



MAKRON
Books

INTRODUÇÃO

Sistemas de Comunicação

É inegável a importância dos modernos sistemas de comunicação para a economia, a cultura e a ciência, entre outras atividades. Isso decorre da enorme quantidade de informações geradas em locais diferentes daquele onde elas são utilizadas. Informações transitam entre estabelecimentos bancários e comerciais através de sistemas de comunicação espalhados pelo mundo inteiro; programas de rádio e televisão são transmitidos para centenas de milhões de pessoas em todos os continentes, difundindo notícias, cultura e lazer; sinais oriundos de espaçonaves em regiões distantes do sistema solar chegam à Terra trazendo informações que resultam em novas descobertas científicas. Tudo isso, com a velocidade da luz.

Sistemas de Comunicação Genéricos

A Figura 1 mostra a representação gráfica de uma cadeia de comunicação, podendo-se identificar três elementos essenciais: a fonte de informação, o sistema de comunicação e o destino.

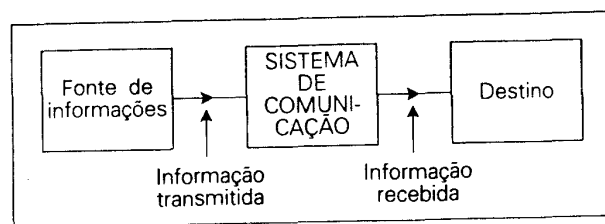


Figura 1 A posição de um sistema de comunicação dentro de uma cadeia de comunicação.

A fonte de informações é, como o nome sugere, a origem da mensagem ou informação transmitida. Essa costuma apresentar-se na forma de sons, imagens ou textos. O destino é onde a informação será utilizada. A finalidade do sistema de comunicação é transportar a informação da fonte até o destino, preservando ao máximo suas características originais.

Elementos de um Sistema de Comunicação

A Figura 2 mostra os elementos que fazem parte de um sistema de comunicação.

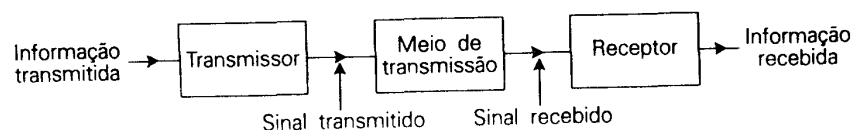


Figura 2 Diagrama em blocos de um sistema de comunicação.

Sistemas de Comunicação

O transmissor tem a finalidade de transformar a informação nele aplicada num sinal adequado para vencer a distância que o separa do receptor. Nos diagramas em blocos, o fluxo do sinal é representado pelas setas.

O meio de transmissão é responsável pelo transporte do sinal do transmissor até o receptor, sendo, com certeza, o elemento que, isoladamente, exerce maior influência sobre o desempenho de um sistema de comunicação, determinando, inclusive, o tipo de transmissor e receptor utilizados.

Ao receptor, finalmente, cabe a tarefa de resgatar a informação presente no sinal recebido, devolvendo-lhe o formato original.

Sistemas de Comunicação por Sinais Elétricos

Os sistemas de comunicação que utilizam sinais elétricos para a transmissão de informações conseguem um excelente desempenho no processamento dos sinais, sendo indicados para comunicação a grandes distâncias. Esses sistemas de comunicação podem ser divididos em dois grandes grupos: os Sistemas Via Cabo e os Sistemas Via Rádio. Como a análise detalhada dos sistemas de comunicação via cabo foge ao escopo desta obra, somente serão apreciadas as características que permitam compará-los com os sistemas via rádio.

Sistemas Via Cabo

O meio de transmissão utilizado nos sistemas de comunicação via cabo é, como o nome sugere, um cabo condutor, chamado de linha de transmissão.

As principais características deste sistema são: confiabilidade excelente, pouca flexibilidade para ampliações que não tenham sido objeto de cuidadoso planejamento, necessitando de grandes investimentos de capital para a implantação da rede de cabos e da central de comutação.

Essas características tornam os sistemas via cabo adequados para comunicação a curta distância, principalmente nas regiões urbanas.

A necessidade de uma linha de transmissão, interligando o transmissor ao receptor, torna impossível a comunicação móvel e é a principal causa dos custos elevados da telefonia nas regiões escassamente povoadas.

Sistemas Via Rádio

Os sistemas de comunicação via rádio utilizam ondas eletromagnéticas como elemento de ligação entre transmissor e receptor. Como essas ondas possuem a propriedade de irradiar-se pelo espaço, dispensando a existência de quaisquer meios físicos para sua transmissão, a implantação de sistemas de comunicação via rádio é grandemente facilitada.

Sistemas de Comunicação Via Rádio

Quando comparado com os sistemas via cabo, os sistemas de comunicação via rádio apresentam as seguintes características: utilizam equipamentos eletrônicos relativamente complexos para o processamento dos sinais necessários à operação do sistema; a confiabilidade é menor e depende das condições de propagação da onda eletromagnética. Em compensação, os custos de implantação são menores para distâncias superiores a algumas dezenas de quilômetros, apresentando ótima flexibilidade para ampliações. Essas características tornam os sistemas via rádio adequados tanto para comunicação a longa distância quanto para comunicação móvel.

A telefonia interurbana a longa distância é um exemplo deste sistema de comunicação.

Configuração do Sistema

Um sistema de comunicação via rádio é composto por duas estações de rádio, pelo menos, sendo uma transmissora e a outra receptora (Figura 3).

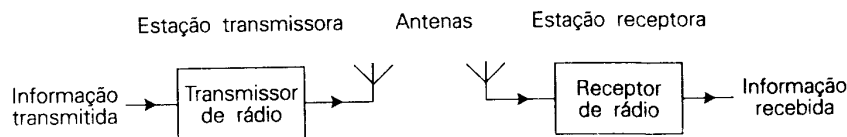


Figura 3 Diagrama em blocos de um sistema de comunicação via rádio.

Cada estação é composta por um equipamento de rádio, uma linha de transmissão e uma antena. A função dos equipamentos de rádio é, no caso do transmissor, gerar sinais de radiofrequência e, no caso do receptor, recebê-los; da linha de transmissão é conduzir o sinal de radiofrequência do transmissor até a antena, ou da antena até o receptor. Finalmente, a função da antena é gerar ou captar ondas eletromagnéticas.

Muitas estações receptoras de radiodifusão, principalmente as de ondas médias, não utilizam antenas externas, nem linha de transmissão. Isso ocorre em função de os receptores utilizarem antenas internas, geralmente de ferrite.

Transdutores, Moduladores e Demoduladores

Para transformar em sinais elétricos as informações que se apresentam originalmente na forma de sons ou imagens, os sistemas de comunicação utilizam transdutores eletroacústicos, eletromecânicos ou optoeletrônicos. O microfone, utilizado para transformar sons em sinais elétricos, e o alto-falante, para fazer a transformação oposta, são exemplos de transdutores eletroacústicos.

Para transformar os sinais provenientes de transdutores em sinais adequados para a transmissão por meio de ondas eletromagnéticas, utilizam-se circuitos moduladores, que são essenciais nos transmissores de rádio.

Os moduladores são circuitos utilizados com a finalidade de incorporar informação a um sinal de alta frequência, controlando-lhe uma de suas características – a amplitude, a frequência ou a fase.

O sinal correspondente à informação e o sinal de alta frequência são chamados, respectivamente, de sinal modulante e portadora, sendo este último proveniente de um circuito oscilador. O sinal de saída do modulador é chamado de sinal modulado.

Tanto a portadora quanto o sinal modulado são denominados sinais de radiofrequência, ou RF, devido ao uso intensivo da modulação nos sistemas de comunicação via rádio.

Para recuperar-se a informação incorporada ao sinal modulado, os receptores de rádio utilizam circuitos demoduladores, que operam segundo os mesmos princípios utilizados nos moduladores (pelo menos quando se tratar de sinais modulados em amplitude).

Para a demodulação, é necessário aplicar-se o sinal modulado, mais a portadora, num demodulador, para que na saída obtenha-se o sinal modulante.

O Canal de Radiofrequência

A antena de uma estação transmissora de rádio irradia para o espaço sinais na forma de ondas eletromagnéticas. Como é grande o número de estações transmissoras existentes, uma antena receptora irá captar inúmeros outros sinais, além do sinal desejado. Portanto, antes de recuperar a informação contida num determinado sinal, é necessário separá-lo. Para que isso possa ser realizado, o sinal precisa possuir alguma característica que permita distingui-lo dos demais. Esta característica é a sua frequência – ou faixa de

A faixa de frequências reservada a um sistema de comunicação é chamada de canal de radiofrequência, ou simplesmente canal. Para que a recepção ocorra sem interferências, é essencial que não existam dois sinais ocupando o mesmo canal, numa mesma região. A aplicação mais conhecida desse conceito está relacionada com os canais de televisão, que ocupam uma faixa de frequências de 6 MHz de largura, cada um.

Para regulamentar a operação dos sistemas de comunicação via rádio, permitindo que os mesmos cumpram seus objetivos com o mínimo de interferência mútua, existem, em todos os países, órgãos incumbidos da tarefa de controlar a ocupação do espectro de radiofrequência. Esses órgãos são, quase todos, membros do CCIR, Comitê Consultivo Internacional de Radiocomunicações, com sede na Suíça.

No Brasil, o órgão responsável por esse serviço é o DENTEL, Departamento Nacional de Telecomunicações. O DENTEL também estabelece as normas técnicas relacionadas com a construção de equipamentos de rádio, principalmente transmissores, determinando-lhes as características, além de expedir as licenças e permissões necessárias para a instalação e operação dos sistemas de comunicação via rádio. O DENTEL atua, ainda, como órgão responsável pela fiscalização do cumprimento das normas e disposições por ele baixadas.

Os Equipamentos de Rádio

Um equipamento de rádio é utilizado com a finalidade de transmitir ou receber mensagens e outras espécies de informações por intermédio de ondas eletromagnéticas, incluindo-se nesta categoria os equipamentos destinados à transmissão e recepção de imagens (instrumentos óticos e antenas estão, naturalmente, excluídos).

Os equipamentos de rádio mais comuns são os transmissores, os receptores e os transceptores, sendo este último uma combinação dos dois primeiros.

Características dos Equipamentos de Rádio

O desempenho de um sistema de comunicação depende das características dos equipamentos que o compõe. No Quadro 1, estão citadas as principais características dos transmissores e receptores de rádio, estando incluída a antena, por ser ela parte integrante de uma estação. A qualidade da comunicação e a distância alcançada pelo sistema são proporcionais à potência do transmissor, ao ganho das antenas e à sensibilidade do receptor, mantidas constantes as outras características.

Quadro 1 Características principais de antenas e equipamentos de rádio.

ANTENAS	TRANSMISSORES	RECEPTORES
frequência de operação ganho diretividade impedância característica tipo de polarização	frequência de operação potência de saída atenuação de harmônicos impedância de saída tipo de modulação	frequência de operação sensibilidade seletividade impedância de entrada tipo de modulação

Transmissores de Rádio

O transmissor de rádio é um equipamento eletrônico especificamente projetado para gerar sinais modulados, com frequência e nível de potência compatíveis com a distância a ser alcançada pela transmissão. Os transmissores devem executar três funções básicas: geração e modulação da portadora; e a amplificação do sinal modulado.

Sistemas de Comunicação

A Figura 4 mostra o diagrama em blocos de um transmissor de rádio básico, contendo os três circuitos essenciais: o oscilador de portadora, o modulador e o amplificador de potência. O oscilador gera a portadora de radiofrequência, necessária ao procedimento de modulação.

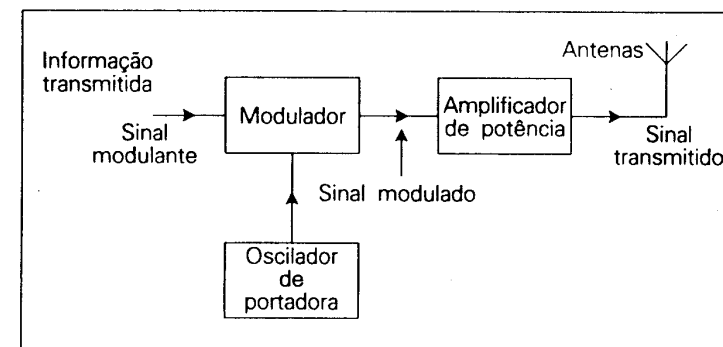


Figura 4 Diagrama em blocos de um transmissor de rádio básico.

No modulador, a informação transmitida é incorporada à portadora, obtendo-se o sinal modulado, ainda em baixo nível. Antes de ir para a antena, o sinal modulado precisa ser aplicado ao amplificador de potência, de onde sai com nível suficiente para ser irradiado pela antena.

Receptores de Rádio

O receptor de rádio é um equipamento eletrônico cuja finalidade é a recepção de sinais modulados de radiofrequência. Isso exige que os receptores de rádio possuam, pelo menos, duas características: seletividade e sensibilidade.

A seletividade é a capacidade de discriminar sinais de diferentes frequências, sendo conseguida pelo uso de filtros.

A sensibilidade, que é a capacidade de operar com sinais de pequena intensidade, é conseguida pelo uso de amplificadores.

Além de selecionar e amplificar o sinal, os receptores devem proceder sua demodulação. Para cumprir essas funções, os receptores precisam utilizar diversos circuitos diferentes. Um receptor básico, contudo, pode ser feito a partir de apenas dois circuitos: um amplificador sintonizado – que é um circuito composto por amplificador e filtros – e um demodulador, como mostrado na Figura 5.

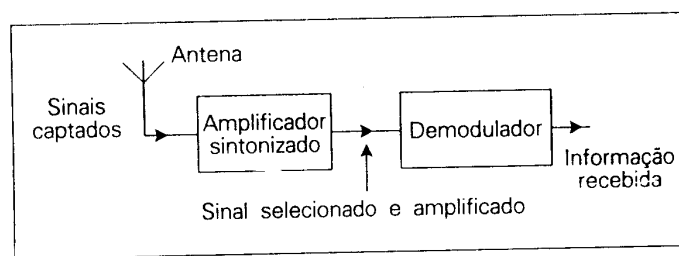


Figura 5 Diagrama em blocos de um receptor de rádio básico.

Características e Aplicações dos Sistemas Via Rádio

Os sistemas de comunicação via rádio são utilizados, basicamente, para a transmissão em fonia, televisão ou telegrafia.

A fonia é utilizada para transmitir sons, como a voz e a música; a televisão é utilizada para a transmissão de imagens; e a telegrafia, para a transmissão de textos ou dados.

As estações de rádio podem ser fixas, móveis ou portáteis. As estações fixas são instaladas em prédios ou casas, sendo alimentadas, na maioria das vezes, pela rede de energia elétrica.

As móveis são instaladas em veículos, embarcações, aeronaves, espaçonaves ou satélites, sendo alimentadas pelo sistema elétrico do veículo.

As portáteis são aquelas transportadas pelo operador e utilizam baterias internas para sua alimentação.

São incontáveis as aplicações dos sistemas de comunicações via rádio, exigindo, cada uma, equipamentos com características apropriadas.

Dentre as muitas aplicações existentes, podem-se destacar as seguintes: a radiodifusão, a radiocomunicação, o radioamadorismo, o radiocontrole e a radiossinalização.

A radiodifusão destina-se ao entretenimento. Um único transmissor gera sinais que são captados por muitos receptores. Para reduzir os custos, com o objetivo de tornar mais popular a radiodifusão, os receptores são simples e econômicos, tendo, portanto, uma sensibilidade relativamente baixa. Para compensar a falta de sensibilidade dos receptores, a potência de transmissão precisa ser bastante elevada, podendo superar a marca dos 100 kW.

A finalidade da radiocomunicação e do radioamadorismo é a transmissão de mensagens, exigindo, por isso, comunicação bidirecional. Assim, cada estação precisa estar equipada com um transmissor e um receptor (ou com um transceptor, para substituir a ambos). A potência de transmissão raramente excede 100 W, sendo os receptores mais caros e complexos do que os destinados à radiodifusão, devido à maior sensibilidade e seletividade exigidas.

O radiocontrole destina-se ao comando à distância de aparelhos. Os equipamentos utilizados são de peso, potência e dimensões reduzidas, sendo o sinal modulante obtido internamente do circuito de controle.

A radiossinalização é utilizada para fins científicos e destina-se à localização de veículos, objetos, pessoas ou animais, tendo os equipamentos características semelhantes aos utilizados para radiocontrole.

Distorção, Ruído e Interferência

Num sistema de comunicação, a informação recebida deve ser, idealmente, uma cópia fiel da informação transmitida. Contudo, no processo de transmissão, o sinal pode ser contaminado por distorções, ruídos e interferências, chegando alterado ao seu destino.

A distorção é, geralmente, uma deformação introduzida no sinal devido à falta de linearidade da curva característica de um dispositivo eletrônico, como um transistor, diodo ou transformador. A distorção pode ser causada, também, pela variação do ganho dos circuitos em função da frequência do sinal. Nesse caso, tem-se a distorção linear.

O ruído é uma perturbação introduzida por uma fonte qualquer, podendo ser interna ou externa ao circuito. A quantidade de distorção e ruído gerados pelo equipamento eletrônico podem ser controladas mediante um cuidadoso projeto dos circuitos. Como o grau de contaminação pelo ruído depende do nível do sinal, o uso de potências elevadas na transmissão e a redução da distância entre as estações, sempre que possíveis, ajudam a reduzir o problema.

A interferência é uma perturbação causada, quase sempre, por uma outra emissão de rádio, no mesmo canal do sinal desejado ou num canal adjacente. Ela pode ser reduzida – quando a causa for um sinal de frequência próxima – pelo aumento da seletividade e da estabilidade de frequência dos equipamentos utilizados.

Um plano eficiente de distribuição dos canais de RF, tendo em vista a região coberta pelo sistema de comunicação, a potência e o período de funcionamento das estações transmissoras e o tipo de antenas utilizadas, também contribui para minimizar o problema.

Uma outra fonte de interferências são as escovas das máquinas elétricas e as lâmpadas de descarga gasosa. Ambos geram grande quantidade de ruídos, principalmente nas frequências mais baixas. Neste caso, a interferência precisa ser combatida diretamente na fonte, mediante a utilização de filtros de linha, para a obtenção de resultados satisfatórios.

Questionário

- 1) Quantos e quais são os elementos essenciais de uma cadeia de comunicação?
- 2) O que se entende por fonte de informação?
- 3) **Quais os elementos que fazem parte de um**

- 4) Descreva a finalidade de cada um de seus componentes.
- 5) Quais são os sistemas de comunicação por sinais elétricos?
- 6) O que é um sistema via cabo?
- 7) Cite as características do sistema da questão anterior.
- 8) Qual o elemento de ligação entre transmissor e receptor em um sistema via rádio?
- 9) Cite algumas aplicações dos sistemas de comunicação via rádio.
- 10) Quais as características do sistema via rádio?
- 11) Desenhe o diagrama em blocos do sistema via rádio.
- 12) Como é composto um equipamento de rádio? E qual é a sua função?
- 13) O que é utilizado para transformar em sinais elétricos as informações que se apresentam na forma de sons ou imagens?
- 14) Qual a finalidade dos circuitos moduladores?
- 15) Defina moduladores.
- 16) O que são portadora e sinal modulado?
- 17) Qual a aplicação dos circuitos demoduladores?
- 18) O que é um canal de radiofrequência?
- 19) Quais os órgãos que controlam a ocupação do espectro de radiofrequência?
- 20) E, no Brasil, qual é o órgão responsável?
- 21) Qual a finalidade de um equipamento de rádio?
- 22) Quais as características dos equipamentos de rádio?
- 23) O que se entende por transmissor de rádio? Cite suas funções básicas.
- 24) Quantos e quais são os circuitos essenciais de um transmissor de rádio básico?
- 25) Qual a finalidade de um receptor?
- 26) Quais são as características de um receptor? Defina-as.
- 27) Desenhe o diagrama em blocos de um receptor de rádio básico.

- 28) Basicamente, no que são utilizados os sistemas de comunicação via rádio? Explique cada uma delas.
- 29) A que se destina a radiodifusão?
- 30) Qual a finalidade da radiocomunicação?
- 31) Que é distorção?
- 32) Quais os tipos de distorção existentes?
- 33) O que é ruído?
- 34) O que é interferência?
- 35) Cite algumas fontes de interferência.



MAKRON
Books

Propagação de Ondas Eletromagnéticas

A comunicação através do rádio está relacionada com a existência de uma onda eletromagnética (OEM) interligando uma estação transmissora a uma ou mais estações receptoras (Figura 1). A estação transmissora é normalmente composta por um transmissor (Tx) que gera a energia de radiofrequência (RF), uma linha de transmissão (LT) que serve para conduzir a energia de RF produzida pelo transmissor e uma antena que transforma essa energia numa onda eletromagnética. A estação receptora é composta por uma antena, uma linha de transmissão e um receptor. A finalidade da antena receptora é extrair uma parte da energia da OEM e transformá-la em energia de RF que é conduzida, através da linha de transmissão, até o receptor, onde é devidamente processada.

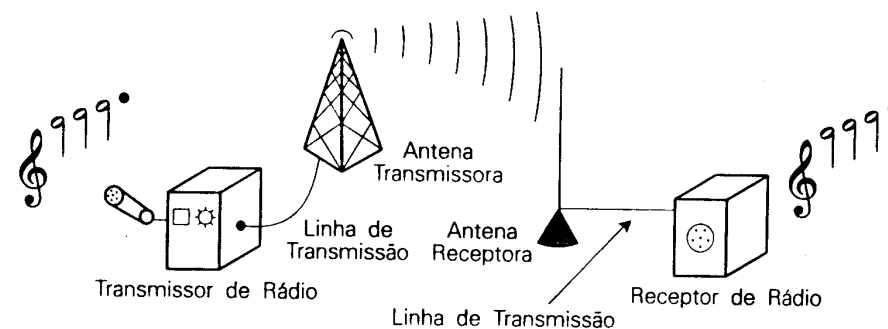


Figura 1 Diagrama básico de um sistema de comunicação via rádio.

Uma OEM é composta por um campo elétrico \vec{E} e um campo magnético \vec{H} perpendiculares entre si e ao sentido de propagação \vec{P} (Figura 2).

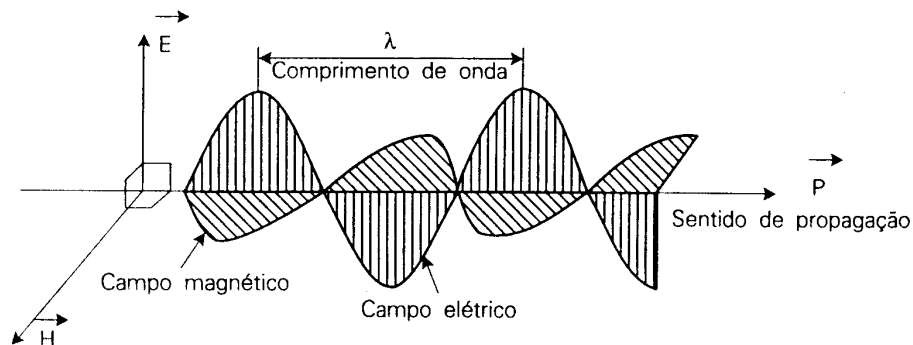


Figura 2 Componentes de uma onda eletromagnética polarizada verticalmente.

A OEM propaga-se no vácuo à velocidade da luz. Duas cristas consecutivas do campo elétrico estarão separadas por uma distância igual ao seu comprimento de onda, dado por:

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

Equação 1

λ (lambda) = comprimento de onda, em m

c = velocidade da luz, igual a $3 \cdot 10^8$ m/s

f = frequência da OEM, em Hz

A direção do campo elétrico de uma OEM é paralela ao eixo longitudinal do elemento irradiante da antena e determina sua polarização (Figura 3).

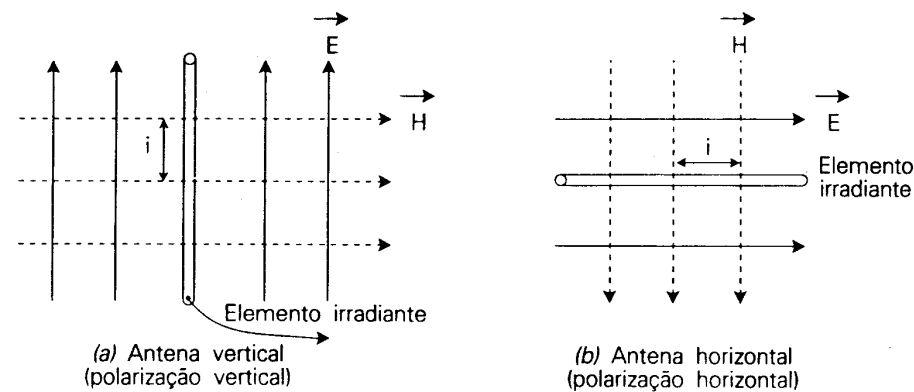


Figura 3 Polarização de uma onda eletromagnética.

No espaço, as OEM espalham-se uniformemente em todas as direções a partir do ponto de origem, fazendo com que a densidade de potência seja inversamente proporcional ao quadrado da distância (Figura 4).

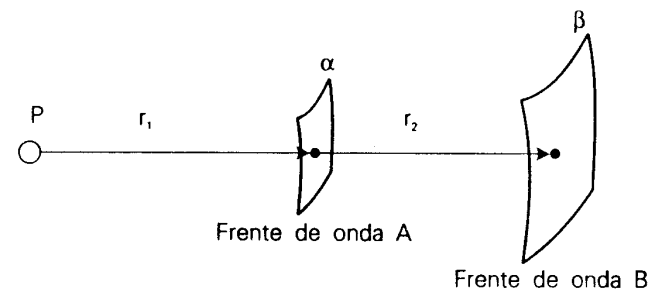


Figura 4 Frentes de ondas esféricas irradiadas por uma fonte isotrópica.

O enfraquecimento da OEM, nessas condições, é um fenômeno puramente geométrico e sua intensidade é dada por:

$$P = \frac{P_t}{4 \pi r^2}$$

Equação 2

onde: P : é a densidade de potência à distância r de uma fonte isotrópica, em W/m^2 ;
 r : distância entre a origem e a frente de onda, em m;
 P_t : potência transmitida, em W.

Exemplo: Calcular a densidade de potência a 10 km de uma fonte isotrópica de 10 W.

Solução:

$$P = \frac{10}{4 \cdot \pi \cdot (10^4)^2} = 7,96 \text{ nW/m}^2$$

Observação: uma fonte isotrópica é aquela que irradia uniformemente em todas as direções.

Outra quantidade bastante relacionada com as OEM é intensidade de campo, dada por:

$$\vec{E} = \frac{\sqrt{30P_t}}{r} \quad \text{Equação 3}$$

onde: \vec{E} : intensidade do campo elétrico, em V/m;
 P_t : potência irradiada por uma fonte isotrópica, em W
 r : distância entre a origem e a frente de onda.

Exemplo: Determinar a intensidade de campo a 10 km de uma fonte isotrópica de 10 W.

Solução:

$$\vec{E} = \frac{\sqrt{30 \cdot 10}}{10^4} = 1,73 \text{ mV/m}$$

Da mesma maneira que no circuito elétrico, a impedância é dada por E^2/P , pode-se obter a impedância característica de um meio de propagação (no exemplo, o vácuo) através de:

$$Z = \frac{E^2}{P} = 30 \frac{P_t}{r^2} + \frac{P_t}{4 \pi r^2} = \frac{120 \cdot P_t \cdot \pi \cdot r^2}{P_t \cdot r^2} = 120 \pi \quad Z = 377 \Omega$$

Observação: a impedância característica do meio de propagação pode também ser achada por:

$$Z = \sqrt{\mu \cdot \epsilon} \quad \text{Equação 4}$$

onde: μ = permeabilidade do meio = $1,26 \cdot 10^{-6}$ H/m no vácuo

ϵ = permissividade elétrica do meio = $8,85 \cdot 10^{-12}$ F/m, no vácuo.

Exemplo: Determinar a impedância característica do polietileno, sabendo-se que sua constante dielétrica é igual a 2,3.

$$Z = \sqrt{\frac{1,26 \cdot 10^{-6}}{2,3 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12}}} = 249 \Omega$$

Quando uma OEM se propaga na superfície terrestre, ou seja, em condições diversas àquelas do espaço livre, percebe-se a ocorrência de reflexão, refração e difração (Figura 5), de forma semelhante ao que ocorre nas ondas de luz, descontadas as diferenças de comprimento de onda.

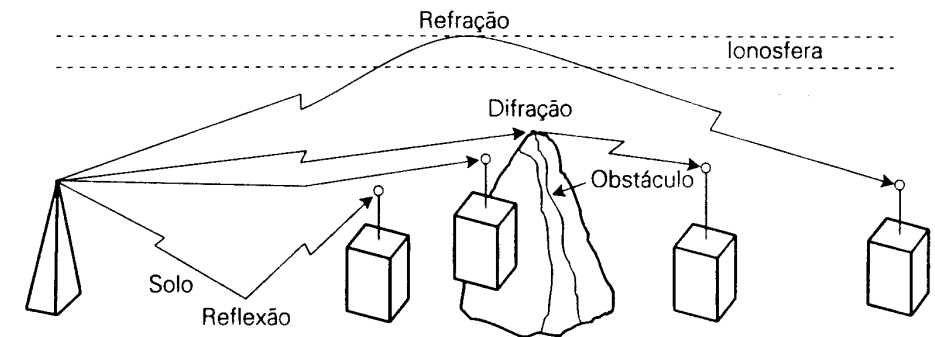


Figura 5 O fenômeno da reflexão, refração e difração de uma OEM.

Como no caso das ondas luminosas, a reflexão depende da existência de uma superfície condutora. Também é importante que o vetor do campo elétrico da OEM seja perpendicular a essa superfície. A relação entre a intensidade da onda refletida e da onda incidente é chamada de "coeficiente de reflexão" e varia de zero, para isolantes, até 1, para condutores perfeitos.

Em se tratando de ondas de rádio, a reflexão mais comum ocorre no solo, nos edifícios e montanhas.

A refração ocorre quando da passagem da OEM pela região limítrofe entre dois meios, com constantes dielétricas diversas e num ângulo diferente da normal (Figura 6). É um fenômeno amplamente aproveitado na comunicação em ondas curtas, onde ocorre

a chamada reflexão ionosférica, causada pela variação da densidade da camada ionosférica (mínima na região limite e máxima na região central).

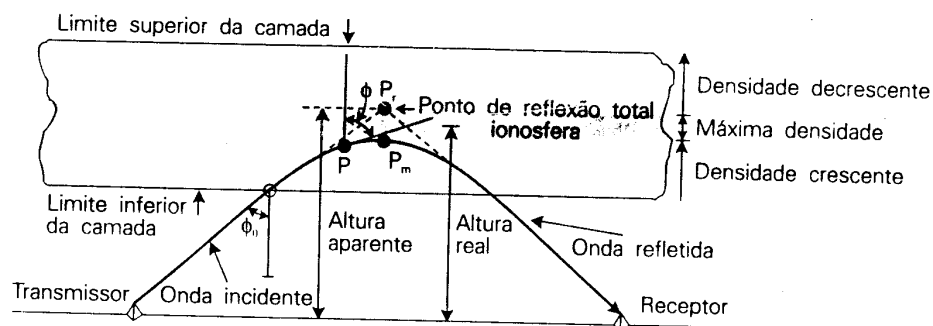


Figura 6 Refração de uma OEM na ionosfera, causando o aparecimento de um raio refletido.

A difração é um fenômeno que pode ser explicado pelo uso do "princípio de Huygens": cada frente de onda equivale a uma coleção de radiadores infinitesimais, radiando para frente ondas esféricas (Figura 7).

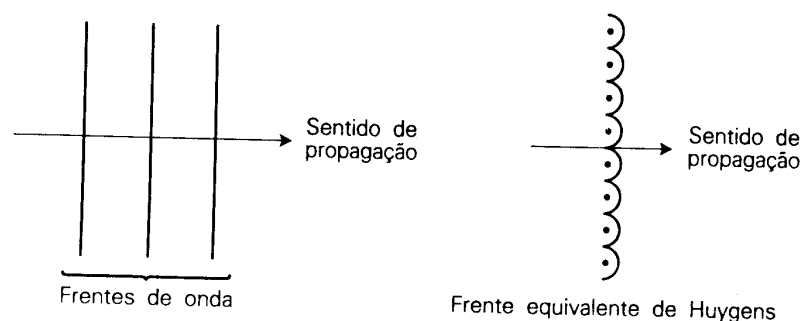


Figura 7 Princípio de Huygens.

De acordo com esse princípio, quando as frentes de onda atingem um obstáculo de dimensões comparáveis (ou menores) que seu comprimento de onda, elas o contornam. Por isso, a uma certa distância atrás do obstáculo é possível a captação dos sinais de rádio (Figura 8).

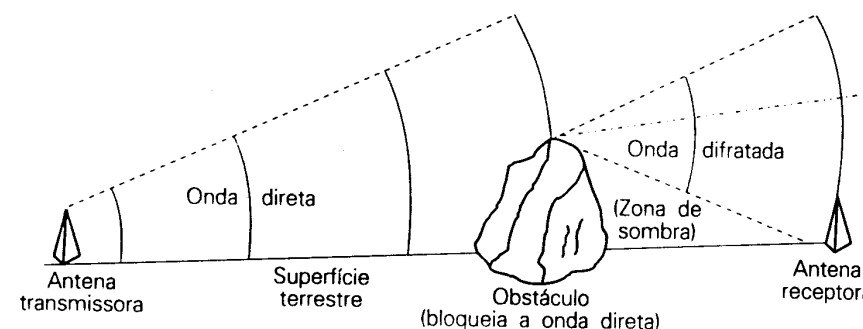


Figura 8 Difração da onda de rádio por um obstáculo.

A difração, por sua natureza, é útil na propagação de ondas médias e longas.

A Propagação das Ondas de Rádio

A propagação das ondas eletromagnéticas nas proximidades do solo dependem da frequência e das características do percurso. As Tabelas 1 e 2 mostram o resumo das principais características das OEM para diversas faixas de frequência.

Tabela 1 Classificação das ondas de rádio.

SIGLA	FREQUÊNCIAS	ONDAS	FAIXAS DE FREQUÊNCIAS
VLF	muito baixas	muito longas	3 kHz a 30 kHz
LF	baixas	longas	30 kHz a 300 kHz
MF	médias	médias	300 kHz a 3 MHz
HF	elevadas	curtas	3 MHz a 30 MHz
VHF	muito elevadas	—	30 MHz a 300 MHz
UHF	ultra-elevadas	—	300 MHz a 3 GHz
SHF	superelevadas	microondas	3 GHz a 30 GHz
EHF	extremamente elevadas	microondas	30 GHz a 300 GHz

Tabela 2 Características principais das ondas de rádio.

<i>FREQUÊNCIA</i>	<i>MODO DE PROPAGAÇÃO</i>	<i>ALCANCE</i>	<i>VARIAÇÃO</i>
menor do que 3 MHz (VLF, LF, MF)	Ondas Terrestres (é usada exclusivamente à polarização vertical)	Inversamente proporcional à frequência do sinal. Necessita potência elevada	Pequena
entre 3 MHz e 30 MHz (HF)	Ondas Ionosféricas e Ondas Diretas (nas frequências mais elevadas)	Proporcional à frequência	Depende da hora do dia e da estação do ano
acima de 30 MHz (VHF, UHF, SHF e EHF)	Ondas Diretas	Depende da altura das antenas	Muito Pequena

As OEM, principalmente as das faixas de VHF e superiores, propagam-se em linha reta, sendo chamadas, por essa razão, de ondas diretas, espaciais ou troposféricas.

Frequências inferiores a 3 MHz propagam-se acompanhando a curvatura da terra. Por isso são chamadas de ondas de superfície ou terrestres. Esse tipo de onda é responsável, por exemplo, pela recepção dos sinais das emissoras de ondas médias.

As ondas de rádio da faixa de HF são refletidas pelas camadas ionizadas da atmosfera. Por isso, são chamadas de ondas ionosféricas ou indiretas.

Propagação das Ondas de Superfície

Quando a propagação se faz sobre um terreno de alta condutividade, ou sobre a superfície do mar, a atenuação da onda terrestre é pequena, permitindo uma comunicação eficiente e confiável, principalmente se a potência transmitida for elevada. Para distâncias de até 1000 km, a intensidade de campo de uma onda de superfície é relativamente estável.

Propagação das Ondas Ionosféricas

Existem diversas camadas ionizadas localizadas a diferentes altitudes. O principal efeito dessas camadas é refletir de volta para a terra as ondas de rádio da faixa de HF, permitindo um alcance mundial para esse tipo de onda.

A Camada Ionosférica

A ionosfera é a camada superior da atmosfera e está localizada a altitudes superiores a 70 km, em média. Sua origem está relacionada com a radiação solar, principalmente a radiação ultravioleta e as partículas alfa e beta do sol. Como nas altitudes elevadas a densidade molecular do gás atmosférico é muito baixa, os elétrons arrancados dos átomos encontram dificuldades para a recombinação. Quanto maior a altitude, tanto menor a possibilidade de recombinação. Por isso, as camadas mais elevadas permanecem ionizadas durante toda a noite. O mesmo não acontece com as camadas inferiores da ionosfera, porque ali a densidade é elevada o suficiente para que o tempo de recombinação não ultrapasse alguns minutos. A Tabela 3 mostra as características mais importantes das diversas camadas ionosféricas.

Tabela 3 Características das camadas ionosféricas.

<i>CAMADA</i>	<i>ALTITUDE/ESPESSURA (km)</i>	<i>HORÁRIO</i>
D	70/10	dia
E	100/25	dia
F ₁	180/20	dia
F ₂	200 a 400/até 200	dia
F	280	noite

Mecanismo de Reflexão

Quando uma onda eletromagnética atinge uma camada ionizada, os elétrons desta camada, por serem mais leves, são colocados em movimento. Se a densidade da camada for

elevada ou o comprimento da onda for muito longo, o elétron poderá se chocar com uma molécula de gás. No choque, a energia absorvida pelo elétron é liberada de forma aleatória e, portanto, sem contribuir para o mecanismo de reflexão. Contudo, se a densidade da camada e o comprimento de onda forem menores, a possibilidade de choque é pequena e a energia absorvida pelo elétron é devolvida na forma de uma onda eletromagnética, que poderá ser recebida na superfície da terra. Finalmente, se a densidade da camada ionosférica for muito pequena, o número de elétrons livres será insuficiente para refletir a onda eletromagnética, que se perderá no espaço, não retornando à terra.

Frequência Crítica da Camada

A "frequência crítica" (f_c) para uma dada camada é a maior frequência que pode ser devolvida para a terra pela camada, para um raio de incidência normal (Figura 9).

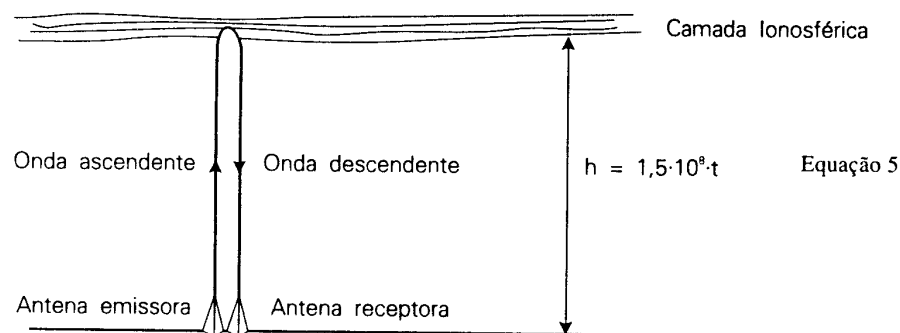


Figura 9 Medição da altura da camada ionizada. "t" é o período de tempo entre a emissão e a recepção da onda de rádio.

Máxima Frequência Utilizável (MUF)

É a maior frequência que pode ser refletida pela camada para determinado ângulo de incidência da onda eletromagnética. A MUF geralmente não ultrapassa 35 MHz e é dada pela equação abaixo:

$$MUF = \frac{\text{frequência crítica}}{\cos \theta} \quad \text{Equação 6}$$

Desvanecimento ou Fading

É uma flutuação que ocorre na intensidade de uma OEM devido, principalmente, à interferência entre duas ondas que incidem sobre a antena receptora. É um fenômeno comum na recepção de ondas curtas. Pode ser evitado pelo uso de duas ou mais antenas separadas de um comprimento de onda, pelo menos.

Ondas Diretas

As ondas diretas viajam em linha reta e seu alcance é limitado ao horizonte ótico. Na verdade, o horizonte de rádio é 4/3 mais distante que o horizonte ótico (Figura 10).

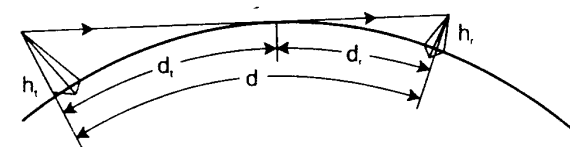


Figura 10 Horizonte de rádio para ondas diretas.

A máxima distância de transmissão de uma antena, ou seja, seu horizonte de rádio é dado pela fórmula:

$$d_t = 4 \sqrt{h_t} \quad \text{Equação 7}$$

onde:

h_t : altura da antena transmissora em metros

d_t : distância da transmissão em km

A mesma fórmula aplica-se também à antena receptora. A distância entre as antenas transmissoras e receptoras é dada por:

$$d = 4 \sqrt{h_t} + 4 \sqrt{h_r} \text{ (km)} \quad \text{Equação 8}$$

onde:

h_r : altura da antena receptora em metros

Exemplo: Qual a distância máxima entre a antena transmissora e a receptora para $h_t = 50$ m e $h_r = 20$ m.

Aplicando-se a fórmula, obtém-se:

$$d = 4 \sqrt{50} + 4 \sqrt{20} = 28,3 + 17,9$$

$$d = 46,2 \text{ km}$$

O Alcance das Emissões

O alcance das transmissões de rádio está relacionado, principalmente, com a frequência da onda eletromagnética, a potência empregada na transmissão e o tipo de antena empregada.

Um alcance mundial pode ser conseguido pelo emprego de sinais de ondas curtas, ou HF, cujas frequências estão compreendidas entre 3 e 30 MHz. Quanto maior a frequência utilizada, dentro desta faixa, maior é o alcance dos sinais. A Tabela 4 mostra o alcance aproximado das emissões em função da frequência. Os valores ótimos variam com as estações do ano e com os ciclos de manchas solares de 11 anos (ciclo de Wolf). Em todo caso, a frequência ótima de trabalho (FOF) está em torno de 85% da MUF e a mínima frequência utilizável (LUF) está em torno de 60% da MUF.

Tabela 4 Alcance das emissões em ondas curtas em função da frequência, para transmissões em SSB, com potência de 100 W_{ppp}.

DISTÂNCIA (km)	FREQUÊNCIA (MHz)	
	DIA	NOITE
100 a 200	3 a 4	3 a 4
200 a 300	4 a 5	3 a 5
300 a 500	5 a 7	3 a 6
500 a 700	7 a 9	3 a 7
700 a 1000	8 a 12	4 a 8
1000 a 2000	10 a 15	5 a 9
2000 a 4000	13 a 18	7 a 12
4000 a 10000	14 a 22	10 a 14
8000 a 20000	17 a 30	13 a 17

A potência utilizada nas transmissões em ondas curtas deve ser suficiente (em torno de 100 W), para que se possa superar o ruído elétrico, que costuma ser elevado, principalmente nas frequências mais baixas (em torno de 3 MHz), e para compensar a falta de diretividade das antenas utilizadas (nas frequências inferiores a 10 MHz, pelo menos).

Os sinais das faixas de VHF, UHF e SHF, propagam-se exclusivamente através de ondas direta, e constituem os sistemas de enlace por visibilidade, onde uma antena deve "ver" a outra. A potência de emissão pode ser pequena, de apenas alguns watts, em virtude de reduzida intensidade de ruído presente nas frequências superiores a 30 MHz, e ao ganho das antenas que, devido a suas dimensões mais reduzidas, facilita a utilização de elementos diretores, o que concentra a energia irradiada pela antena numa direção definida. O alcance confiável não costuma ultrapassar 40 km.

Comunicações Via Satélite

A ionosfera não permite que se obtenha confiabilidade total das comunicações a longa distância na faixa de HF. Embora a faixa de VLF permita enlaces seguros a longa distância, a largura da faixa disponível é insuficiente para as atuais necessidades do homem. Por outro lado, as comunicações em VHF, UHF e SHF estão limitadas a distâncias de poucas dezenas de quilômetros, se não levarmos em conta o uso da técnica da tropodifusão. Distâncias maiores obrigam o uso de estações repetidoras de sinal. Como a distância média entre cada repetidora não ultrapassa 40 km, a comunicação entre dois centros separados 400 km obriga o uso de, pelo menos, 9 repetidoras (Figura 11). Modernamente, prefere-se a utilização de um satélite geoestacionário orbitando a terra a aproximadamente 36.000 km de altitude (Figura 12).

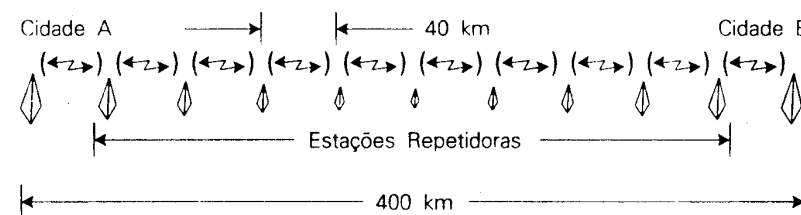


Figura 11 Enlace de radiovisibilidade entre duas cidades afastadas, via repetidora.

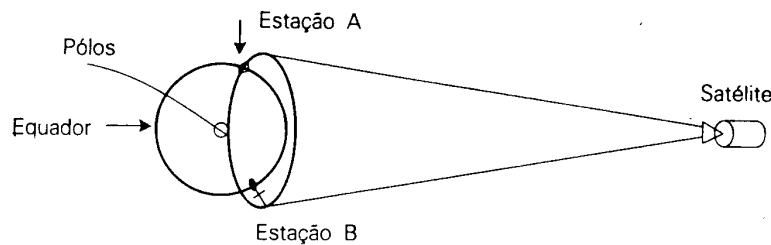


Figura 12 Enlace via satélite.

Nesta altitude o tempo de translação do satélite é de 24 horas, ou seja, coincide com o período de rotação da terra, fazendo com que o satélite permaneça sempre sobre um determinado ponto do equador. Devido à grande altitude do mesmo, é possível afastar as antenas das estações rastreadoras em até aproximadamente 1/3 da circunferência terrestre, ou quase 15.000 km de distância entre elas.

A faixa de frequência apropriada para esse tipo de comunicação deve ser suficientemente elevada para que as ondas de rádio “perforem” as camadas ionosféricas. Isso fixa o limite inferior de frequência em torno de 100 MHz. No outro extremo, contudo, a frequência não poderá ser tão elevada a ponto de haver absorção atmosférica. Isso fixa o limite superior de frequências em, talvez, 12 GHz.

As frequências de operação típicas ficam em volta de 4 e 6 GHz. A largura da faixa típica excede 500 MHz. A potência de saída do satélite é equivalente a mais de 100 W, considerando o ganho de sua antena.

Questionário

- 1) Desenhe o diagrama de um sistema de comunicação via rádio.
- 2) Qual a finalidade das antenas transmissoras e receptoras?
- 3) Qual a composição de uma onda eletromagnética?
- 4) Desenhe a representação de uma onda eletromagnética.
- 5) Qual a velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas no vácuo?
- 6) Como se calcula o comprimento de uma onda eletromagnética?

- 7) O que determina a polarização de uma onda eletromagnética?
- 8) Como varia a densidade de potência de uma onda eletromagnética em relação à distância da fonte?
- 9) O que é uma fonte ou irradiador isotrópico?
- 10) O que significa a impedância característica do meio?
- 11) Quais os fenômenos que afetam a propagação de uma onda eletromagnética?
- 12) O que significa “coeficiente de reflexão” e como ele varia, de acordo com o tipo de material refletor?
- 13) O que é a refração e quais são as suas causas mais comuns?
- 14) Qual o fenômeno de propagação que possibilita a recepção de ondas eletromagnéticas atrás de obstáculos?
- 15) Forneça a classificação das ondas de rádio de acordo com a frequência.
- 16) Quais as principais características das ondas de rádio, de acordo com a sua faixa de frequência?
- 17) Classifique as ondas de rádio segundo o modo de propagação.
- 18) Quais as características das ondas de superfície?
- 19) Qual a faixa de frequência que mais é beneficiada pela propagação de ondas ionosféricas?
- 20) Descreva a constituição da ionosfera, sua origem e localização.
- 21) Por que as camadas superiores da ionosfera mantêm a sua ionização durante a noite?
- 22) Descreva os mecanismos de reflexão ionosférica para ondas eletromagnéticas de diversos comprimentos.
- 23) Qual o efeito da densidade da camada ionizada sobre a reflexão de ondas eletromagnéticas de diferentes frequências?
- 24) O que é a frequência crítica de uma camada ionosférica?
- 25) O que significa a máxima frequência utilizável de uma camada ionosférica?
- 26) O que é o desvanecimento de uma onda eletromagnética e quais as suas causas?

- 27) O que são ondas diretas?
- 28) Qual a relação existente entre a distância do horizonte de rádio e o horizonte ótico?
- 29) Quais os fatores que limitam o alcance das transmissões de rádio nas faixas de VHF, UHF e SHF?
- 30) Qual a distância máxima típica entre duas estações repetidoras de rádio que operam nas faixas de VHF, UHF e SHF?
- 31) Quais os limites de frequência adequados para as comunicações via satélite?
- 32) Qual a altitude de operação de um satélite de comunicações síncrono e qual a distância máxima entre duas estações terrestres de comunicações via satélite?
- 33) Quais as características dos sinais gerados por um satélite de comunicações?
- 34) Quais os fatores que determinam o alcance das emissões de rádio?
- 35) Qual a potência utilizada para a comunicação em ondas curtas?
- 36) Qual a faixa de frequência apropriada para a comunicação à distância de 600 km, durante o dia?

Problemas Propostos

- 1) Calcular o comprimento de uma onda eletromagnética de frequência igual a 4,105 MHz?
- 2) Calcular a densidade de potência de uma onda direta gerada por uma antena isotrópica alimentada por uma potência de transmissão de 1 W, numa distância de 3 km da fonte irradiadora.
- 3) Calcular a intensidade de campo, para os dados da questão anterior.
- 4) Sabendo-se que a frequência crítica de uma camada ionosférica é de 8 MHz, calcular a MUF para um ângulo de incidência de 70°.
- 5) Com relação ao problema anterior, determinar a frequência ótima de trabalho (FOT) e a mínima frequência utilizável (LUF).



MAKRON
Books

Modulação em Amplitude

Um sistema de comunicação existe para transmitir uma mensagem. Essa mensagem é proveniente de alguma fonte de informação. Para poder ser transmitida, essa mensagem deve estar na forma de sinais elétricos. Os sinais tipicamente utilizados como fontes de informação são os provenientes de interruptores (no caso da transmissão telegráfica), microfones e câmaras de televisão.

Para transmissão eficiente de informações através de ondas eletromagnéticas, é necessário algum tipo de codificação ou modulação. A codificação é utilizada na transmissão de informações que podem assumir apenas estados discretos, como, por exemplo, a transmissão telegráfica. A modulação é empregada principalmente quando a fonte de informação produz um sinal continuamente variável, como a transmissão radiofônica.

O motivo que obriga o uso da modulação é a impossibilidade de transformar-se a corrente elétrica, produzida pelo sinal, numa onda eletromagnética com características apropriadas para comunicação a longa distância.

Para que um sinal seja irradiado, é necessário que o comprimento da antena emissora seja da mesma ordem de grandeza do comprimento de onda da onda eletromagnética. Como o comprimento de onda é dado por $\lambda = c/f$, um sinal de frequência igual a 300 Hz (a frequência mais baixa necessária à transmissão da voz humana) exigiria uma antena de aproximadamente 500 km de extensão, instalada a igual altura. Como essas dimensões são, naturalmente, exageradas para as finalidades práticas, torna-se obrigatória a elevação da frequência do sinal emitido. Isso é conseguido através da técnica da modulação.

Modulação: é o processo de se variar alguma das características de uma onda senoidal de alta frequência, de acordo com o valor instantâneo do sinal a ser transmitido.

O sinal de alta frequência é chamado de *portadora*, enquanto o sinal a ser transmitido é chamado de *sinal modulador* ou *modulante*.

Para que a modulação se processe de forma correta, é importante que a frequência da portadora seja muito maior que a frequência do sinal modulante.

Modulação em Amplitude

Modulação em amplitude consiste em variar-se a tensão de saída de uma fonte de radiofrequência de acordo com a tensão instantânea do sinal modulador

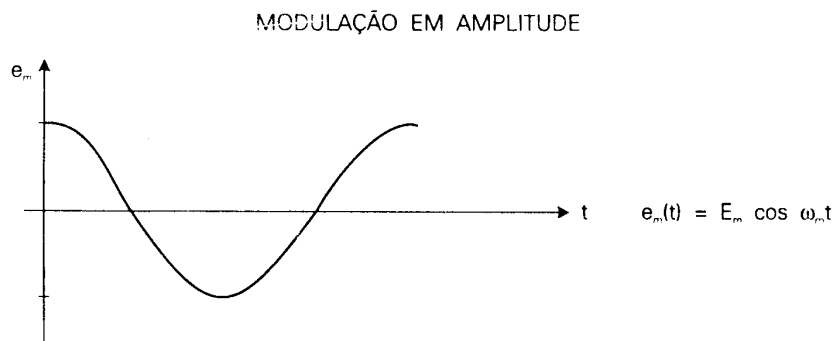


Figura 1a Sinal modulador.

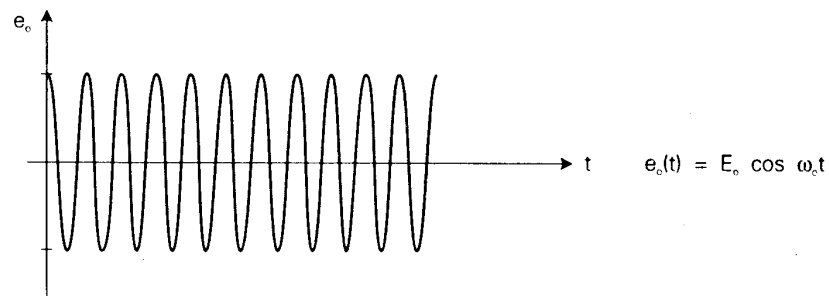


Figura 1b Portadora.

Na Figura 1, pode-se ver a representação do sinal modulador e da portadora. Ambos são cossenoidais. O sinal modulador é expresso por:

$$e_m(t) = E_m \cdot \cos \omega_m t \quad \text{Equação 1}$$

onde: $e_m(t)$: tensão instantânea do sinal modulador, em volts

E_m : tensão de pico do sinal modulador, em volts

ω_m : velocidade angular do sinal modulador, em rad/s*

t : tempo, em segundos.

O sinal da portadora é expresso por:

$$e_o(t) = E_o \cdot \cos \omega_o t \quad \text{Equação 2}$$

onde: $e_o(t)$: tensão instantânea da portadora, em volts

E_o : tensão de pico da portadora, em volts

ω_o : velocidade angular da portadora, em rad/s**

O sinal modulado é o produto da portadora pelo sinal modulador. A forma de onda resultante pode ser vista na Figura 2.

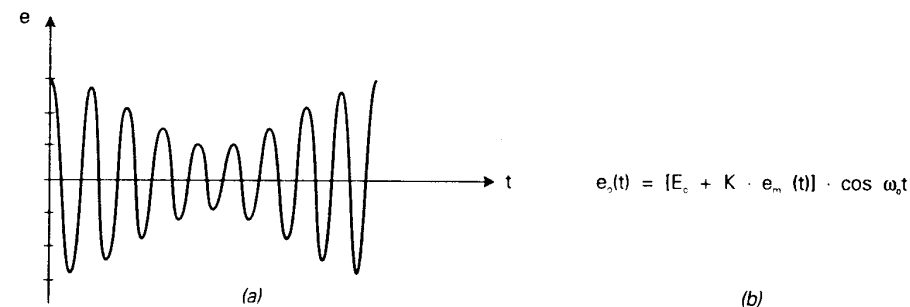


Figura 2 a) Forma de onda de um modulado em amplitude.

b) Expressão do sinal modulado em amplitude.

* $\omega_m = 2\pi f_m$; onde f_m é a frequência do sinal modulador em Hz.

** $\omega_o = 2\pi f_o$; onde f_o é a frequência da portadora em Hz.

O sinal modulado terá, portanto, a seguinte expressão:

$$e(t) = \underbrace{[E_o + K \cdot e_m(t)]}_{\text{Módulo}} \cdot \underbrace{\cos \omega_o t}_{\text{Ângulo}} \quad \text{Equação 3}$$

onde: $e(t)$: tensão instantânea do sinal modulado de radiofrequência, em volts

K : constante de proporcionalidade = $m E_o/E_m$

Na expressão do sinal modulado pode-se distinguir o módulo, cujo valor depende da soma da tensão de pico da portadora com o valor instantâneo da tensão do sinal modulator, e o ângulo, que varia de acordo com o produto $\omega_o t$. Substituindo-se $e_m(t)$ em 3, fica:

$$e(t) = [E_o + K \cdot E_m \cos \omega_m t] \cdot \cos \omega_o t$$

Colocando-se em evidência E_o , no módulo da expressão anterior, tem-se:

$$e(t) = E_o \cdot \left[1 + K \frac{E_m}{E_o} \cos \omega_m t \right] \cdot \cos \omega_o t$$

A relação $K \cdot E_m/E_o$ é chamada de "índice de modulação em amplitude". Ou seja:

$$m = \frac{K \cdot E_m}{E_o} \quad \text{Equação 4}$$

Substituindo-se a expressão 4 na equação anterior tem-se:

$$e(t) = E_o (1 + m \cos \omega_m t) \cdot \cos \omega_o t$$

Efetando-se novamente o produto na expressão do módulo, obtém-se:

$$e(t) = E_o \cdot \cos \omega_o t + m \cdot E_o \cos \omega_m t \cdot \cos \omega_o t \quad \text{Equação 5}$$

Percebe-se, nessa última expressão, a existência de um produto (na segunda parcela da soma) de dois cossenos. Esse produto pode ser transformado numa soma, aplicando-se:

$$\cos A \cdot \cos B = \frac{1}{2} \cos (A + B) + \frac{1}{2} \cos (A - B)$$

Fazendo-se $\omega_o t$ igual a "A", $\omega_m t$ igual a "B" e substituindo em 5, com a finalidade de aplicar-se a transformação trigonométrica em sua segunda parcela, obtém-se, finalmente:

$$e(t) = E_o \cdot \cos \omega_o t + \frac{mE_o}{2} \cdot \cos (\omega_o + \omega_m) t + \frac{mE_o}{2} \cdot \cos (\omega_o - \omega_m) t \quad \text{Equação 6}$$

Nota-se que mE_o aparece multiplicado por 1/2 e que t foi colocado em evidência. Percebe-se também o aparecimento de três valores diferentes de frequência. O sinal da portadora, ω_o , permanece inalterado enquanto a frequência correspondente ao sinal modulator desapareceu. Em seu lugar apareceram dois novos sinais: $(\omega_o + \omega_m)$ e $(\omega_o - \omega_m)$. O primeiro é chamado de faixa lateral superior e o segundo de faixa lateral inferior. Na Figura 3 pode-se observar o espectro do sinal modulado.

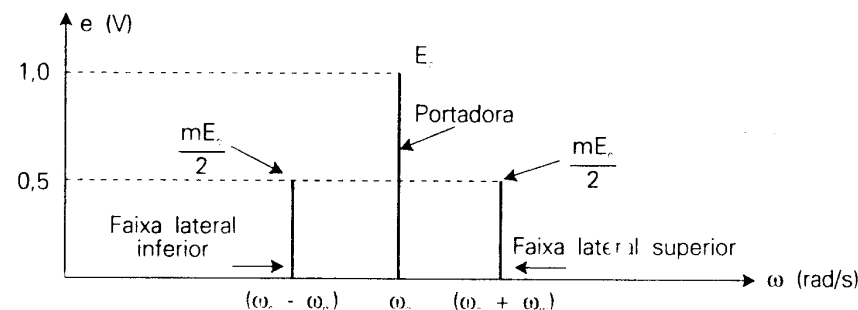


Figura 3 Espectro de amplitude de um sinal modulado.

No eixo horizontal está representada a frequência e no eixo vertical a amplitude correspondente a componente espectral. Ambos os valores podem ser obtidos a partir da Equação 6, desde que se saiba os valores de m , E_o , ω_o e ω_m . O tempo t não tem influência sobre o espectro do sinal, uma vez que neste se representa apenas o valor máximo, ou o módulo, de cada componente mostrado. Um exemplo esclarecerá melhor o que foi dito.

Exemplo 1: representar espectralmente um sinal modulado em amplitude com as seguintes características, para $K = 1$:

Frequência da portadora (f_o):	100 kHz
Frequência do sinal modulator (f_m):	1 kHz
Tensão de pico da portadora (e_o):	10 V
Tensão de pico do sinal modulator (E_m):	4 V

Primeiramente, calcula-se o índice de modulação em amplitude através da Equação 4:

$$m = \frac{E_m}{E_o} = 0,4$$

Calcula-se agora a amplitude das faixas laterais. Através da Equação 6, obtém-se:

$$e(\text{FL}) = \frac{m \cdot E_o}{2} = \frac{0,4 \cdot 10}{2} = 2 \text{ V}$$

Observe que a amplitude da faixa lateral superior é igual à amplitude da faixa lateral inferior. Isso é sempre verdadeiro para sinais modulados em amplitude (a menos que ele seja submetido a uma filtragem seletiva sobre uma das faixas laterais).

Resta, agora, calcular as frequências correspondentes às faixas laterais superior e inferior:

$$f(\text{FLS}) = f_o + f_m = (100 + 1) \text{ kHz} = 101 \text{ kHz}$$

$$f(\text{FLI}) = f_o - f_m = (100 - 1) \text{ kHz} = 99 \text{ kHz}$$

De posse desses resultados desenha-se o espectro correspondente. Figura 4.

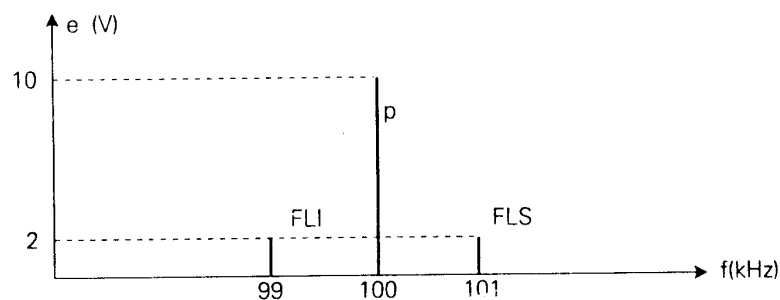


Figura 4 Espectro do sinal do Exemplo 1, $m = 0,4$.

Níveis de Potência de um Sinal Modulado em Amplitude

$$P = \frac{E^2}{R}$$

onde: P : potência do sinal, em watts

E : tensão eficaz do sinal, em volts

R : resistência equivalente, em ohms

Através da Equação 6, pode-se colocar a tensão de pico de cada componente do sinal modulado. Para calcular-se a potência de cada componente é necessário, antes, transformar os valores máximos em valores eficazes. Isso pode ser feito dividindo-se por $\sqrt{2}$ cada parcela da Equação 6. Como não nos interessam os valores instantâneos, podem-se eliminar do produto os fatores em cosseno. A potência total é dada por:

$$P_t = \frac{1}{R} \cdot \left(\frac{E_o}{\sqrt{2}} \right)^2 + \frac{1}{R} \left(\frac{mE_o}{2\sqrt{2}} \right)^2 = \frac{1}{R} \left(\frac{mE_o}{2\sqrt{2}} \right)^2$$

$$P_t = \frac{1}{R} \left[\frac{E_o^2}{2} + \frac{m^2 E_o^2}{8} + \frac{m^2 E_o^2}{8} \right]$$

\uparrow \uparrow \uparrow
 Portadora FLS FLI

Equação 7

A Figura 5 mostra o espectro de potência resultante.

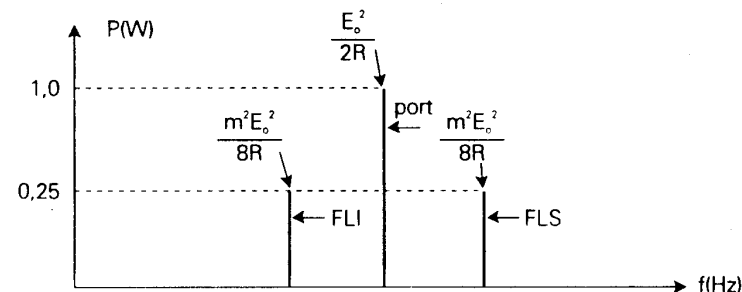


Figura 5 Espectro de potência de um sinal modulado.

Exemplo 2: Calcular a potência de cada componente de um sinal modulado em amplitude, cuja portadora tem um valor máximo de 20 V sobre uma carga de 50 Ω . O índice de modulação é igual a 0,5.

Aplicando-se a Equação 7, tem-se:

$$P_t = \frac{1}{50} \left[\frac{20^2}{2} + \frac{0,5^2}{8} \cdot 20^2 + \frac{0,5^2}{8} \cdot 20^2 \right]$$

$$P_t = 4 \text{ W} + 0,25 \text{ W} + 0,25 \text{ W}$$

$$P_o = 4 \text{ W}, \quad P_{FLS} = P_{FLI} = 0,25 \text{ W}$$

$$P_t = 4,5 \text{ W}$$

Os resultados obtidos mostram que a potência de saída de um transmissor de AM modulado aumenta com o índice de modulação. Na realidade, o acréscimo de potência proporcionado pelas faixas laterais pode chegar a 50% da potência da portadora, quando m for igual a 1.

Exemplo 3: Determinar a potência máxima de um transmissor de AM de 100 W de potência de portadora.

$$P_m = 1,5 P_o$$

$$P_m = 1,5 \cdot 100 \text{ W}$$

$$P_m = 150 \text{ W}$$

Deve-se notar que o valor acima não significa, absolutamente, a potência máxima instantânea de um sinal de AM. O valor encontrado representa, sim, o valor eficaz máximo.

Existe um outro valor de potência, também importante, relacionado com sinal de AM. Trata-se da “potência de pico da envoltória” ou PEP (do inglês “Peak Envelope Power”). O valor da PEP é obtido a partir da soma das tensões das três componentes do sinal modulado, como mostrado a seguir:

$$PEP = \frac{1}{R} \cdot \left[\frac{E_o}{\sqrt{2}} + \frac{mE_o}{2\sqrt{2}} + \frac{mE_o}{2\sqrt{2}} \right]^2$$

$$PEP = \frac{1}{R} \cdot \left[\frac{E_o}{\sqrt{2}} \cdot \left(1 + \frac{m}{2} + \frac{m}{2} \right) \right]^2$$

$$PEP = \frac{1}{R} \left[\frac{E_o^2(1 + m)^2}{2} \right]$$

Equação 8

Exemplo 4: Calcular a PEP do transmissor de AM do Exemplo 2.

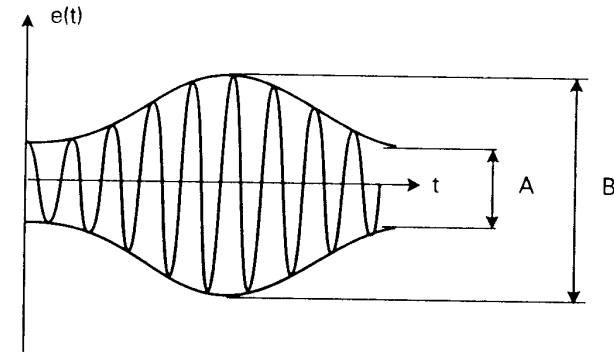
Aplicando-se a Equação 8, tem-se:

$$PEP = \frac{1}{50} \left[\frac{20^2(1 + 0,5)^2}{2} \right]$$

$$PEP = 9 \text{ W}$$

Medição do Índice de Modulação

Através da observação da envoltória de um sinal AM é possível determinar seu índice de modulação. Para isso é necessária a utilização de um osciloscópio. A Figura 6 mostra um sinal AM típico.



(a) Forma de onda

$$m = \frac{B - A}{B + A}$$

(b) Equação

Figura 6 Determinação do índice de modulação pela medição da envoltória.

Uma vez determinados os valores de A e B, é possível calcular o valor de m através da Equação 9.

$$m = \frac{B - A}{B + A}$$

Equação 9

Outra maneira para determinar-se o índice de modulação de um sinal AM é pelo uso do “método do trapézio”, mostrado na Figura 7.

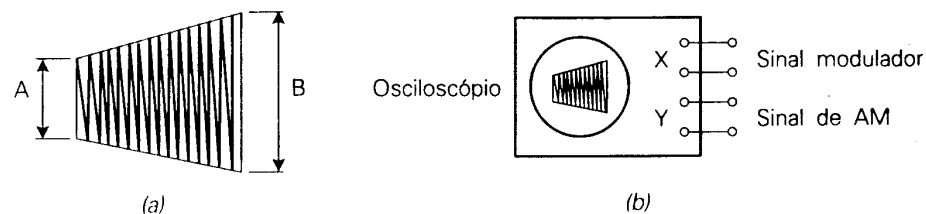


Figura 7 a) Forma de onda.

b) Disposição dos instrumentos.

Uma vantagem do método do trapézio em relação ao método anterior é a possibilidade de verificar-se a linearidade de modulação. Assim, é possível certificar-se da ausência de distorções no sinal modulado. A Figura 8 mostra alguns exemplos de sinais AM, juntamente com os comentários relativos aos mesmos.

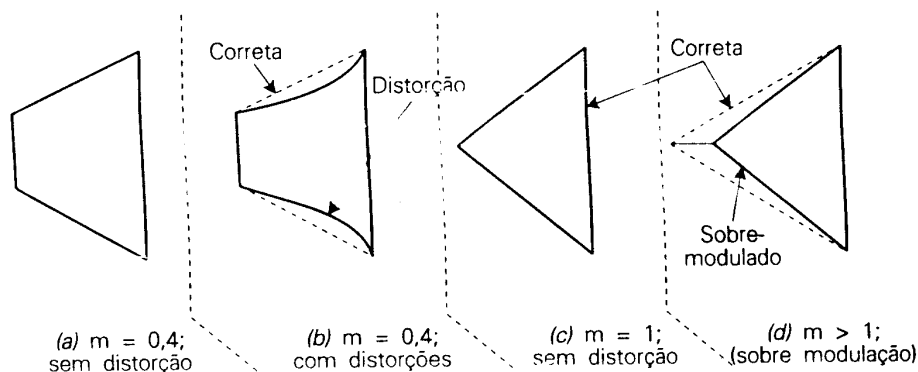


Figura 8 Formas de ondas típicas obtidas pelo método dos trapézios.

Exemplo 5: Num sinal AM foram tomadas as seguintes medidas. $A = 2$ e $B = 0.5$. (Figura 9). Determinar “m” e comentar a linearidade de modulação.

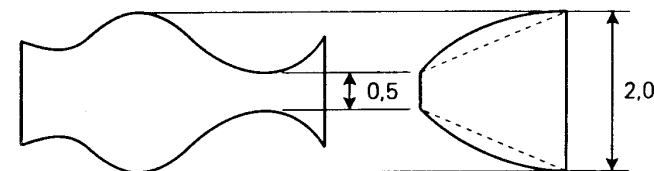


Figura 9 Forma de onda referente ao Exercício 5.

Aplicando-se a Equação 9, tem-se:

$$m = \frac{2 - 0.5}{2 + 0.5}$$

$$m = 0.6$$

Quanto à linearidade, como se pode observar na Figura 9, o sinal de AM apresenta distorção, evidenciada pela curvatura na figura trapezoidal.

Questionário

- 1) O que é modulação e quando ela é utilizada?
- 2) O que é codificação e quando ela é utilizada?
- 3) Quais as características que um sinal necessita possuir para que possa ser irradiado na forma de uma onda eletromagnética?
- 4) Fornecer as denominações corretas para os diversos sinais que participam do processo da modulação.
- 5) O que é modulação em amplitude?
- 6) Defina índice de modulação em amplitude.
- 7) Quantos e quais são as componentes de um sinal modulado em amplitude?
- 8) O que é um espectro de amplitude de um sinal modulado?
- 9) Qual a relação de amplitude entre as faixas laterais de um sinal de AM?
- 10) Defina a potência total de um sinal de AM.

- 11) Qual a relação máxima entre a potência total e a potência da portadora de um sinal de AM?
- 12) O que é a potência máxima de um sinal de AM?
- 13) O que significa a sigla PEP?
- 14) Desenhe o circuito para a medição do índice da modulação em amplitude.
- 15) O que é o método do trapézio?
- 16) Qual a vantagem do método do trapézio sobre o método convencional?

Problemas Propostos

- 1) Num sinal de AM gerado pelo produto dos seguintes sinais: $E_o = 5 \text{ V}$, $f_o = 3,65 \text{ MHz}$, $E_m = 3 \text{ V}$, $f_m = 5 \text{ kHz}$ e $R = 50 \Omega$, $K = 1$:
 - a) Determinar a frequência das faixas laterais;
 - b) Determinar o índice de modulação;
 - c) Desenhar o espectro de tensão do sinal AM;
 - d) Desenhar o espectro de potência do sinal AM;
 - e) Calcular a potência eficaz;
 - f) Calcular a PEP.
- 2) Determinar o índice de modulação do sinal mostrado na Figura 10.a.

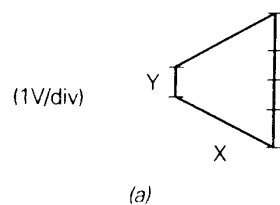
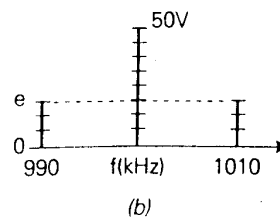


Figura 10 a) Veja Exercícios 2 e 3



b) Veja Exercício 4.

- 3) Considerando a Figura 10.a, determinar E_o , E_m , P_o , P_{FL} , P_m e PEP. (eixo vertical igual a 1 V/div), $R = 50 \Omega$ e $K = 10$.
- 4) Considerando a Figura 10.b, determinar E_o , E_m , f_o , f_m , P_o , P_{FL} , P_m , PEP (carga de 50Ω e $K = 20$).
- 5) Deduzir a Equação 9.