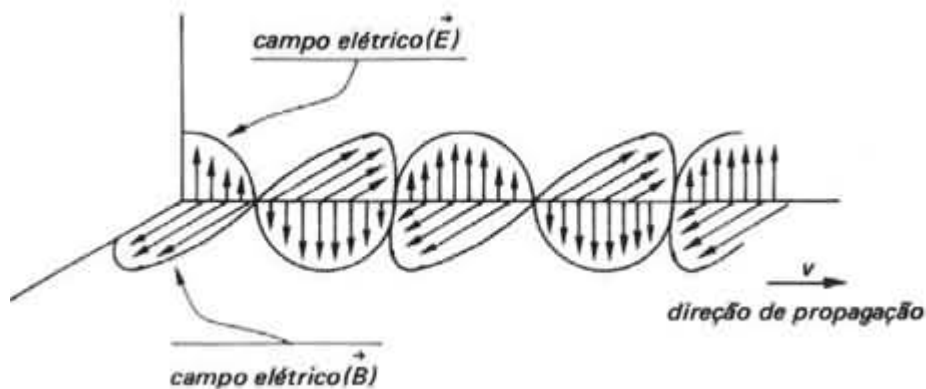


Figura 2

Aspectos da transmissão

Considere que:

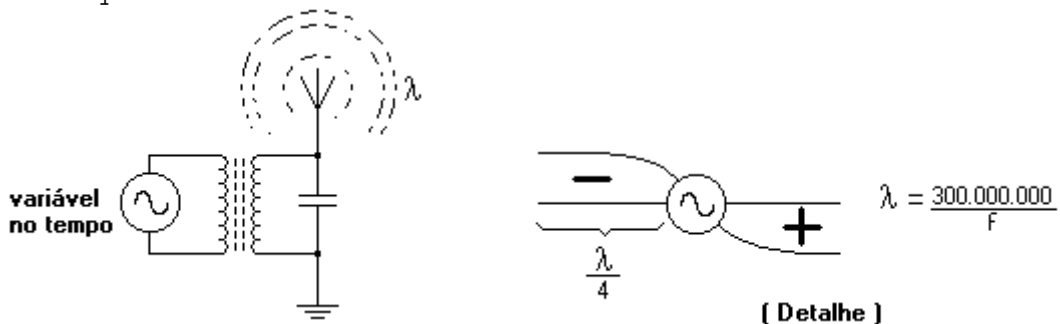


Figura 3

Tal que $E(t) = E_m \sin \omega t$ onde $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$

Observe o diagrama de polarização para o detalhe espacial da ionização:

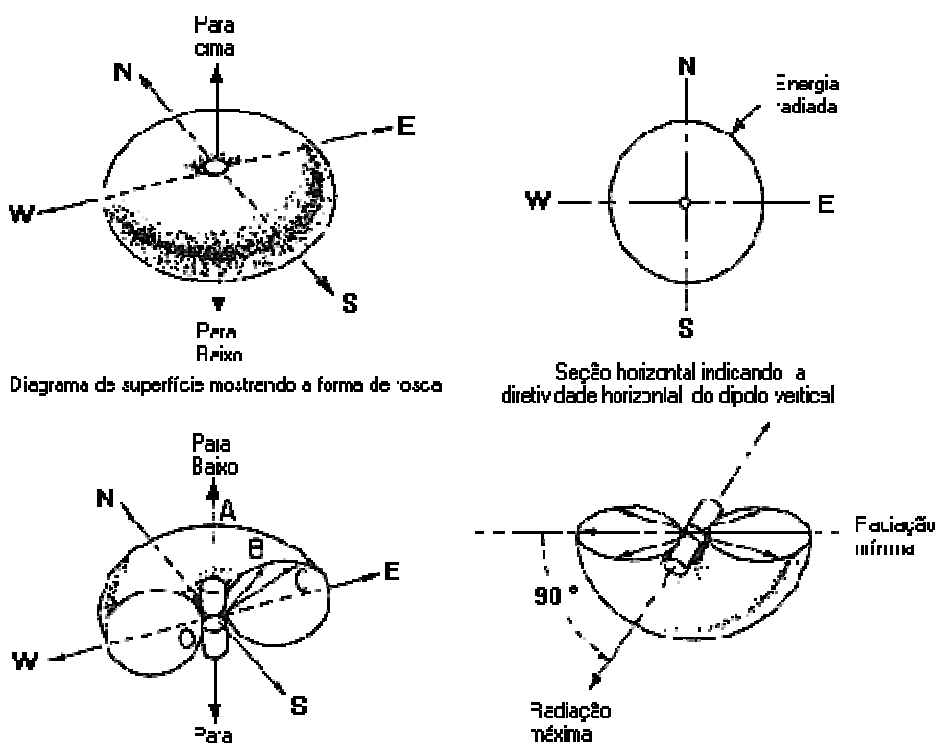


Figura 4

O campo magnético (H) é produzido pela variação das partículas próximas a antena. Um gerador senoidal (variável) causa a inversão da polaridade do sinal criando o campo H.

Da mesma forma, um campo elétrico (E) é induzido por H, iniciando um processo contínuo onde E induz H e vice-versa. Estes campos são perpendiculares entre si e se propagam no espaço.

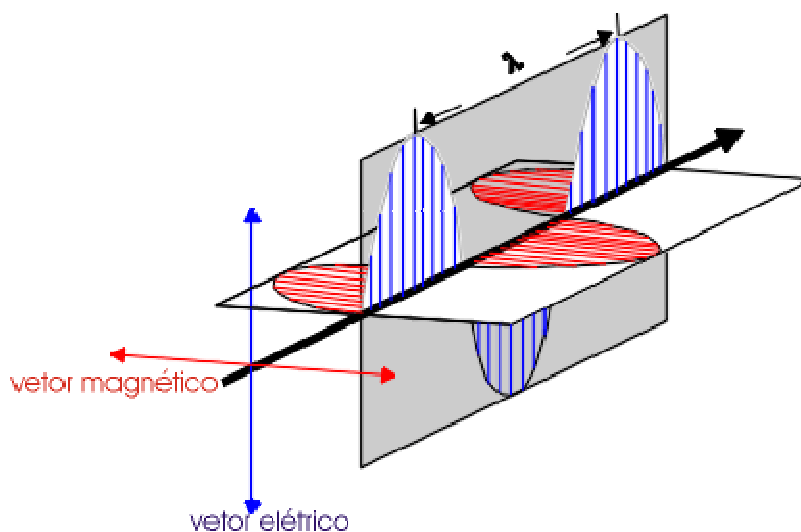


Figura 5

Polarização

O tipo de polarização é definida em ao plano de deslocamento do Campo elétrico E , isto é, no exemplo abaixo, temos uma polarização vertical pois o campo E (vermelho) está no plano XY (vertical).

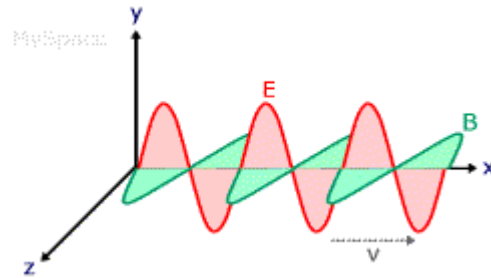


Figura 6

Quanto ao λ

λ é o comprimento de onda, tal que:

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^8}{f}$$

Onde:

f = frequência medida em Hz

c = velocidade da luz

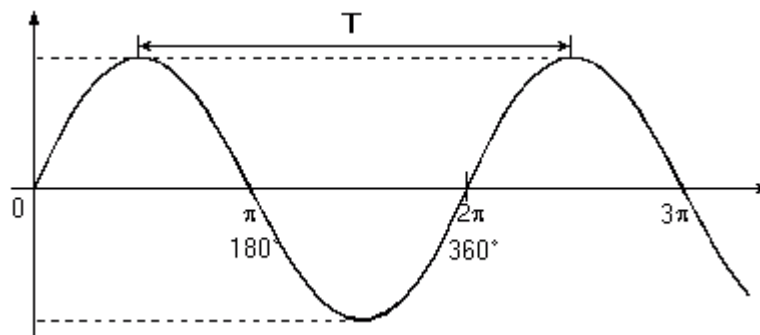


Figura 7

Sendo que $T = \frac{1}{f}$

Características do meio de propagação

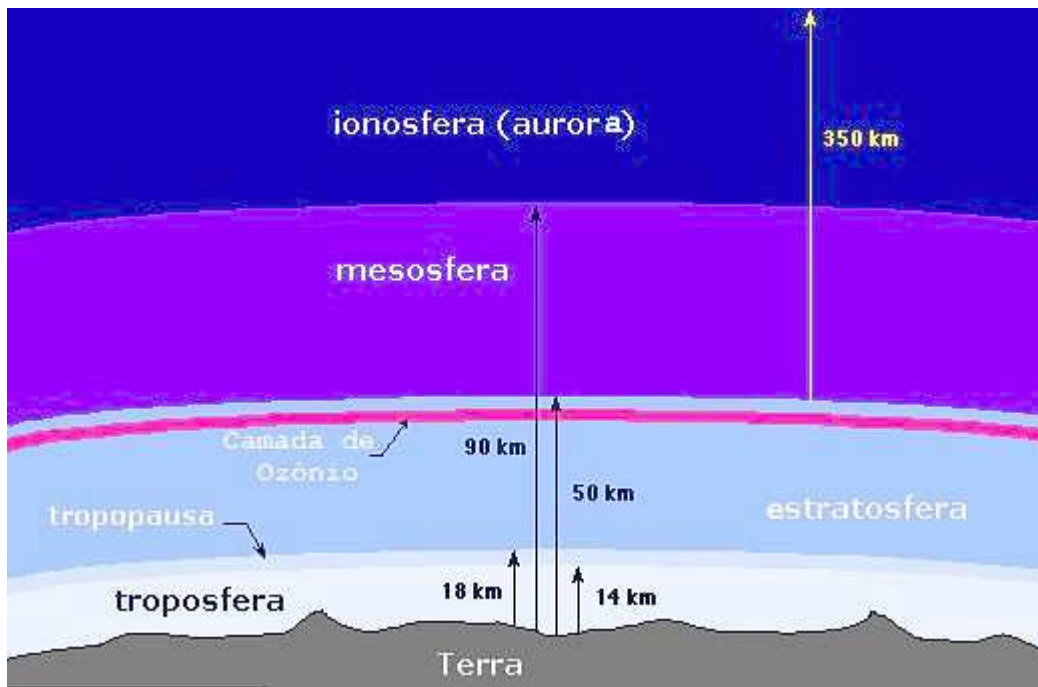


Figura 8

A Ionosfera é a camada mais alta da atmosfera, algo em torno de 65 Km a 560 Km. Para efeito de estudo a atmosfera pode ser dividida em camadas E e F, e durante o dia a camada F pode ser dividida em F1 e F2.

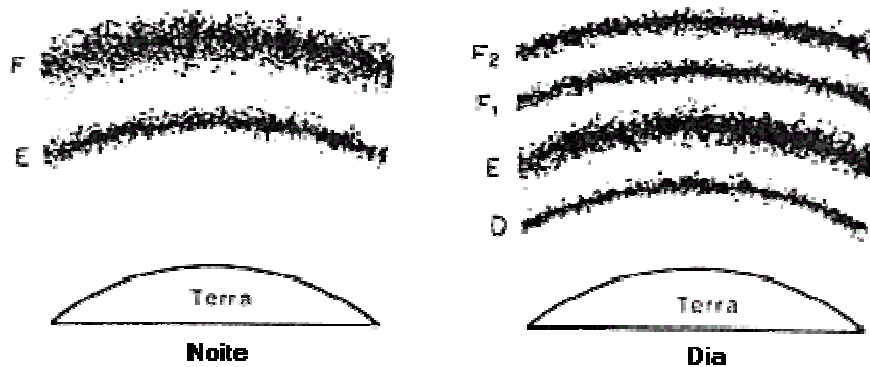


Figura 9

A propagação a partir de uma antena vertical sofre interferência da Ionosfera.

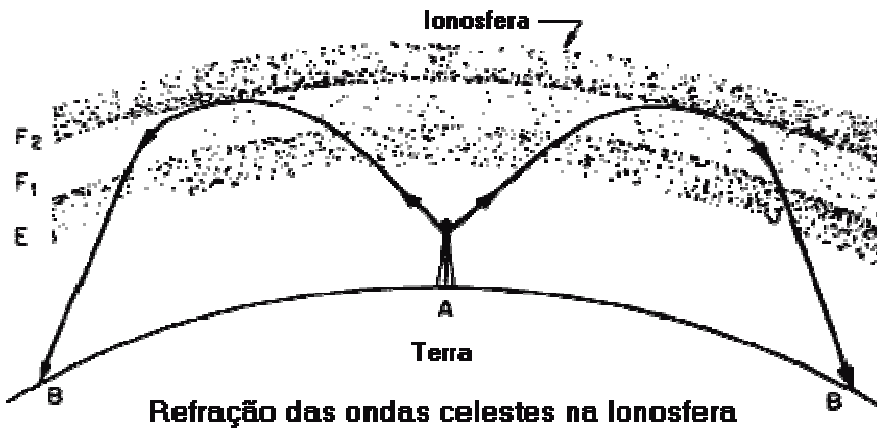


Figura 10

Assim o sinal irradiado se assemelha a uma "rosquinha" (veja figura 4) por conta da refração.

Classificação das ondas

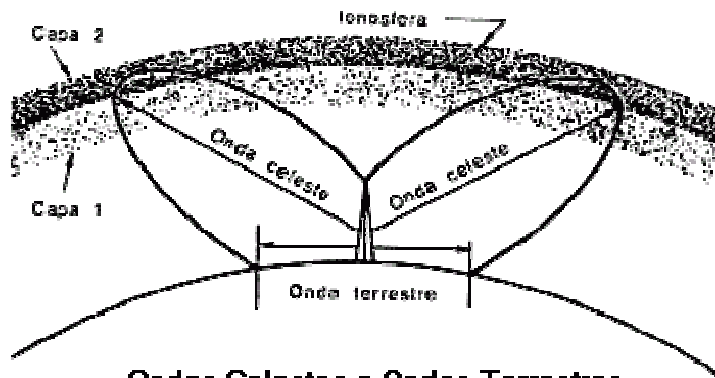


Figura 11

Ondas Celestes

	Alcance	Freqüência
Noturno	Longo	Pouco menores que a diurna
Diurno	Longo	Elevadas

Ondas Terrestres

Tem boa propagação, embora limitada pelo relevo, e exige um controle mais intenso sobre o sinal.

	Alcance	Freqüência	Potência
Noturno	Curto	Elevadas	Baixa
Diurno	Longo	Baixa	Alta

Linha de visada

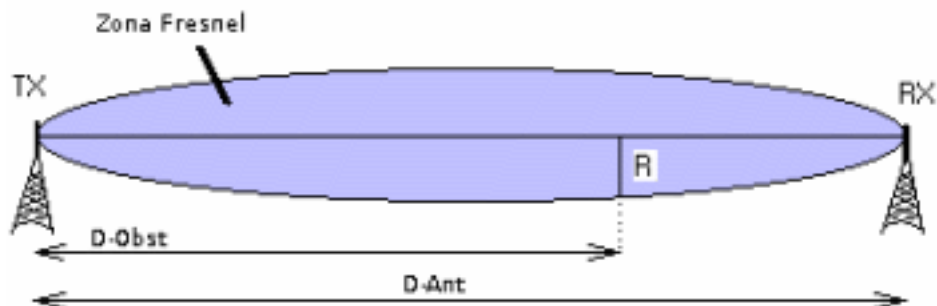


Figura 12 (<http://info.matik.com.br>)

Erroneamente definimos ocasionalmente como linha de visada a linha física que une duas torres, uma transmissora e outra receptora. Embora esta seja a definição correta, temos ainda que levar em conta a **Zona de Fresnel**, porque é conveniente lembrar que a onda propagada segue o raio de curvatura da terra e sofre influência do meio. Da figura 12 podemos ver que a zona em azul também faz parte do link. Se esta estiver sobre o relevo ou objetos entre as duas torres, é provável termos problemas no estabelecimento do link.

Influência da frequência

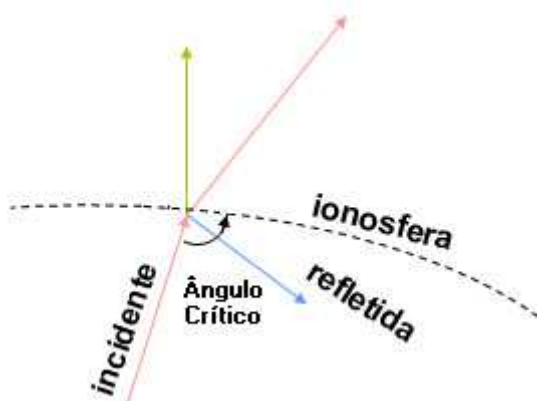


Figura 13

Se a frequência for crítica, o ângulo crítico (θ) ao ser atingido deixa passar a onda que se perde no espaço sideral. Varia com a hora, o dia, a estação do ano, etc..

Em VHF, normalmente as ondas passam pela ionosfera (em ângulo crítico).

Considerações

Devido ao fading e as reflexões múltiplas, é errôneo definir linha de visada para VHF em frequências superiores a 30 MHz porque uma simples inversão térmica prolonga a linha de visada (alcance).

O processo de modulação

Definição: É uma alteração que fazemos no sinal de **áudio** (informação) que aqui passamos a chamar de **modulante**, ajustando-o sobre um sinal de alta frequência (RF) a qual denominamos a partir daqui de **Portadora (Carrier)**.

É possível obtermos modulação de três formas:

- Amplitude ... **AM**
- Frequência .. **FM**
- Fase **PM**

Modulação em Amplitude (AM)

Dados os sinais:

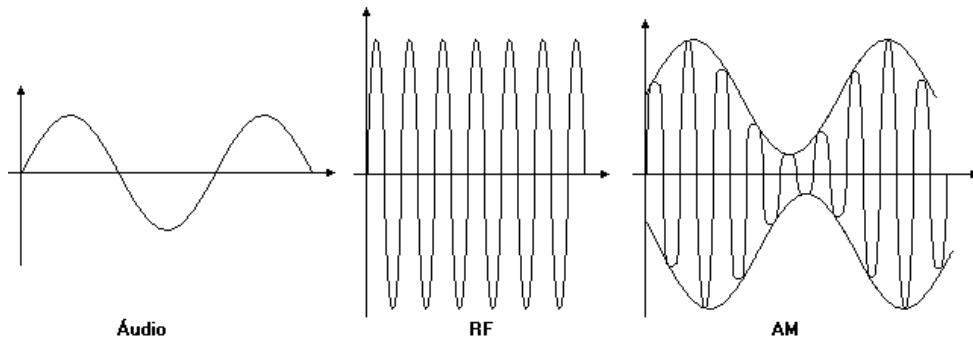


Figura 14

Do qual podemos representar a forma de onda AM por:

$$V_{AM}(t) = V_C \cos(\omega_c t) + V_M \cos(\omega_M t) \cdot \cos(\omega_c t)$$

onde:

V_C ... Amplitude da Portadora

V_M ... Amplitude da Modulante

ω_M ... $2 \pi f_M$

ω_C ... $2 \pi f_C$

Colocando $\cos(\omega_c t)$ em evidência teremos:

$$V_{AM}(t) = (V_C + V_M \cos(\omega_M t)) \cos(\omega_c t)$$

Colocando V_C em evidência, teremos:

$$V_{AM}(t) = V_C \left(1 + \frac{V_M}{V_C} \cos(\omega_M t) \right) \cos(\omega_c t)$$

E chamamos V_M/V_C de **m (índice de modulação)**

O intervalo útil para modulação é aquele onde $0 \leq m \leq 1$, sendo que:

$m = 0 \Rightarrow$ Submodulação ou não modulação

$m = 1 \Rightarrow$ Sobremodulação ... perda de informação.

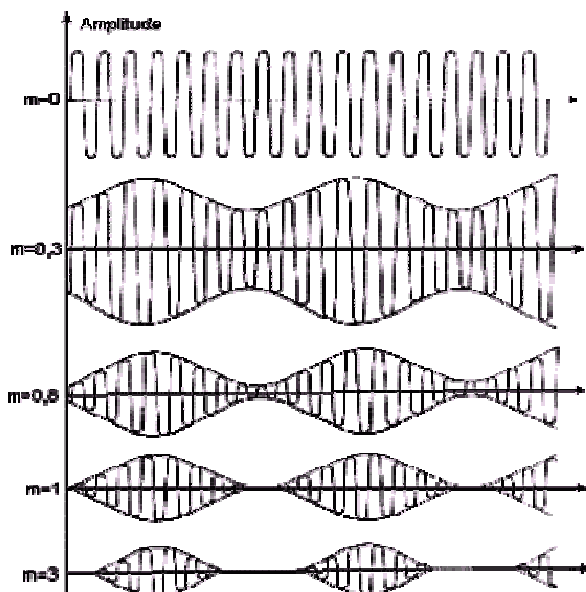
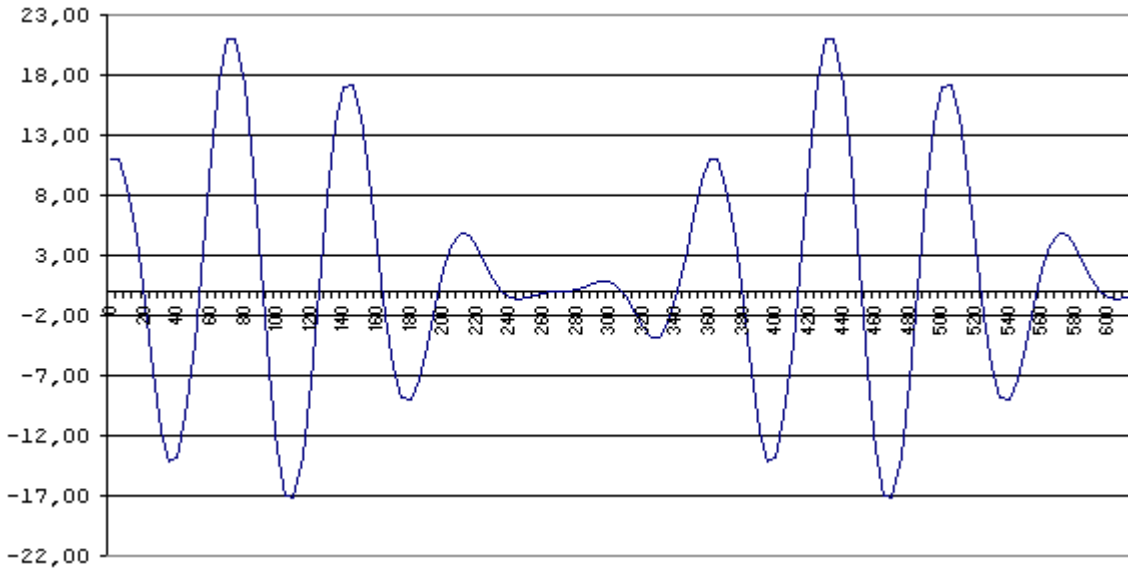


Figura 15

Considerando os sinais simulados:

$$V_M = 1 + \text{Sen}(\pi \cdot t) \quad V_C = 5 \times \text{Cos}(\pi \cdot 5 \cdot t) \quad V_{AM} = V_M + 2 \times t \times V_C$$

podemos obter com auxílio do Excel a seguinte curva:



Espectro de potência

Vejam os a figura abaixo

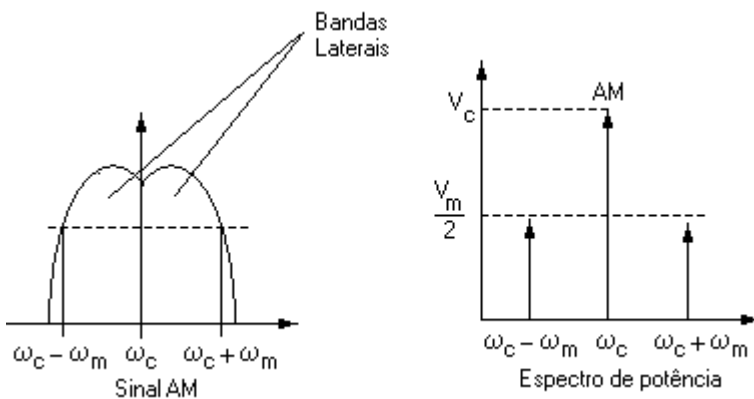


Figura 16

Circuitos de AM

A geração de sinal de AM não pode ser considerada ideal. Atualmente, circuitos digitais modernos o substituem gradualmente com enormes vantagens.

Desvantagens

- 1- Perdas de potência nas bandas laterais (quase 50%)
- 2- Dependência da Ionosfera
- 3- Alta sensibilidade a ruídos

Vantagens

- 1- Simplicidade nos processo de recepção e transmissão
- 2- Baixo custo operacional

Transmissão

Circuito básico:

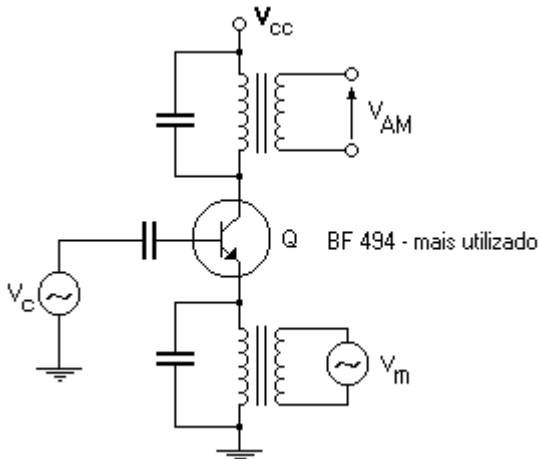


Figura 17

O sinal da portadora (V_C) é modulado por V_M (áudio) gerando através de Q o sinal V_{AM} (nesse caso **DSB Double Side Band**)

Recepção

O sinal OEM, embora de longo alcance é um sinal de baixa potência, e assim a recepção se processa em níveis de amplitude baixíssimas. Para a recepção devemos ter, no mínimo:

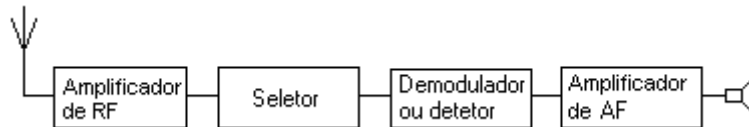


Figura 18

Desvantagens:

- 1- O seletor não é ideal, de modo que ele não só seleciona a frequência desejada mas também as adjacentes.
- 2- Isto significa que o amplificador de RF deve ser extremamente justo.

Devido a tantos inconvenientes, somado ao crescimento do número de estações transmissoras, em 1933, o major Edwin Howard Armstrong, criou um novo sistema que trazia a solução para esses inconvenientes. Esse sistema denominado de super-heteródino, utilizava uma nova técnica chamada de **Batimento** e complementa o processo seletivo com uma **CAG Controle Automático de Ganho**.

Esquema básico

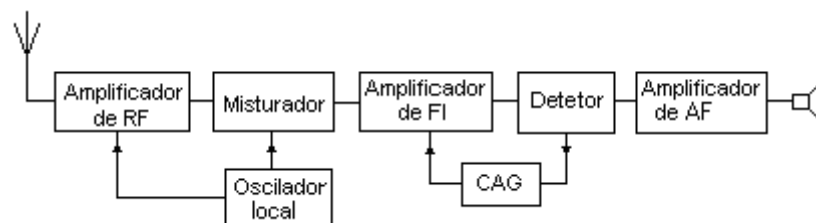


Figura 19

Assim, inicialmente teremos dois problemas que o sistema super-heteródino deve resolver:

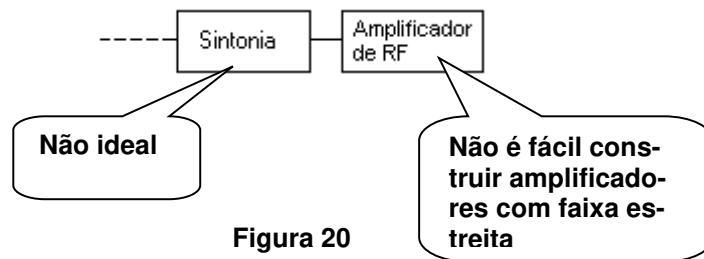


Figura 20

Para a modulação em AM, ficou aprovada uma **Frequência Intermediária FI** de **455 KHz**. Um sistema misturador pode gerar duas frequências, a saber, a diferença e a soma:

$$|f_{OL} - f_S| \leq f_{FI} \leq |f_{OL} + f_S|$$

Onde:

Preferida

f_{OL} = frequência do Oscilador Local

f_S = frequência Sintonizada

f_{FI} = frequência Intermediária

Em AM a faixa sintonizável está entre **535 KHz** e **1620 KHz**

1- Se $f_{FI} = |f_{OL} - f_S|$

$$\left. \begin{array}{l} 455 = f_{OL} - 535 \Rightarrow f_{OL} = 990 \text{ KHz} \\ 455 = f_{OL} - 1620 \Rightarrow f_{OL} = 2075 \text{ KHz} \end{array} \right\} \frac{990}{2075} \cong \frac{1}{2}$$

2- Se $f_{FI} = |f_{OL} + f_S|$

$$\left. \begin{array}{l} 455 = f_{OL} + 535 \Rightarrow f_{OL} = 80 \text{ KHz} \\ 455 = f_{OL} + 1620 \Rightarrow f_{OL} = 1165 \text{ KHz} \end{array} \right\} \frac{80}{1165} \cong \frac{1}{15}$$

Conclusão: o 1º é mais fácil de construir por apresentar uma proporção máxima/mínima menor

Daí o quadro de AM fica sendo:



Figura 21

A faixa ideal de cada f_s é 9 KHz para cada banda lateral:

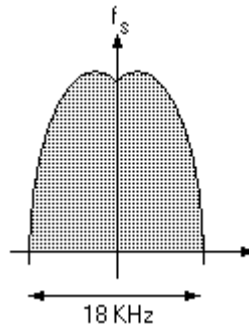


Figura 22

E o circuito completo fica:

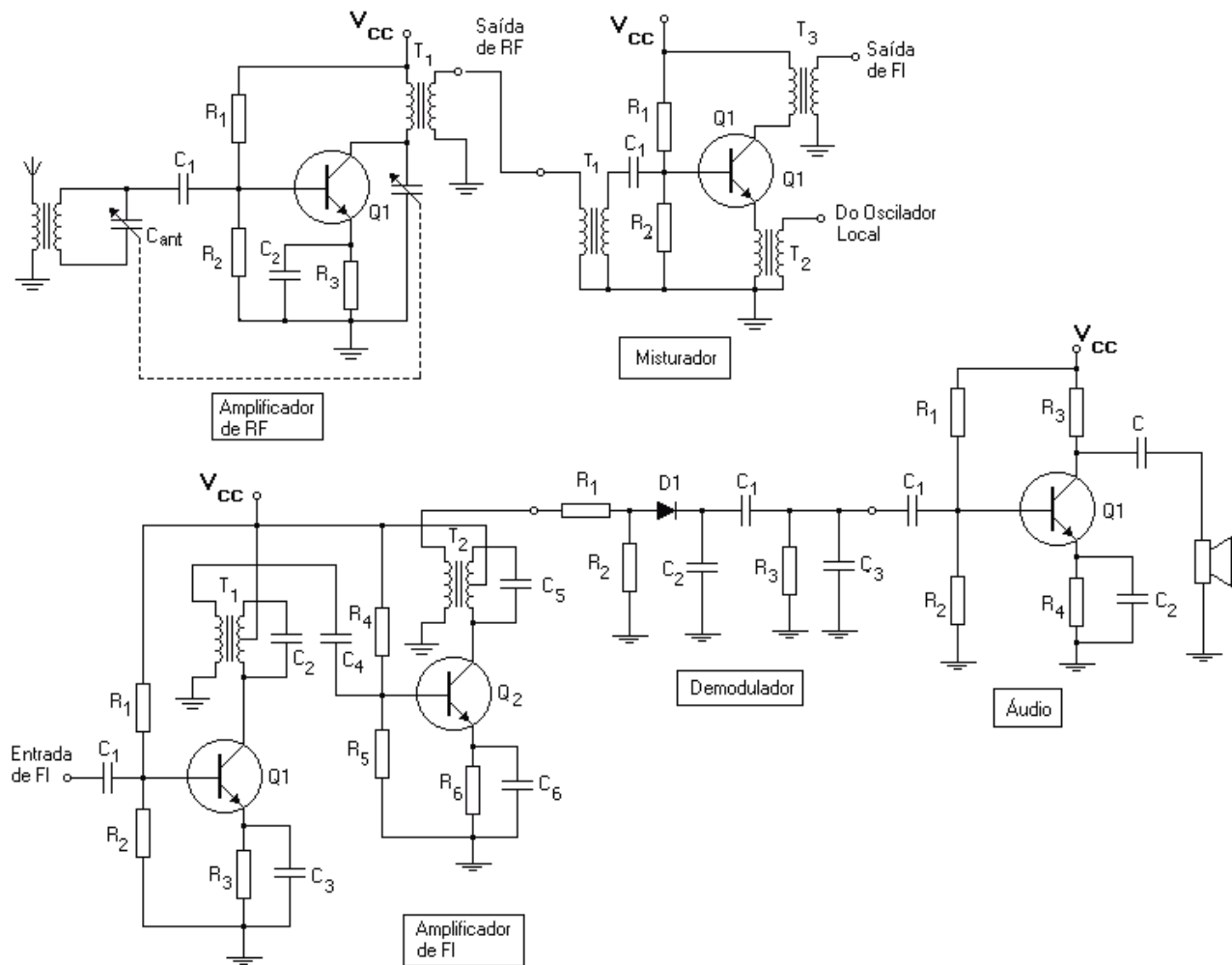


Figura 23

A série de Fourier

Baron Jean Baptiste Joseph Fourier



☆ 1768 † 1830

Matemático Francês que desenvolveu a série trigonométrica chamada **A série de Fourier**

$$\text{Sen}(x) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{x^{2n+1}}{(2n+1)!} (-1)^n$$

O desenvolvimento de séries matemática baseadas em senos e cossenos foi feito por Fourier para aplicações em sistemas onde ocorre troca de calor. Isto em virtude do aparecimento de equações diferenciais e integrais.

São os conceitos básicos também estudados por Taylor e McLaurin. Daí em diante, a aplicação desses conceitos abrangem diversas áreas, particularmente aquelas que necessitam tratar de interferências aleatórias do meio. Assim, sistemas de controle, trajetória de foguetes, etc., e particularmente em telecomunicações.

Exemplo de aplicação com auxílio do Excel:

a) $f(x) = \text{sen}(x) + \text{cos}(x)$

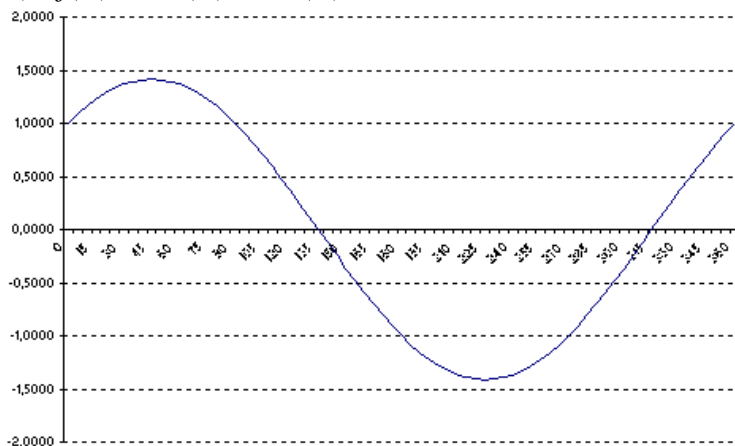


Figura 24

b) $f(x) = \text{sen}(2x) - \text{cos}3(x)$

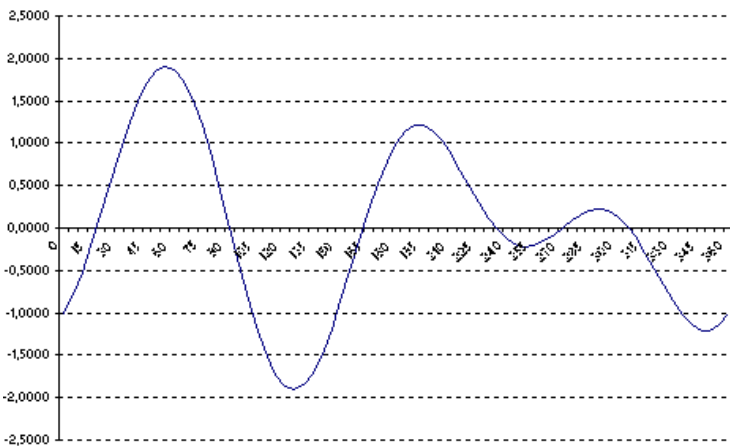


Figura 25

Para a funcionalidade da análise, existem duas condições necessárias:

- a) a função seja contínua no intervalo
- b) a função seja cíclica

A equação geral resulta:

$$f(x) = A + a_1 \text{Cos}(x) + a_2 \text{Cos}(2x) + \dots + b_1 \text{sen}(x) + b_2 \text{sen}(2x) + \dots$$

De onde:

$$f(x) = A + \sum_{k=1}^{\infty} a_k \text{Cos}(kx) + b_k \text{Sen}(kx)$$

Seja a função:

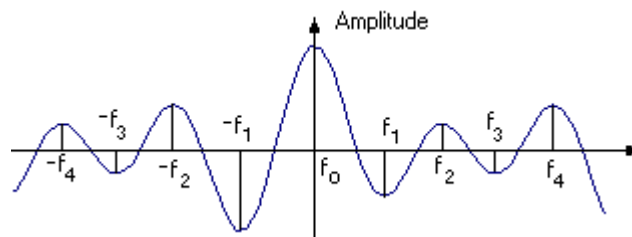


Figura 26

Observe que a função apresenta uma perda a medida que se afasta as origem em f_0 . Aqui representamos o espectro de sinal (riscos verticais em f_k onde f_0 é o sinal principal de amplitude (A) e f_1 , f_2 , f_3 e f_4 são **harmônicas**, isto é, **submúltiplos de f_0** , e cujas amplitudes são a_1 , a_2 , a_3 e a_4 respectivamente.

Genericamente podemos dizer que em um intervalo de $-\pi$ a $+\pi$:

$$A = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) dx$$

$$a_k = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \cos(kx) dx$$

$$b_k = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \sin(kx) dx$$

Ruído

Todas as formas de interferência em sinais de rádio são chamadas de ruído. Em ondas pode parecer estranho a existência de ruído pelo fato desta ser uma Onda Eletromagnética (OEM), entretanto é conveniente lembrar que todas as atividades, tanto terrestres como cósmicas podem produzir forças que de uma forma ou de outra interferem na OEM.

O mais interessante e imediato é o fato de que em transmissões, recepções de sinais de radio, todo o ruído que é anexado a este é em **amplitude**.

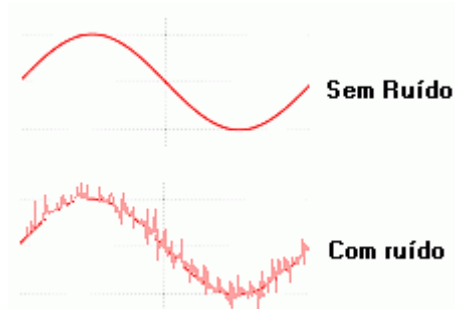


Figura 27

Um outro agravante está no fato de que sinais modulados, tanto em AM como em FM, além da deficiência do seletor de RF, terminam por permitir a passagem tanto de um (AM) quanto o outro (FM) no mesmo receptor - daí a possibilidade de receber AM em seletores FM.

Isso é o mesmo que dizer que o seletor de FM pode deixar passar um canal de AM. Na prática isto reflete diretamente no estágio de áudio, onde FM é ouvido com "ruído de AM".

No tratamento de AM é muito pouco o que realmente podemos fazer visto que a informação está codificada justamente na am-

plitude do sinal. Mas em FM, como a informação está na variação da frequência, e nesse caso podemos retirar apenas uma pequena faixa que me dê essas informações.

Outro motivo de interferência em seletores é a presença de harmônicas (explicado após a **Figura 26**). Essas frequência múltiplas da portadora f_c eventualmente "confundem" o circuito seletor de RF.

Utilizando as séries de Fourier é possível o seu estudo, e é exatamente de onde compreendemos a presença de sinais de "**estação fantasma**".

Filtros

Como o próprio nome sugere são circuitos que permitem apenas a passagem dos sinais desejados.

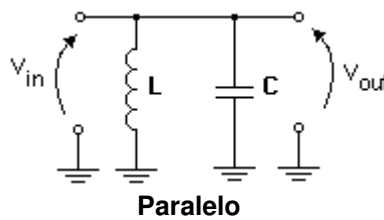
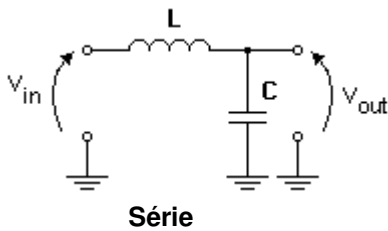
Tipos

- { Ativo
- Passivo

Passivo

Apenas utiliza componentes que funcionam sem alimentação tais como Resistor, Indutor e capacitor.

Ex:



Casos específicos

RLC Série

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(2 \times \pi \times f \times L - \frac{1}{2 \times \pi \times f \times C}\right)^2}$$

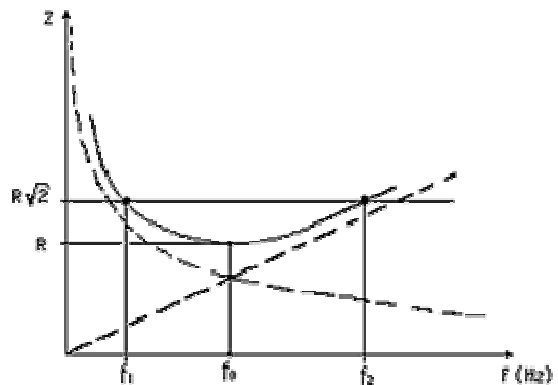


Figura 28

RLC paralelo

$$Z = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{R^2} + \left[\frac{1}{2\pi f L} - 2\pi f C\right]^2}}$$

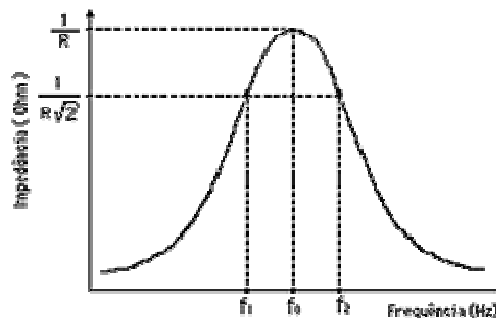
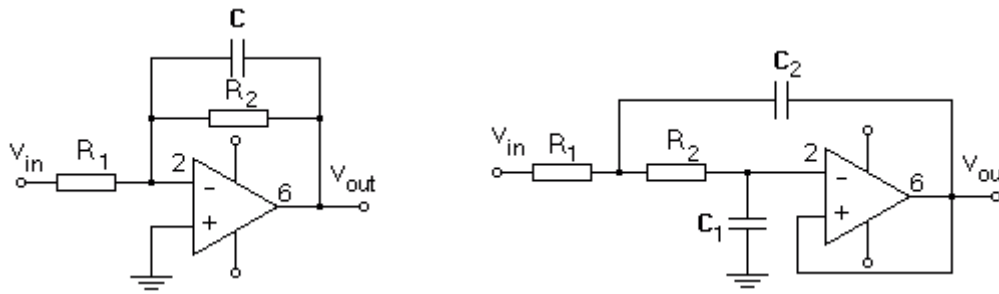


Figura 29

Ativo

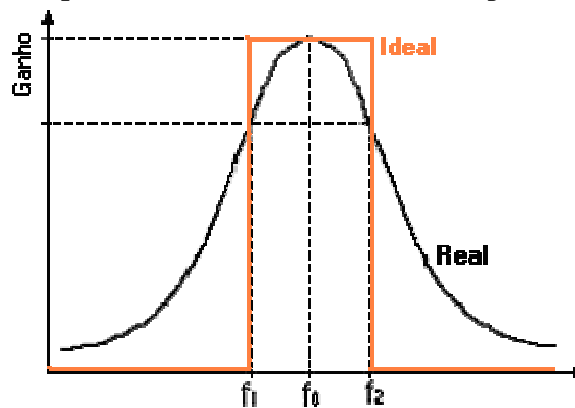
Utiliza componentes que somente funcionam com alimentação externa tais como Circuitos integrados e Transistores.



Integrador com limitação do ganho em DC

filtro passa-baixa de 2ª ordem de Sallen & Key
Figura 30

Ainda falando sobre filtros resta concluir, lembrando que, mesmo para filtros ativos teremos sempre o problema da resposta real, isto é, uma resposta não ideal, ou seja:



Onde o melhor que podemos obter é, linearizando (obter simetria) e limitando o problema a um valor aceitável de f_1 e f_2 (Bandas laterais).

Modulação em Freqüência (FM)

Basicamente, muitos circuito de FM tem as mesmas características de AM, por essa razão basearemos nosso estudo apenas naquelas características que diferem de AM.

A modulação em FM é muito mais imune a ruídos do que a modulação AM devido ao fato que a informação (Modulante) está na freqüência e não na amplitude. Fato interessante esse aliás porque a amplitude de um sinal de FM é constante, sendo que o que muda é apenas a freqüência.

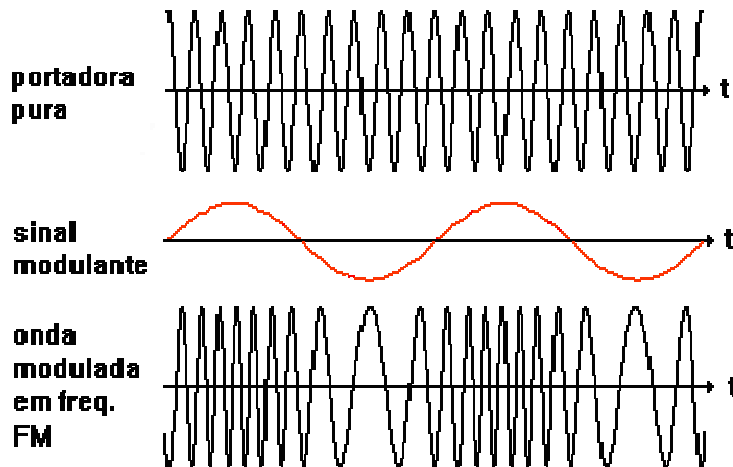


Figura 31

Moduladores de FM

Existem muitos métodos práticos diferentes de modulação de frequência. Alguns são derivados de uma equação diferencial cujas soluções são sinais de FM embora outros impliquem na modulação de uma onda quadrada ou triangular e o sinal filtrado através de um filtro apropriado. O método que trataremos é o que usa um oscilador controlado por tensão (VCO).

Um VCO é um circuito oscilatório cuja frequência de oscilação esta determinada por uma tensão ou corrente CC ou AC de baixa frequência. Um modo de obter um VCO é substituir o capacitor de realimentação no circuito ressonante por um diodo de capacidade variável (VVC) cuja capacidade é função da tensão que lhe é aplicada.

A figura 32 mostra um VCO baseado em um oscilador Hartley. Se ao invés de controlar a frequência com tensão CC, conectamos um sinal AC de baixa frequência ao VVC, a frequência do oscilador variará de acordo com o sinal de baixa frequência e obteremos um sinal de FM.

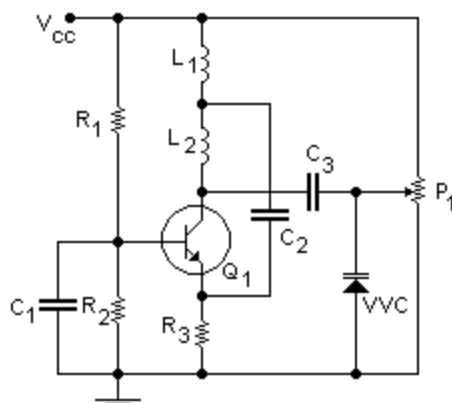


Figura 32 (Oscilador Hartley controlado por Tensão)

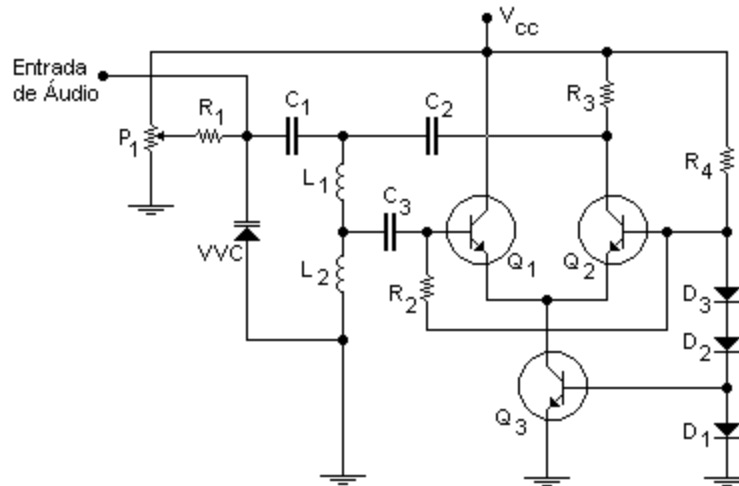


Figura 33 (Oscilador Hartley controlado por Tensão melhorado)

Aqui foi agregado uma etapa diferencial (Q_1 e Q_2) com uma fonte de corrente de um transistor (Q_3) que serve de elemento amplificador. P_1 determina a frequência da portadora e o sinal modulador é conectado a entrada de AF.

Limitadores

Um detector de AM só precisa recuperar o sinal da envolvente da onda de AM ao passo que um detector de FM, por outro lado, deve recuperar informação da frequência e fase da onda de FM e ignorar as variações de amplitude.

Infelizmente a maioria dos detectores (ou demoduladores) de FM também demodulam AM em uma certa proporção, e dado que a envolvente de uma onda de FM é afetada por ruído, a linearidade de etapas amplificadoras, etc., estas variações de amplitude podem ser detectadas e aparecerão na saída como distorção ou ruído.

Quase todos os receptores de FM incorporam um circuito que elimina as variações de amplitude da envolvente antes de efetuar a detecção propriamente dita. Este circuito se chama **limitador** (Figura 34).

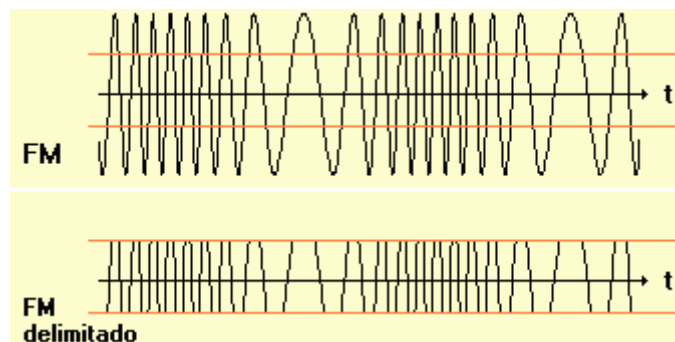


Figura 34 (Ação do limitador)

Em muitos casos o limitador não é um circuito separado sendo que forma parte integral dos amplificadores de FI. Na figura 35 vemos as características de um limitador ideal.

No limitador ideal qualquer sinal de entrada é convertido em um sinal de saída de amplitude constante. Em um limitador real, a amplitude do sinal de entrada deve estar em um nível específico - o limiar de limitação. Na figura 35, vemos um limitador com diodo real e sua característica.

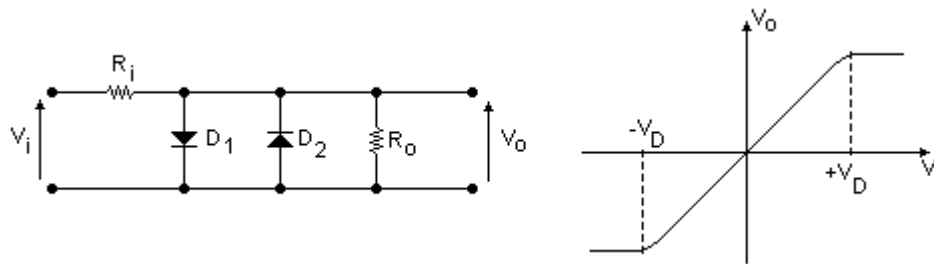


Figura 35

Quando a tensão de entrada é menor que a tensão de saturação do diodo (0.7 V de saída para diodos de silício) os diodos atuam basicamente como resistências e a tensão de saída segue a tensão de entrada. Quando a tensão de entrada cresce acima da tensão de saturação (V_D) a tensão de saída permanece estável e limitada a V_D . Portanto este limitador opera bem somente para sinais de entrada maiores que V_D .

O sinal de entrada V_e comuta os dois transistores da etapa diferencial ($Q_1 - Q_2$). Quando um dos transistores está saturado o outro está em corte. Neste estado a tensão de saída está determinada pela corrente prevista pelo transistor fonte Q_3 (o qual é constante) e a resistência R_2 , e não é função da tensão de entrada. Portanto o circuito funciona como um limitador dinâmico e pode também amplificar o sinal de entrada.

Em um circuito típico que usa um CI 371 (que contém os transistores e diodos da figura 36) a tensão de entrada necessária para saturar um transistor e cortar a condução do outro está em torno de 115 mV, portanto uma amplitude de entrada de 250 mV_{PP} assegura uma boa limitação.

Já que o circuito amplifica além de limitar, pode servir como amplificador de FI se forem agregados circuitos ressonantes na entrada e na saída.

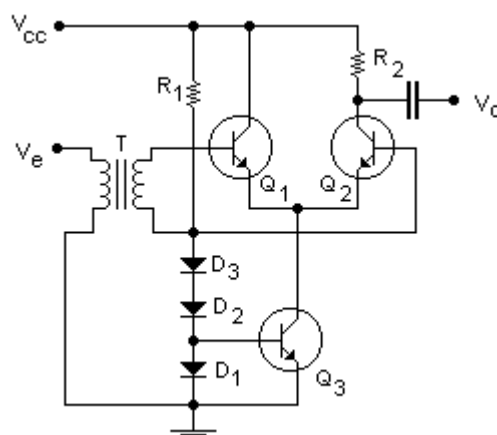


Figura 36

Demoduladores de FM

A maioria dos demoduladores de FM usam a técnica desenhada na figura 37.

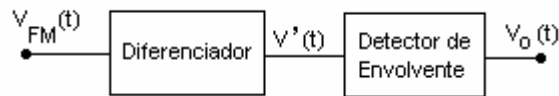


Figura 37

O sinal de FM com amplitude limitada é **diferenciada** e o sinal resultante passa por um **detector de envolverte**. Para entender bem, derivaremos a equação do sinal de FM.

$$V_{FM}(t) = V_C \cos \left[\omega_c t + k_F V_M \int_{-\infty}^t \cos \omega_M \lambda d\lambda \right] \quad (\text{original})$$

$$\frac{d}{dt} [V_{FM}(t)] = \underbrace{-V_C (\omega_c + k_F V_M \cos \omega_M t)}_{\text{Envolverte}} \times \text{Sen} \left(\omega_c t + k_F V_M \int_{-\infty}^t \cos \omega_M \lambda d\lambda \right)$$

Passando o sinal da equação através de um **detector de envolverte** só permanece $V_C (\omega_c + k_F V_M \cos \omega_M t)$ e este valor é proporcional ao sinal de informação original.

Existem 3 métodos básicos de diferenciação de um sinal de FM:

- (a) Diferenciação direta
- (b) Diferenciação no domínio da frequência
- (c) Diferenciação com retardo de tempo

a) Diferenciação Direta:

A figura 38 mostra um exemplo de um demodulador de FM que usa diferenciação direta.

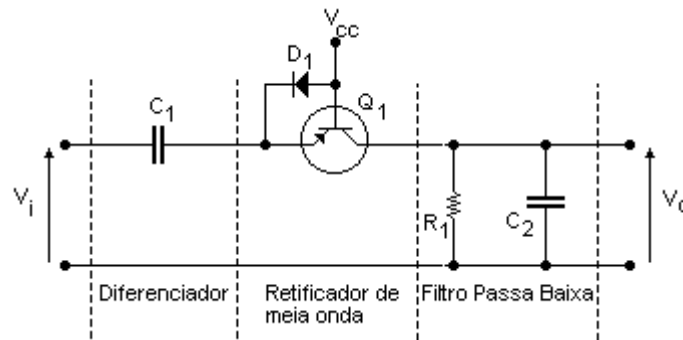


Figura 38

O capacitor C_1 é o elemento de diferenciação. O emissor de Q_1 está conectado a terra para CA através de D_1 e da junção base-emissor de Q_1 . Portanto a corrente através de C_1 é dada por:

$$i_c = \frac{dV_i}{dt}$$

Somente quando i_c está indo em direção à Q_1 e circulará através deste (sentido direto) o que demonstra que o circuito opera como um retificador de meia onda. R_1 e C_2 filtram a onda retificada e a saída é portanto o sinal de informação requerida. Este demodulador tem a desvantagem de distorcer o sinal de saída já que o diodo D_1 e a junção BE de Q_1 não são ideais, e assim C_1 não é um diferenciador ideal.

b) Demoduladores de domínio da frequência

Um diferenciador no domínio da frequência é um circuito linear cuja função de transferência tem a forma mostrada na figura 39.

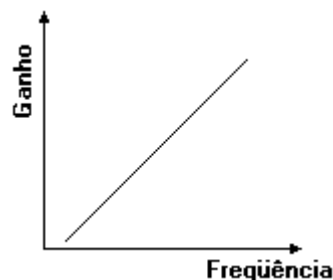


Figura 39

É possível demonstrar que qualquer circuito com uma função de transferência similar opera como um diferenciador na faixa de frequência ao redor do centro da faixa linear. Por exemplo, a função de transferência mostrada na figura 39 tem a forma $H(S) = kS$. A transformada de Laplace inversa é:

$$h(t) = \frac{d}{dt}$$

e representa um diferenciador. Uma forma prática de obter um diferenciador é usar um circuito ressonante com função de transferência similar a da figura 40.

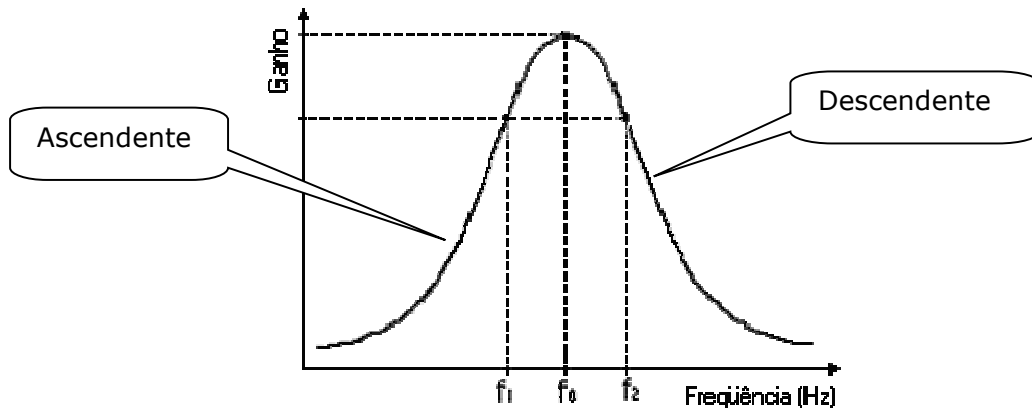


Figura 40

Na região entre os pontos da curva cortados por f_1 e f_0 (ascendente) a função de transferência é aproximadamente linear e portanto o circuito ressonante opera como um diferenciador em torno de f_0 .

A figura 41 mostra um circuito de FM prático que utiliza este princípio.

O circuito ressonante composto da bobina L e do capacitor C seguido por um detector de envoltória composto pela resistência R_0 e o capacitor C_0 . A relação entre $V_0(t)$ e o sinal modulador ω_m está no gráfico da figura 42.

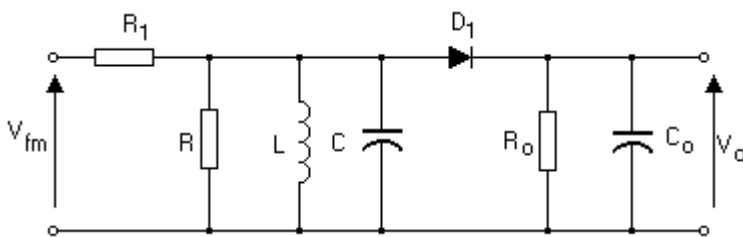


Figura 41

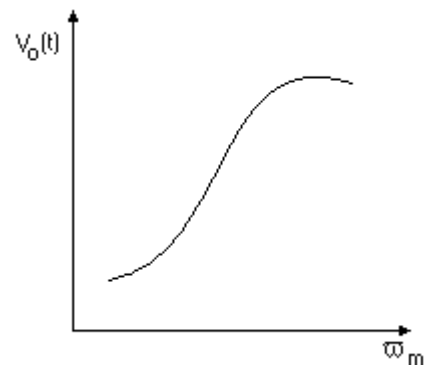


Figura 42

c) Diferenciador com retardo de tempo

Um diferenciador com retardo de tempo opera aproximando a definição fundamental da derivada:

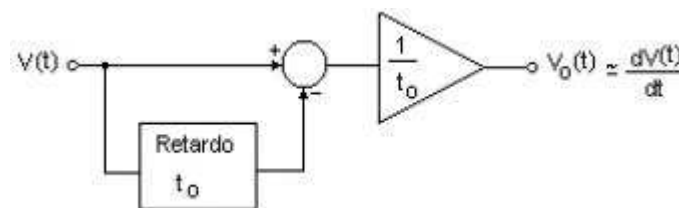


Figura 43

O retardo t_0 deve ser pequeno em comparação com as variações de

$v(t)$. Já que o retardo de tempo pode ser visto como um deslocamento de fase (retardo de tempo \cong deslocamento de fase), a mesma operação pode ser executada por um circuito defasador.

Um demodulador defasador prático é o demodulador de **Foster-Seely** mostrado na figura 44.

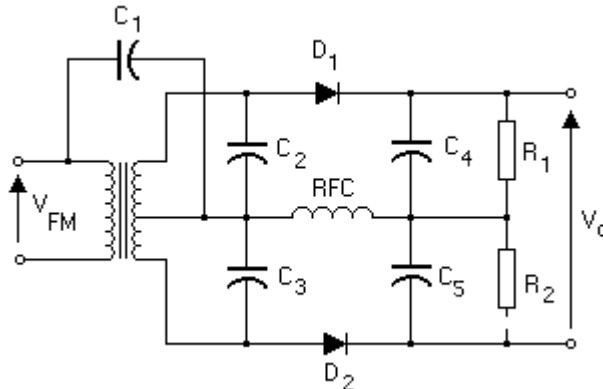
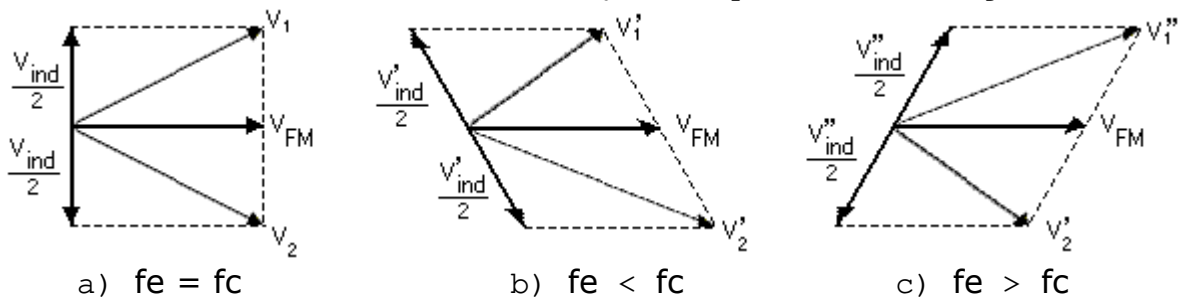


Figura 44

A operação do demodulador de Foster-seely é a seguinte:

O secundário do transformador T_1 forma parte de dois circuitos ressonantes, o qual consiste na metade superior de T_1 e C_2 e o outro, que consiste na metade inferior de T_1 e C_3 . Ambos os circuitos estão sintonizados á freqüência central do sinal de FM a detectar (f_0).

Os diodos D_1 e D_2 com seus respectivos filtros passa baixa (R_1 e C_4 , R_2 e C_5) formam detectores de envolvente. Quando o sinal de entrada é uma onda senoidal de freqüência f_c as tensões no secundário de T_1 estão compostas de dois componentes. Um é a tensão induzida pelo sinal de entrada desde o primário de T_1 e a outra é o sinal de entrada que chega diretamente acoplado por C_1 . A tensão induzida está defasada em 90° em relação ao primário. (figura (a)).



A tensão que chega a D_1 e D_2 é a soma fasorial destas, dos componentes V_1 e V_2 , as quais são de igual magnitude. A tensão de saída que é a diferença entre V_1 e V_2 é igual a zero.

Quando a freqüência do sinal de entrada é menor que f_c os circuitos ressonantes são reativos e obtemos o diagrama de fasores da figura (b). E neste caso $|V_2'| > |V_1'|$ e V_0 será positivo.

Quando a freqüência do sinal de entrada é maior que f_c os circuitos ressonantes são indutivos e obtemos o diagrama de fasores da figura (c). E neste caso $|V_2''| < |V_1''|$ e V_0 será negativo.

Podemos provar que V_0 depende da freqüência do sinal de entrada e portanto o demodulador de **Foster-Seely** pode demodular FM.

A principal desvantagem do demodulador de **Foster-seely** é que

ele detecta variações na amplitude do sinal de entrada, já que as amplitudes de V_1 e V_2 em uma frequência particular, depende da amplitude do sinal de entrada.

Podemos eliminar esta desvantagem no detector de relação mostrado na figura 2,17. A operação do circuito é similar a do demodulador de **Foster-Seely** e os mesmos diagramas de fasores são aplicáveis.

Se as tensões sobre os diodos são V_a e V_b respectivamente, então:

$$V_0 = \frac{V_a - V_b}{2} - V_b = \frac{V_a - V_b}{2}$$

de onde V_a e V_b são iguais em amplitude a V_1 e V_2 no demodulador de **Foster-Seely**.

A tensão no capacitor C_0 é $V_a + V_b$.

Dado que a constante de tempo de C_0 e $R_1 + R_2$ se torna maior em relação a frequências de áudio, a tensão e o capacitor é constante e portanto $V_a + V_b$ é constante. Para um sinal de entrada de FM, se V_a aumenta V_b diminui e vice-versa, tal como no demodulador de **Foster-Seely**.

Para um sinal de entrada de AM, tanto V_a como V_b crescem, mas o capacitor C_6 impede e a entrada de AM não tem influencia na saída.

Outro demodulador de FM que opera com o princípio da defasagem é o detector de produto (Figura 45)

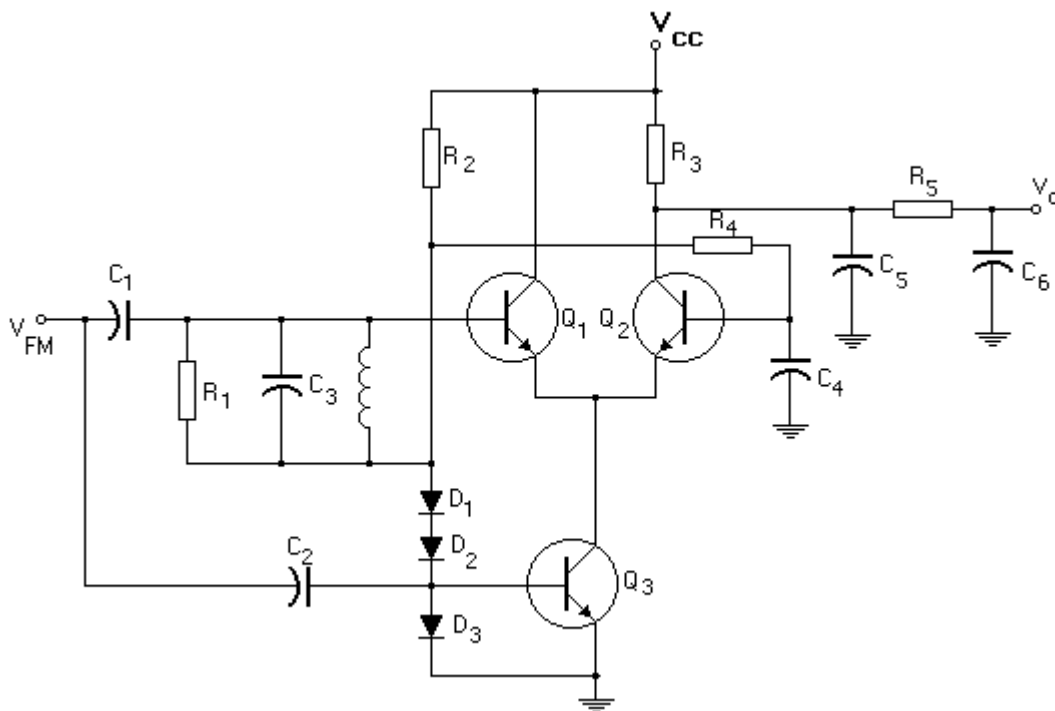


Figura 45

O circuito ressonante de entrada composto de R_1 , C_3 e L_1 produz uma defasagem proporcional a frequência do sinal de entrada.

A defasagem para um sinal de entrada de frequência igual a frequência de ressonância é 90° .

O sinal defasado é amplificado pela etapa diferencial composta de Q_1 e Q_2 . O ganho desta etapa esta determinado pela corrente através de Q_3 , a qual é ajustada pelo sinal de entrada. Deste modo

o circuito atua como um multiplicador.

Ao multiplicar o sinal defasado pelo sinal de entrada se produz uma quantidade de componentes de frequências distintas.

A componente de baixa frequência é proporcional ao sinal de informação e portanto o filtro passa baixas da saída elimina todas as outras componentes menos esta.

Apêndice A

FM Teoria Avançada

A equação básica que expressa a modulação de fase e frequência é dada por:

$$V(t) = V_C \cos[\omega_c t + \phi(t)]$$

onde:

V_C é a amplitude da portadora

ω_c é a frequência da portadora

$\phi(t)$ é a fase variável no tempo (determinada pela moduladora)

No caso da modulação de fase (PM) a fase $\phi(t)$ é determinada pelo sinal da informação de acordo com a equação:

$$\phi(t) = k_P V_M \cos \omega_M t$$

onde $V_M \cos \omega_M t$ é o sinal de informação.

O valor máximo de $\phi(t)$ chamado **desvio de fase**, será representado por $\beta = k_P V_M$ que denominamos **índice de modulação**. Portanto, no caso da modulação de fase (PM) a equação básica pode ser reescrita como:

$$V_{PM}(t) = V_C \cos[\omega_c t + \beta \cos \omega_M(t)]$$

equação 1

De onde podemos ver que a fase de $V_{PM}(t)$ varia com a informação de onde o desvio de fase instantânea depende da amplitude e da frequência da onda de informação.

A frequência é a derivada da fase $f = d\phi/dt$ e em frequência modulada (FM) é a derivada da fase que varia com a informação:

$$\frac{d\phi}{dt} = k_F V_M \cos \omega_M t$$

Onde k_F é uma constante.

Integrando cada um dos membros da equação obtemos a fase:

$$\phi(t) = \int_{-\infty}^t k_F V_M \cos \omega_M \lambda d\lambda$$

onde λ é a variável de integração.

Substituindo na equação 1 obteremos a onda de FM:

$$V_{FM}(t) = V_C \cos \left[\omega_c t + k_F V_M \int_{-\infty}^t \cos \omega_M \lambda d\lambda \right]$$

Para obtermos a frequência instantânea de V_{FM} devemos tomar a **derivada da fase instantânea** (a qual é o argumento do Cosseno na onda de FM) :

$$\omega_{INST} = \frac{d}{dt} \left[\omega_c t + k_F V_M \int_{-\infty}^t \cos \omega_M \lambda d\lambda \right] = \omega_c + k_F V_M \cos \omega_M t$$

De onde podemos ver que a frequência instantânea é composta pela frequência da portadora mais uma frequência que varia com a informação e que denominamos de desvio de frequência.

O máximo desvio de frequência é $\Delta\omega = k_f V_M$. Portanto a frequência instantânea de uma onda de FM varia em torno da frequência da portadora a um ritmo determinado pelo sinal de informação.

Se evoluirmos a integral de $V_{FM}(t)$ sem levar em conta o limite inferior ($-\infty$) e substituindo em $\Delta\omega$, obteremos:

$$V_{FM}(t) = V_C \text{Cos} \left[\omega_c t + \frac{\Delta\omega}{\omega_M} \text{Sen} \omega_M(t) \right]$$

e $\Delta\omega/\omega_M$ representa a relação entre o máximo desvio de frequência e a frequência da moduladora, e é o que definimos como o **índice de modulação (β)**. E portanto $V_{FM}(t)$ resulta:

$$V_{FM}(t) = V_C \text{Cos} [\omega_c t + \beta \text{Sen} \omega_m(t)]$$

A figura 1, mostra os sinais de transformação e suas respectivas formas de onda para AM e FM.

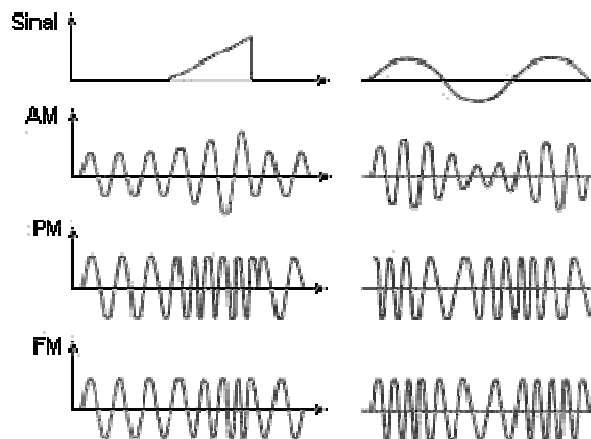


Figura 1

A equação abaixo descreve um sinal modulado em FM por um sinal senoidal, que expandindo, resulta:

$$V_{FM}(t) = V_C \text{Cos} [\omega_c t + \beta \text{Sen} \omega_M t] = V_C \text{Cos} \omega_c t \times \text{Cos} (\beta \text{Sen} \omega_M t) - V_C \text{Sen} \omega_c t \times \text{Sen} (\beta \text{Sen} \omega_M t) \quad \text{Mas}$$

$$\text{Cos} (\beta \text{Sen} \omega_M t) \text{ e } \text{Sen} (\beta \text{Sen} \omega_M t)$$

e podem ser desenvolvidos por série de Fourier resultando:

$$\text{Cos} (\beta \text{Sen} \omega_M t) = J_0 + \sum_{\text{npar}}^{\infty} 2J_n(\beta) \text{Cos} n\omega_M t$$

$$\text{Sen} (\beta \text{Sen} \omega_M t) = J_0 + \sum_{\text{nimpar}}^{\infty} 2J_n(\beta) \text{Sen} n\omega_M t$$

onde $J_n(\beta)$ são funções de Bessel de 1ª ordem, de ordem n e argumento β . Fazendo a substituição dessas equações teremos:

$$V_{PM}(t) = V_C \times J_0(\beta) \cos \omega_c t + \sum_{\text{nímpar}}^{\infty} V_C J_n(\beta) [\cos(\omega_c + n\omega_m)t - \cos(\omega_c - n\omega_m)t] + \sum_{\text{npar}}^{\infty} V_C J_n(\beta) [\cos(\omega_c + n\omega_m)t + \cos(\omega_c - n\omega_m)t]$$

Melhorando a apresentação, teremos:

$$V_{PM}(t) = V_C \times J_0(\beta) \cos \omega_c t + \sum_{n=1}^{\infty} V_C J_n(\beta) \cos(\omega_c + n\omega_m)t + (-1)^n \sum_{n=1}^{\infty} V_C J_n(\beta) \cos(\omega_c - n\omega_m)t$$

A equação nos mostra que a onda de FM está composta de um número infinito de componentes de frequência: **freqüências da banda lateral inferior** ($\omega_c - n\omega_m$), **componente de freqüência da portadora** e **freqüência da banda lateral superior** ($\omega_c + n\omega_m$).

A amplitude de cada componente está determinada por $V_C J_n(\beta)$ e é controlada pela amplitude da portadora e pelo **índice de modulação** β .

O espectro de freqüências da onda de **FM** dada pela equação definida acima é mostrado na figura 2 (supondo $V_C=1$).

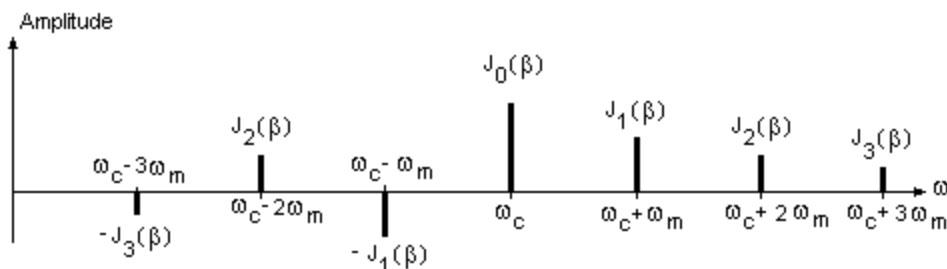


Figura 2

Da figura 1 definimos um número de características interessantes de FM já que o número de componentes de frequência é infinito, o ganho de banda necessário para passar uma onda de FM perfeita é infinito. E o espectro não é simétrico com respeito a frequência da portadora (como também o é no caso de AM) e para valores da portadora.

Para determinados de β , $J_0(\beta)=0$ e não há componente de frequência da portadora. Isto significa que contrário à AM, a frequência da portadora contém parte da informação.

Para entender as considerações feitas sobre o ganho de banda práticas para FM é necessário traçar um gráfico das funções de Bessel $J_n(\beta)$ para vários valores de n (figura 3).

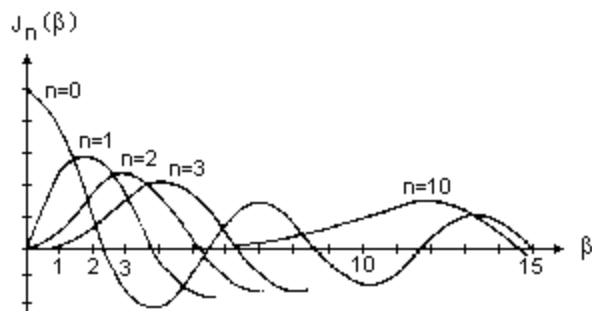


Figura 3

O número de linhas de banda lateral que tem amplitude apreciável depende do índice de modulação β .

Quando $\beta \ll 1$ somente $J_0(\beta)$ e $J_1(\beta)$ são significativos, de modo que o espectro constará de três linhas com forma muito similar a AM mas com inversão de fase da banda lateral inferior, tal como mostramos na figura 3.

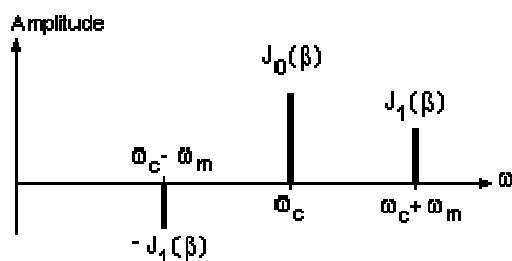


Figura 3

Quando $\beta \gg 1$ teremos muitas bandas laterais significativas e isto significa que é necessário um grande ganho de banda.

Podemos demonstrar que para $\beta \gg 1$ as linhas de banda lateral significativas estão contidas no intervalo de frequências $\omega_c \pm \beta\omega_m$, ainda que para $\beta \ll 1$ as linhas significativas estejam no intervalo de $\omega_c \pm \omega_m$. Isto significa que o ganho de banda necessário para uma onda de FM é $B = 2\beta f_m$ donde $f_m = \omega_m / 2\pi$

Já que $\beta = \Delta\omega / \omega_m$, o ganho de banda necessário é igual ao dobro do desvio de frequência máxima $2\Delta\omega$ o que significa que para reduzir o ganho de banda é necessário fazer o mesmo com o desvio de frequência.

Outro resultado importante é que, uma vez dado que o desvio de frequência depende somente da amplitude do sinal modulador ($\Delta\omega = kFV_m$) o ganho de banda não depende da frequência moduladora ainda que esta frequência determine o número de linhas da banda lateral contidas no ganho de banda.

Para Concluir, resta lembrar que todo este cuidado está sendo tomado em virtude do sinal FM Ter o tratamento de amplitude (Ganho) idêntico ao do sinal AM.

E somando a isto o fato de existirem, conforme nos mostra a série de Fourier, infinitas bandas laterais (Bessel) com amplitudes inferiores e que podem em consequência disto ser eliminadas em

um receptor de rádio por meio de um circuito chamado **limitador**, cuja principal função consiste em eliminar a amplitude a um limite mínimo onde o sinal de áudio é preservado na forma de variações de frequência porém permitindo que desta forma os ruídos aderidos ao sinal da portadora sejam eliminados.

Na verdade, mesmo durante o processo de transmissão, na geração do sinal de FM, todo cuidado com os níveis da portadora devem ser tomados para evitar que as bandas laterais (indesejadas) não tenham nível suficiente para perturbar o sistema de recepção FM, embora já seja de nosso conhecimento que as mesmas são geradas no mesmo processo de geração do sinal FM ou AM.

Apêndice B

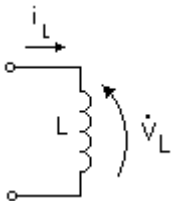
Diferenciadores e Integradores

Os efeitos elétricos em CA correspondem, no tempo, a fenômenos que representam efeitos matemáticos da integral e da diferencial.

Os componentes **Capacitor** e **Indutor**, particularmente, causam defasagem entre a tensão e a corrente correspondentes **respectivamente** à **integral** e da **diferencial**.

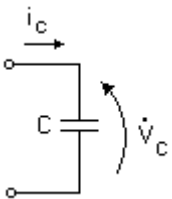
Circuitos básicos Passivos:

a) Indutor



$$V_L(t) = L \frac{di(t)}{dt}$$

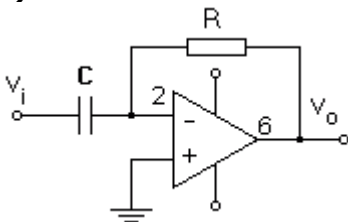
b) Capacitor



$$V_C(t) = \frac{1}{C} \int i(t) dt$$

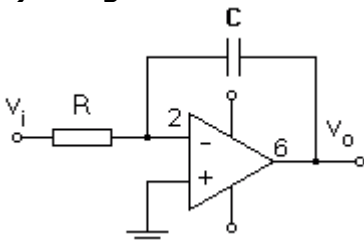
Circuitos ativos:

a) Diferenciador



$$V_o = -R_C \frac{dV_i(t)}{dt}$$

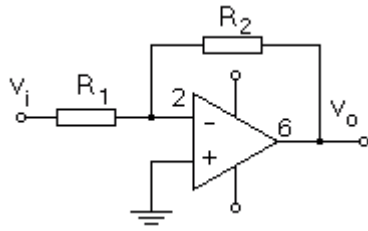
b) Integrador



$$V_o = -\frac{1}{RC} \int V_i(t)$$

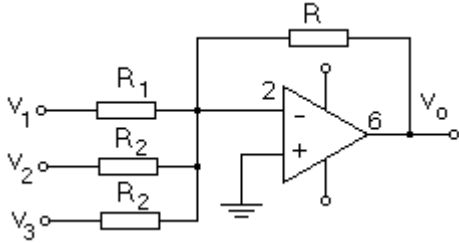
E esta evolução possibilitou simular equações diferenciais e integrais com circuitos eletrônicos tais como:

a) Proporcional



$$V_o = -\frac{R_2}{R_1}$$

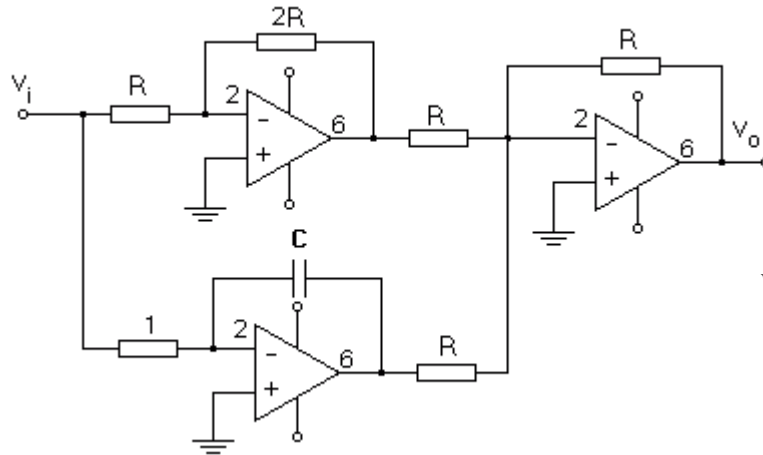
b) Somador



$$V_o = -(V_1 + V_2 + V_3) \frac{R_N}{R}$$

Tal que $R_1 = R_2 = R_3 = R_N$

Exemplo:



$$V_o(t) = R \cdot i(t) + \frac{1}{C} \int i(t) dt$$