

Sistemas de Telecomunicações

Docente: Diego Luiz e Cunha da Silva

2023.2

O Radiotransmissor

O radiotransmissor é o gerador da corrente de radiofrequência (RF) a ser convertida em energia irradiante pela antena transmissora. A corrente de RF considerada é alternada senoidal e chega à antena após percorrer a linha de transmissão (LT). Um transmissor típico, sem modulador, é composto basicamente de quatro estágios, a saber: oscilador, separador, amplificador de potência e fonte de alimentação.

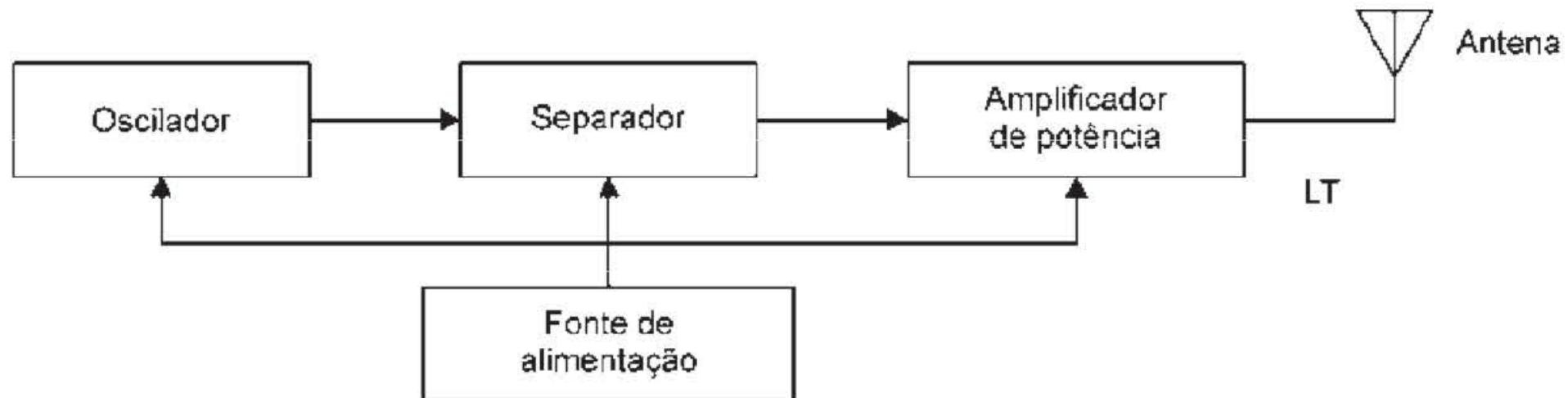


Figura 5.1 - Diagrama em blocos de um transmissor de rádio sem modulador.

O Radiotransmissor

Circuito oscilador

A responsabilidade inicial da geração da onda portadora é do circuito oscilador, composto de um cristal de quartzo, que proporciona maior estabilidade em frequência da onda gerada. A estabilidade da frequência é medida em **ppm**, partes por milhão, e depende da qualidade dos componentes do circuito e da temperatura ambiente.

Diferentes circuitos osciladores, sejam a cristal de quartzo, RC ou LC, podem gerar ondas com diferentes formas e em qualquer frequência; contudo, a forma mais usada em rádio é a senoidal.

Estágio separador

O estágio separador impede que possíveis variações na carga, ligada à saída do transmissor, afetem o bom funcionamento do oscilador.

O Radiotransmissor

Estágio amplificador de potência de RF

O estágio amplificador de potência é na verdade um amplificador de corrente; A saída destaca-se a presença de um filtro em T, assim denominado pela disposição dos componentes no esquema. A participação do filtro é necessária para atenuar fortemente os harmônicos e os produtos de intermodulação nas frequências fora da banda específica de transmissão.

Fonte de alimentação

A fonte de alimentação supre o equipamento com a tensão elétrica necessária ao seu funcionamento. As fontes podem ser de dois tipos: contínua (DC) ou alternada (AC).

Fontes DC:

- bateria veicular (recarregada pelo alternador do próprio veículo);
- pilhas alcalinas, descartáveis, baterias de níquel-cádmio (Ni-Cd) ou lítio (Li), recarregáveis ou ainda bateria solar.

Fontes AC:

- rede elétrica urbana;
- grupo motor-gerador;

O Radiotransmissor

Modulação analógica da onda de rádio

Para a onda de rádio transportar os sinais elétricos da informação (voz, música, imagem ou dados), procede-se à modulação da onda portadora de RF.

Como a onda portadora senoidal e o sinal da informação são analógicos, a modulação é dita analógica.

O circuito eletrônico encarregado de modular a onda denomina-se **modulador**. O sinal que modula a onda portadora é **o sinal modulante ou modulador**, e a onda resultante é a **onda modulada**.

Trataremos da mais alta frequência do sinal modulante de f_m e da frequência da onda portadora de f_0

Para modular analogicamente a portadora, é condição necessária $f_0 \gg f_m$.

$$e(t) = E \cos(2\pi f_0 t + \phi) \text{ volt}$$

Onde E (amplitude); f_0 (frequência); ϕ (fase)

O Radiotransmissor

Modulação analógica da onda de rádio

Quando ocorrem tão somente **variações de amplitude na onda modulada** por ação do sinal modulante, permanecendo constante a frequência da onda portadora, **a modulação é dita em amplitude (AM)**.

Quando o sinal modulante provoca **desvios de frequência** na onda portadora, de $\pm \Delta f$, permanecendo constante a sua amplitude, **a modulação é dita em frequência (FM)**.

O Radiotransmissor

Modulação de Amplitude, AM

A amplitude da portadora é proporcional a amplitude instantânea do sinal modulante

Sejam as voltagens da portadora e do sinal modulante dadas por e_c e e_m , respectivamente

Notar que o ângulo de fase foi ignorado nas duas expressões porque ele não é alterado no processo de modulação de **amplitude**. Sua inclusão apenas complicaria a análise sem alterar os resultados

$$e_c = E_c \cos(\omega_c t)$$

$$e_m = E_m \cos(\omega_m t)$$

O Radiotransmissor

Sejam [$m(t)$] o sinal modulante, e [$c(t)$] a portadora dados por:

$$m(t) = E_m \cos(2\pi f_m t) \quad e \quad c(t) = E_0 \cos(2\pi f_0 t)$$

- A equação que descreve a modulação em amplitude com portadora presente é dada por:

$$e(t) = E_0 \left[1 + \frac{E_m}{E_0} \cos(2\pi f_m t) \right] \cos(2\pi f_0 t)$$

- A relação A_m/A_c é definida como índice de modulação:

$$m = \beta = \frac{E_m}{E_0}$$

- Em que $m \leq 1$

O Radiotransmissor

Sejam $[m(t)]$ o sinal modulante, e $[c(t)]$ a portadora dados por:

$$m(t) = E_m \cos(2\pi f_m t) \quad e \quad c(t) = E_0 \cos(2\pi f_0 t)$$

- A equação que descreve a modulação em amplitude com portadora presente é dada por:

$$e(t) = E_0 \left[1 + \frac{E_m}{E_0} \cos(2\pi f_m t) \right] \cos(2\pi f_0 t)$$

- A relação A_m/A_c é definida como índice de modulação:

$$m = \beta = \frac{E_m}{E_0}$$

- Em que $m \leq 1$

O Radiotransmissor

Índice de modulação

- Normalmente varia entre 0 e 1 e pode ser expresso em porcentagem (porcentagem de modulação), definido como:

$$m = \frac{E_m}{E_c} \quad (4)$$

- De (1) e (4), podemos escrever a equação para a voltagem modulada em amplitude:

$$\begin{aligned} A &= E_c + e_m = E_c + E_m \cos(\omega_m t) = E_c + mE_c \cos(\omega_m t) \\ &= E_c (1 + m \cos(\omega_m t)) \end{aligned} \quad (5)$$

Espectro de Frequência da onda AM

- A voltagem instantânea da onda modulada em amplitude é:

$$\begin{aligned} A &= E_c + e_m = E_c + E_m \cos(\omega_m t) = E_c + mE_c \cos(\omega_m t) \\ &= E_c (1 + m \cos(\omega_m t)) \end{aligned} \quad (6)$$

- Expandindo (6) usando relações trigonométricas

$$\begin{aligned} \cos x \cos y &= 1/2 [\cos(x - y) + \cos(x + y)] \\ e &= E_c \cos(\omega_c t) + \frac{m E_c}{2} \cos(\omega_c - \omega_m)t + \frac{m E_c}{2} \cos(\omega_c + \omega_m)t \end{aligned} \quad (7)$$

Espectro de Frequência da onda AM

$$e = E_c \cos(\omega_c t) + \frac{m E_c}{2} \cos(\omega_c - \omega_m)t + \frac{m E_c}{2} \cos(\omega_c + \omega_m)t$$

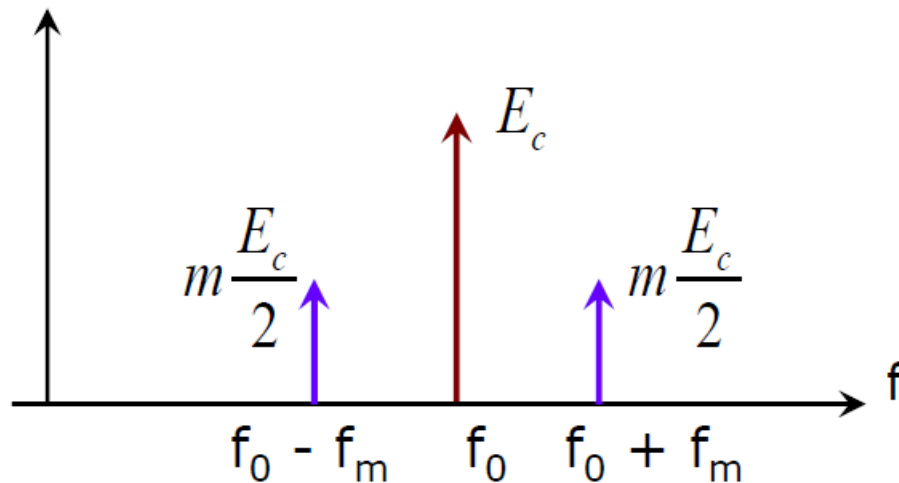
- A equação da onda modulada em amplitude tem três termos. O primeiro (idêntico à eq. (1)) representa a portadora não-modulada. Portanto, fica claro que o processo de modulação de amplitude tem o efeito de adição sobre o sinal não-modulado. Os termos adicionais produzidos são as bandas laterais. A frequência da banda lateral inferior é $f_c - f_m$ e a frequência da banda superior é $f_c + f_m$.
- A conclusão que tiramos é que a banda necessária para modulação de amplitude é o dobro da frequência do sinal modulante.
- Na modulação simultânea de vários sinais senoidais, como acontece em rádio-difusão AM, a banda necessária é o dobro da frequência de modulação mais alta.

Espectro Unilateral de Amplitude e de Potência

$$e(t) = E_c \left[1 + \frac{E_m}{E_c} \cos(2\pi f_m t) \right] \cos(2\pi f_c t)$$

Desenvolvendo a equação acima tem-se que:

$$e(t) = E_c \cos(2\pi f_c t) + m \frac{E_c}{2} \cos[2\pi (f_c - f_m) t] + m \frac{E_c}{2} \cos[2\pi (f_c + f_m) t]$$



Relações de Potência de um sinal AM

- Vimos que a componente da portadora do sinal modulado tem a mesma amplitude da portadora não-modulada. Entretanto, a onda modulada contém duas componentes de banda lateral.
- Portanto, o sinal modulado contém mais potência que a portadora não-modulada.
- Além disso, como a amplitude das bandas laterais depende do índice de modulação, a potência total do sinal modulado dependerá do índice de modulação.
 - Esta é a relação que iremos derivar.

Relações de Potência de um sinal AM

A potência do sinal modulado sobre uma resistência R (por ex., uma antena) sobre a qual ela é dissipada), para valores de voltagem rms é dada por:

$$P_t = \frac{E_{c_{rms}}^2}{R} + \frac{E_{LSB_{rms}}^2}{R} + \frac{E_{USB_{rms}}^2}{R} \quad (11)$$

Analogamente:

$$P_c = \frac{E_{c_{rms}}^2}{R} = \frac{\left(\frac{E_c}{\sqrt{2}} \right)^2}{R} = \frac{E_c^2}{2R} \quad (12)$$

$$P_{LSB} = P_{USB} = \frac{E_{SB_{rms}}^2}{R} = \left(\frac{mE_c/2}{\sqrt{2}} \right)^2 \div R = \frac{m^2 E_c^2}{8R} = \frac{m^2}{4} \frac{E_c^2}{2R} \quad (13)$$

Relações de Potência de um sinal AM

Substituindo (12) e (13) em (11):

$$P_t = \frac{E_c^2}{2R} + \frac{m^2}{4} \frac{E_c^2}{2R} + \frac{m^2}{4} \frac{E_c^2}{2R} = P_c + \frac{m^2}{4} P_c + \frac{m^2}{4} P_c$$
$$\frac{P_t}{P_c} = 1 + \frac{m^2}{2} \quad (14)$$

A eq. (14) relaciona a potência total do sinal AM à potência da portadora. Ela pode ser usada para determinar, dentre outros valores, o índice de modulação.

Notar, em (14), que a máxima potência num sinal AM é $P_t = 1,5P_c$, quando $m=1$ (sem distorção).

Exemplo 1

Uma portadora de 400 W é modulada com profundidade de 75%. Calcule a potência total do sinal modulado.

$$P_t = P_c \left(1 + \frac{m^2}{2} \right) = 400 \left(1 + \frac{0,75^2}{2} \right) = 400 \times 1,281$$

$$P_t = 512,5 W$$

Exemplo 2

Um transmissor de rádio-difusão irradia 10 kW quando modulado com porcentagem de 60. Quanto desta potência é potência da portadora?

$$P_c = \frac{P_t}{\left(1 + \frac{m^2}{2}\right)} = \frac{10}{1 + \frac{0,6^2}{2}} = \frac{10}{1,18} = 8,47 kW$$

Cálculos envolvendo corrente elétrica

Esta é uma situação prática, pois as correntes do sinal modulado e não-modulado são facilmente medidas, e precisamos calcular o índice de modulação a partir delas.

O problema é resolvido como se segue: Seja I_c a corrente não-modulada e I_t a corrente total, ou modulada, de um transmissor AM, ambas dadas no valor rms. Se R é a resistência sobre a qual ambas fluem, então

$$\begin{aligned}\frac{P_t}{P_c} &= \frac{I_t^2 R}{I_c^2 R} = \left(\frac{I_t}{I_c}\right)^2 = 1 + \frac{m^2}{2} \\ \frac{I_t}{I_c} &= \sqrt{1 + \frac{m^2}{2}} \quad \text{ou} \\ I_t &= I_c \sqrt{1 + \frac{m^2}{2}}\end{aligned}\tag{15}$$

Exemplo 3

A corrente na antena de um transmissor AM é de 8 A quando apenas a portadora está presente, mas aumenta para 8,93 A quando a portadora é modulada senoidalmente. Encontre a porcentagem de modulação e determine a corrente na antena quando a profundidade de modulação for de 0,8.

Exemplo 3

$$\left(\frac{I_t}{I_c}\right)^2 = 1 + \frac{m^2}{2} \therefore \frac{m^2}{2} = \left(\frac{I_t}{I_c}\right)^2 - 1 \therefore m = \sqrt{2 \left[\left(\frac{I_t}{I_c}\right)^2 - 1 \right]} \quad (16)$$

$$m = \sqrt{2 \left[\left(\frac{8,93}{8}\right)^2 - 1 \right]} = \sqrt{2 \left[(1,116)^2 - 1 \right]} = \sqrt{2 \left[1,246 - 1 \right]} = \sqrt{0,492} = 0,701 = 70,1\%$$

$$I_t = I_c \sqrt{1 + \frac{m^2}{2}} = 8 \sqrt{1 + \frac{0,80^2}{2}} = 8 \sqrt{1 + \frac{0,64}{2}} = 8 \sqrt{1,32} = 8 \times 1,149 = 9,19 \text{ A}$$

Modulação de muitos sinais

Na prática, pode ocorrer a modulação de muitos sinais, simultaneamente.

O procedimento para se calcular a potência total irradiada pelo sistema consiste em calcular o índice de modulação total e levá-lo para a eq. (14), da qual a potência total pode ser calculada como antes. Existem dois métodos para se calcular este índice de modulação total (que também não deve exceder a 100%, para que não ocorra distorção)

Modulação de muitos sinais – Método 1

Seja E_1, E_2, E_3 , etc., as voltagens modulantes simultâneas. A voltagem modulante total será igual à raiz quadrada da soma dos quadrados das voltagens individuais, isto é (16)

$$E_t = \sqrt{E_1^2 + E_2^2 + E_3^2 + \dots}$$

dividindo ambos os lados por E_c , temos:

$$\begin{aligned} \frac{E_t}{E_c} &= \frac{\sqrt{E_1^2 + E_2^2 + E_3^2 + \dots}}{E_c} = \sqrt{\frac{E_1^2}{E_c^2} + \frac{E_2^2}{E_c^2} + \frac{E_3^2}{E_c^2} + \dots} \\ \Rightarrow m_t &= \sqrt{m_1^2 + m_2^2 + m_3^2 + \dots} \end{aligned} \quad (17)$$

Modulação de muitos sinais – Método 2

A eq. (14) pode ser reescrita para enfatizar que a potência total de um sinal AM consiste da potência da portadora e da potência da banda lateral. Isso leva a

$$P_t = P_c \left(1 + \frac{m^2}{2} \right) = P_c + \frac{P_c m^2}{2} = P_c + P_{SB}$$

onde P_{SB} é a potência total da banda lateral, dada por (18)

$$P_{SB} = \frac{P_c m^2}{2}$$

A potência da portadora não se altera, mas a potência da banda lateral (incluindo todos os sinais modulantes) será a soma das potências individuais de cada banda lateral, ou seja:

$$\begin{aligned} P_{SB_t} &= P_{SB_1} + P_{SB_2} + P_{SB_3} + \dots \\ \frac{P_c m_t^2}{2} &= \frac{P_c m_1^2}{2} + \frac{P_c m_2^2}{2} + \frac{P_c m_3^2}{2} + \dots \\ m_t^2 &= m_1^2 + m_2^2 + m_3^2 + \dots \end{aligned}$$

Se calcularmos a raiz quadrada nos dois lados, chegaremos a (17)

Exemplo 4

Um transmissor irradia 9kW com portadora não-modulada. Sua potência sobe para 10,125 kW quando a portadora é modulada senoidalmente.

- Calcule o índice de modulação
- Se outro sinal senoidal, correspondente a 40% de modulação, é transmitido simultaneamente, determine a potência total irradiada.

Exemplo 4

$$\frac{m^2}{2} = \frac{P_t}{P_c} - 1 = \frac{10,125}{9} - 1 = 1,125 - 1 = 0,125$$

$$m^2 = 0,125 \times 2 = 0,25$$

$$m = 0,50$$

$$m_t = \sqrt{m_1^2 + m_2^2} = \sqrt{0,5^2 + 0,4^2} = \sqrt{0,25 + 0,16} = \sqrt{0,41} = 0,64$$

$$P_t = P_c \left(1 + \frac{m_t^2}{2} \right) = 9 \left(1 + \frac{0,64^2}{2} \right) = 9 (1 + 0,205) = 10,84 \text{ kW}$$

Exemplo 5

A corrente de uma antena transmissora de rádio-difusão AM, modulada com profundidade de 40%, é de 11A. Ela aumenta para 12A como resultado da modulação simultânea de outro sinal de áudio. Qual o índice de modulação devido a este segundo sinal modulante?

Exemplo 5

$$I_c = \frac{I_t}{\sqrt{1+m^2/2}} = \frac{11}{\sqrt{1+0,4^2/2}} = \frac{11}{\sqrt{1+0,08}} = 10,58A$$

- Usando eq. (16) e lembrando que o índice de modulação é o índice de modulação total, vem que

$$m_t = \sqrt{2 \left[\left(\frac{I_t}{I_c} \right)^2 - 1 \right]} = \sqrt{2 \left[\left(\frac{12}{10,58} \right)^2 - 1 \right]} = \sqrt{2(1,286-1)} = \sqrt{2 \times 0,286} = 0,757$$

De (17) obtemos:

$$m_2 = \sqrt{m_t^2 - m_1^2} = \sqrt{0,757^2 - 0,4^2} = \sqrt{0,573 - 0,16} = \sqrt{0,413} = 0,643$$

Single Side Band: SSB

$$e = E_c \sin(\omega_c t) + \frac{m E_c}{2} \cos(\omega_c - \omega_m)t - \frac{m E_c}{2} \cos(\omega_c + \omega_m)t$$

A eq. (7) mostrou que quando uma portadora é modulada em amplitude por um sinal senoidal, o sinal resultante consiste de três frequências: a da portadora original, a da frequência de banda lateral superior (*upper side band*, USB) e a da freq. De banda lateral inferior (*lower side band*, LSB).

Alguns procedimentos podem ser efetuados para remover ou suprimir componentes do sinal AM. Isso traz vantagens e desvantagens. Podemos suprimir a portadora e/ou uma das bandas laterais.

Fato 1: a componente portadora não contém informação útil

- permanece constante em amplitude e frequência, não dependente do sinal modulante).

Fato 2: as duas bandas laterais são imagens uma da outra

- Cada uma é afetada igualmente por mudanças na frequência de modulação, o que afeta a freq. Da banda lateral.

Conclusão: Toda a informação pode ser recuperada a partir de uma banda lateral: a portadora é supérflua e a outra banda lateral é redundante.

Single Side Band: SSB

A principal razão pelo uso amplo da técnica DSB é a simplicidade dos equipamentos de modulação e demodulação e é a forma usada em rádio-difusão (mudanças radicais nos receptores domésticos seriam necessárias para recepção SSB em larga escala).

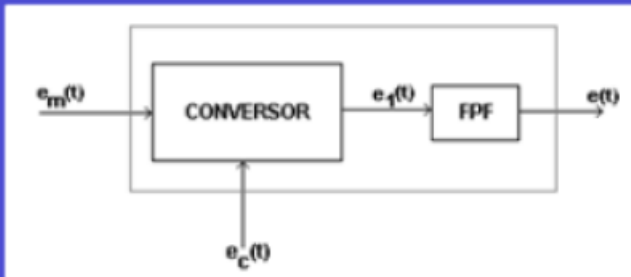
Single Side Band: SSB

Modulação AM-DSB-SC e AM-SSB

Introdução teórica:

A modulação AM-DSB-SC é caracterizada pela supressão da portadora, possuindo a seguinte expressão:

$$e(t) = K \cdot e_m(t) \cdot e_c(t) \Rightarrow \text{ sinal modulado AM-DSB-SC}$$

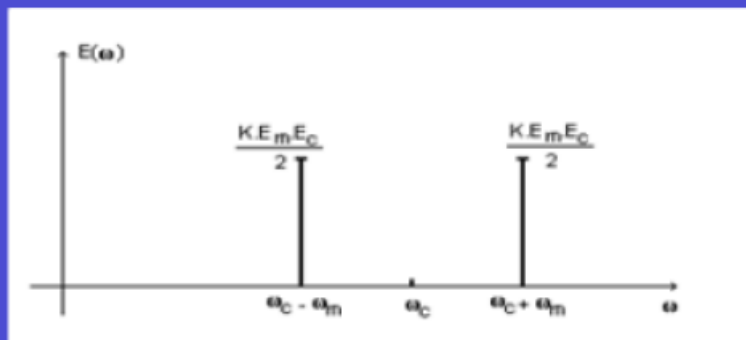


Desenvolvendo $e(t)$, temos:

$$e(t) = K \cdot e_m(t) \cdot e_c(t) = K \cdot E_m \cdot E_c \cdot \cos(\omega_m \cdot t) \cdot \cos(\omega_c \cdot t)$$

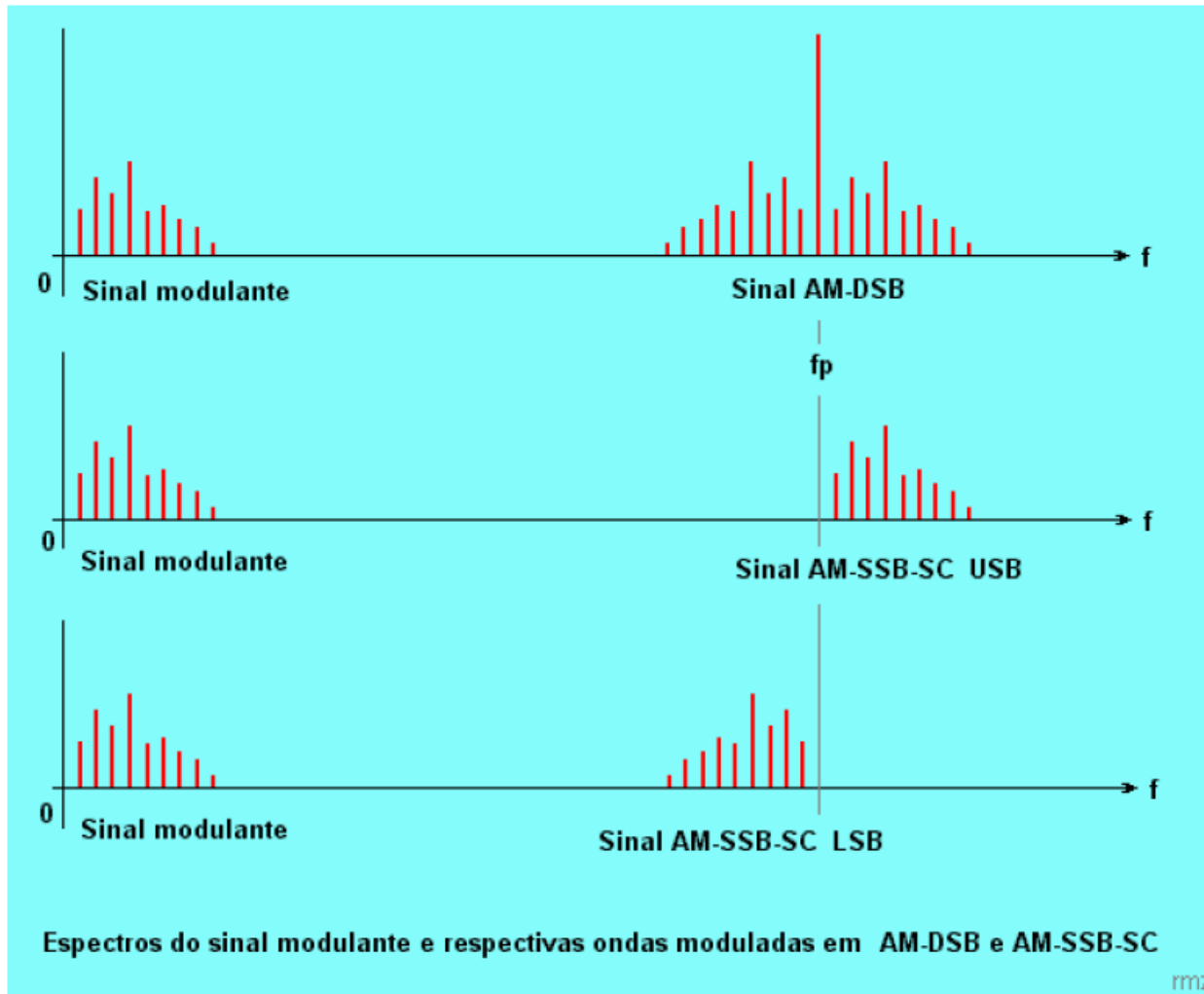
$$e(t) = \frac{K \cdot E_m \cdot E_c}{2} \cdot \cos(\omega_c + \omega_m)t + \frac{K \cdot E_m \cdot E_c}{2} \cdot \cos(\omega_c - \omega_m)t$$

O espectro de frequências do sinal modulado AM-DSB-SC é:



Existem duas raíes e a Portadora Suprimida

Single Side Band: SSB



Single Side Band: SSB

As equações de potência AM estabelecem que a razão entre a potencia total e a potência da portadora é dada por $(1+m^2/2)$.

Se a portadora for suprimida, apenas a potência da banda lateral permanece. Como isso corresponde a $P_c(m^2/2)$, uma economia de $2/3$ é alcançada com 100% de modulação. A economia pode ser maior se a profundidade de modulação diminuir.

Se uma das bandas laterais for removida, a potência restante fica $P_c(m^2/4)$, ou seja, uma economia de 50% sobre o AM com portadora suprimida e de, pelo menos, 83,3% sobre DSB.

Exemplo 6

Calcule a porcentagem de potência economizada quando a portadora e uma banda lateral são suprimidas num sinal AM para uma profundidade de modulação de

- 100%
- 50%

Exemplo 6

100%

$$P_t = P_c \left(1 + \frac{m^2}{2} \right) = P_c \left(1 + \frac{1^2}{2} \right) = 1,5 P_c$$

$$P_{SB} = P_c \frac{m^2}{4} = P_c \frac{1^2}{4} = 0,25 P_c$$

$$\text{Economia} = \frac{1,5 - 0,25}{1,5} = \frac{1,25}{1,5} = 0,833 = 83,3\%$$

50%

$$P_t = P_c \left(1 + \frac{0,5^2}{2} \right) = 1,125 P_c$$

$$P_{SB} = P_c \frac{0,5^2}{4} = 0,0625 P_c$$

$$\text{Economia} = \frac{1,125 - 0,0625}{1,125} = \frac{1,0625}{1,125} = 0,944 = 94,4\%$$