

Sistemas de Telecomunicações

Docente: Diego Luiz e Cunha da Silva

2023.2

Ondas Eletromagnéticas e Comunicação

Quando há onda eletromagnética, os sinais elétricos da informação modulam a onda portadora de rádio ou a luz.

As fontes de informação geram voz, música, imagem e dados. A voz, a música e a imagem são convertidas em sinais elétricos analógicos por transdutores.

Dados da informação digital são sequências de bits (*bit stream*) gerados em circuitos da eletrônica digital, por exemplo em geradores de caracteres alfanuméricos, computadores, conversores do sinal analógico em digital (A/D) etc.

Denominação dos sinais elétricos

Um sinal elétrico pode receber as seguintes denominações:

a) Finito: quando ocorre num espaço de tempo finito.

b) Periódico: quando é repetitivo a intervalos de tempo iguais.

c) Aperiódico: quando o sinal não é repetitivo.

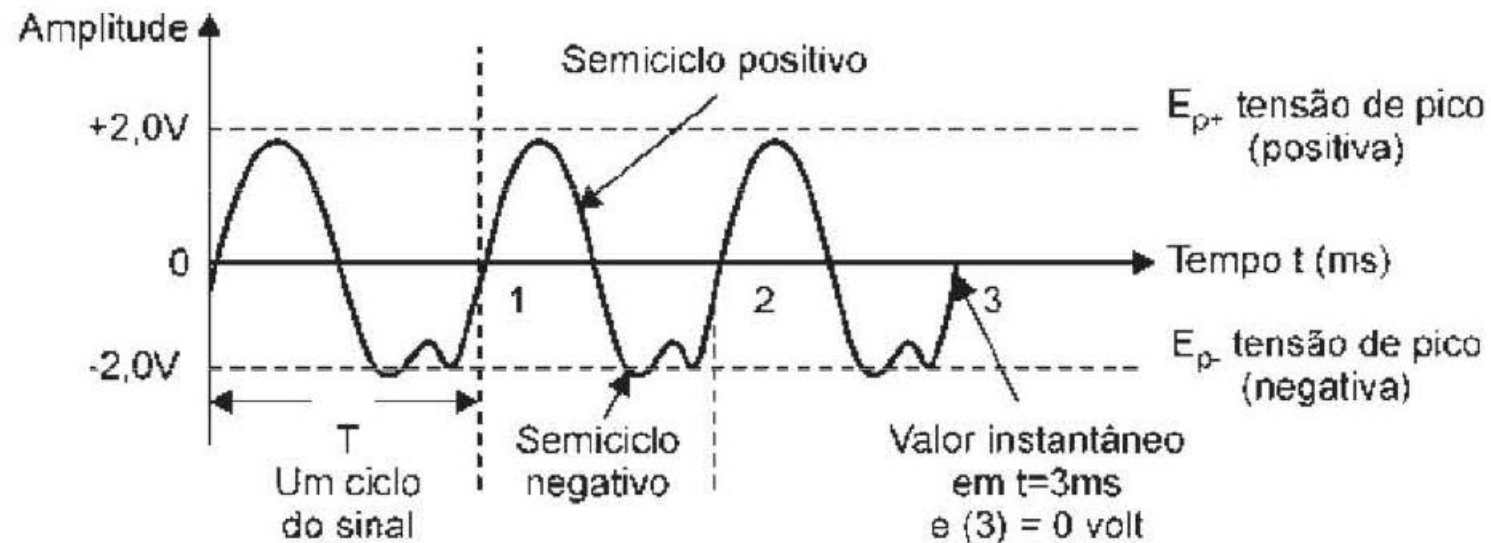
d) Aleatório: é um sinal de comportamento imprevisível, gerado com variações ao acaso, na amplitude, frequência e fase. É verdade que, na maioria das vezes, os sinais analógicos obtidos dos transdutores são aleatórios, mas, se repetido o evento, é quase certeza a repetição do mesmo sinal. Em telecomunicações, quando se fala em sinal aleatório, o primeiro nome lembrado é **o ruído elétrico**. O ruído é gerado continuamente por diversas fontes da natureza e é extremamente nocivo às comunicações. Para não ser confundido com o sinal da informação, é tratado simplesmente por **ruído**.

e) Pseudoaleatório: é um tipo de sinal aparentemente aleatório, mas de certa forma previsível. Uma fonte eletrônica geradora de sinais pseudoaleatórios pode ser usada, por exemplo, para efetuar mudanças de chaves em equipamentos de sigilo (criptossistemas).

f) Determinístico: é **o** sinal perfeitamente previsível e determinado, desenvolvido a partir de uma expressão matemática, função do tempo, $f(t)$ ou função da frequência, $f(\omega)$. Por exemplo, o sinal senoidal.

O sinal periódico

O estudo e a geração dos sinais ficam facilitados quando se trata de **sinal periódico**. O intervalo de repetição denomina-se **período**, representado pela letra **T** e medido em segundo [s]. Um período equivale a um **ciclo**, e a quantidade de ciclos por segundo é denominada **frequência**, medida em hertz [Hz].



O sinal periódico

Dentre os sinais periódicos, o **senoidal** é extremamente útil e talvez o mais usado. É gerado em aparelhos eletrônicos de laboratório, para ensaios e consertos de equipamentos, em circuitos de radiotransmissores e em modems, como "ondas portadoras" para transportar os sinais elétricos da informação. É um sinal simples, puro, na frequência fundamental.

Os sinais precisam ser medidos e, quando necessário, analisados.

Onda

Onda é uma sequência contínua do sinal gerado por uma fonte.

Existem esquemas de circuitos eletrônicos específicos para gerar sinais periódicos com diferentes formas de ondas, por exemplo: senoidal, trem de pulsos, dente de serra, triangular etc. Em laboratório o aparelho chamado **gerador de funções** fornece ondas com algumas dessas formas.

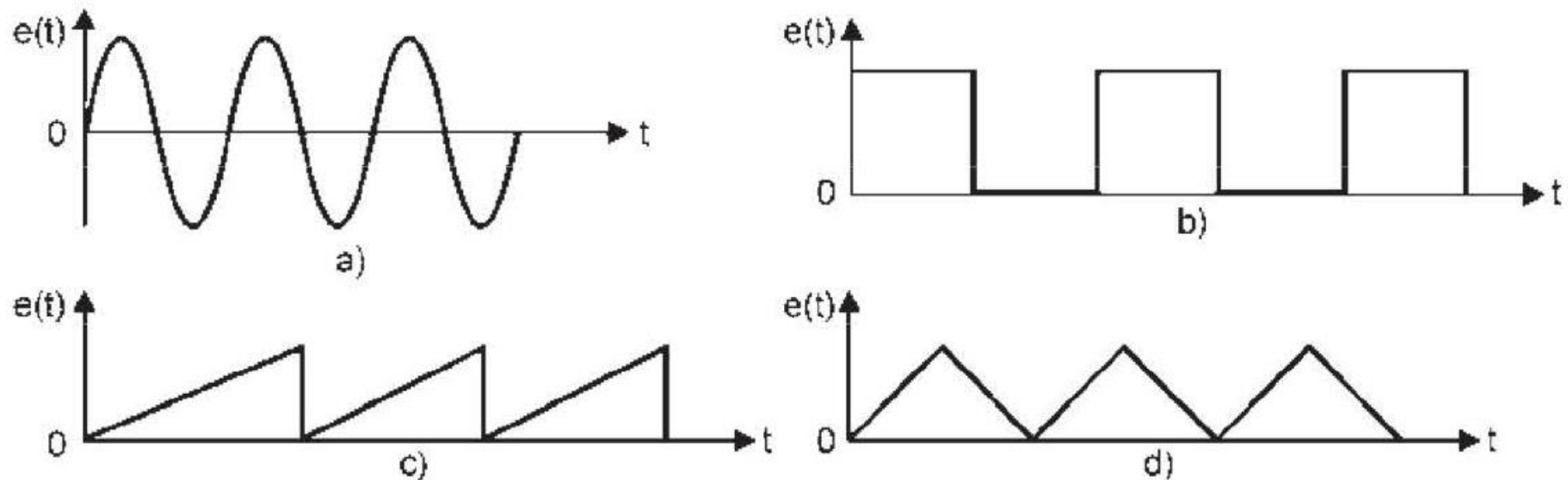


Figura 2.4 - Tipos de ondas: a) senoidal, b) trem de pulsos, c) dente de serra e d) triangular.

Onda

Onda portadora ou *carrier* é a denominação dada à onda senoidal gerada eletronicamente no aparelho transmissor de rádio, numa certa potência e frequência, para transportar os sinais elétricos da informação até o aparelho receptor.

Embora, teoricamente, qualquer onda, em diferentes formas e frequências, possa servir de portadora, na prática não seria conveniente em virtude da geração de sinais espúrios e das interferências causadas por ocasião da irradiação, por isso a utilização da onda senoidal.

Vibrações mecânicas de poucos hertz até cerca de 20 kHz são audíveis (ondas sonoras) e quando convertidas em sinais elétricos com o auxílio do transdutor pertencem à faixa de audiofrequências (AF). São processadas, por exemplo, nos amplificadores de som.

Ondas nas frequências entre 20 e 90 kHz pertencem à faixa de ultrassom e são utilizadas, por exemplo, em alarmes ultrassônicos e em alguns tipos de aparelhos da área médica.

A onda portadora é obtida de um oscilador senoidal, geralmente em frequências acima dos 100 kHz para as radio emissões. A onda pode ser transmitida pura, sem modulação, ou modulada. Quando pura, é usada nas comunicações radiotelegráficas em código Morse, e quando modulada, em amplitude (AM) ou frequência (FM), transporta os sinais da informação.

Onda

Modulação é o processo eletrônico no qual o sinal elétrico da informação modifica pelo menos um dos parâmetros da onda portadora: amplitude, frequência ou fase. A onda portadora modulada viaja no canal de comunicações transportando os sinais da informação, daí a sua denominação de *portadora ou carrier*.

Na recepção, o processo inverso usado para remover os sinais da informação da onda portadora modulada denomina-se **demodulação da onda**.

A modulação da onda pode ser feita nas formas **analógica ou digital**.

A modulação analógica ocorre quando os sinais analógicos da informação atuam sobre uma onda portadora também analógica, usualmente senoidal, por exemplo, a modulação em amplitude (AM).

A modulação digital ocorre quando uma portadora de pulsos interage com os sinais analógicos da informação, por exemplo, na modulação PAM, por amplitude de pulso, na primeira etapa da conversão do sinal analógico em digital (PCM).

Onda - Sinais senoidal e cossenoidal

Os sinais elétricos analógicos tidos como fundamentais são o senoidal e o cossenoidal, desenvolvidos das funções seno e cosseno estudadas em trigonometria e obtidos, na prática, de circuitos eletrônicos osciladores.

A expressão matemática genérica do sinal senoidal é:

$$e(t) = E_{\text{máx}} \text{sen}(\omega t + \varphi)$$

em que: $\omega = 2\pi f$ rad/s, f é a frequência em hertz [Hz] e φ é um ângulo de fase.

O inverso da frequência é o período, medido em s $T = \frac{1}{f}$

Onda - Sinais senoidal e cossenoidal - Exemplo

Seja o período de uma onda (um ciclo completo) $T = 1 \text{ ms}$. Calcular a frequência da onda.

- **Solução:** $1 \text{ ms} = 10^{-3} \text{ s}$, logo $f = 10^3 \text{ Hz} = 1000 \text{ Hz}$, ou seja, em 1 segundo ocorrem mil ciclos do sinal.

Onda - Sinais senoidal e cossenoidal

Aplicações de seno e cosseno são encontradas, matematicamente, no desenvolvimento de funções periódicas em série de Fourier e, na prática, em projetos eletrônicos que usam sinais senoidais defasados de 90° , por exemplo, no estágio demodulador de crominância de receptores analógicos de televisão. Genericamente a onda é tratada simplesmente por senoidal.

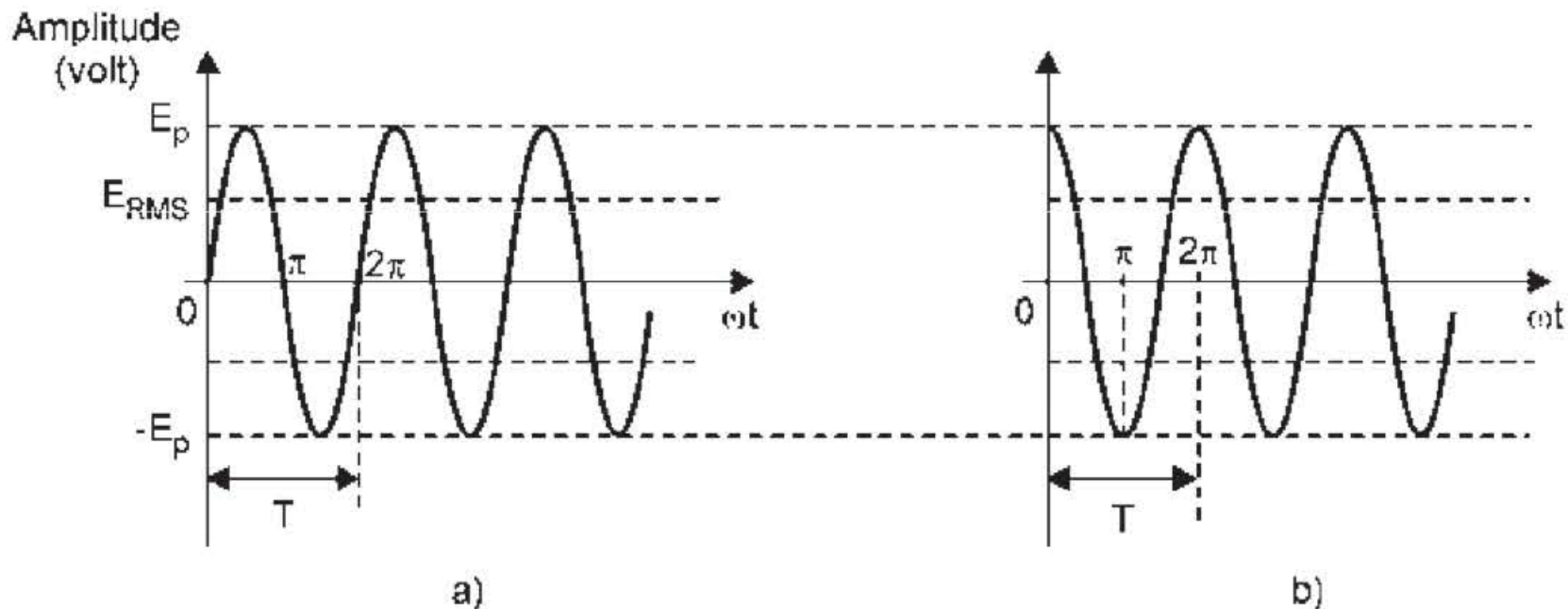


Figura 2.5 - Gráficos das funções: (a) senoidal e (b) cossenoidal.

Onda - Sinais senoidal e cossenoidal

São chamadas de **senoide e cossenoide** as curvas resultantes do desenvolvimento das funções seno e cosseno, respectivamente, e genericamente de **senoidal** quando se trata do sinal elétrico. Os sinais também podem ser estudados na forma vetorial.

Sinais analógicos da informação

Os sinais elétricos analógicos são obtidos diretamente de transdutores e, na maioria das vezes, em pequenas amplitudes, por isso necessitam de amplificação eletrônica para diversas aplicações e reprodução.

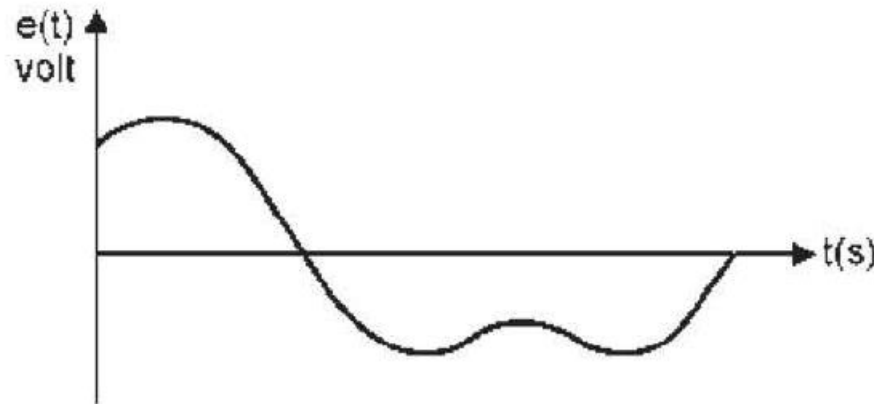


Figura 2.10 - Exemplo de sinal analógico.

Sinais analógicos da informação

A voz, movimento vibratório das cordas vocais do homem, é captada e convertida em sinais elétricos analógicos pelo microfone. Após amplificada pode ser reproduzida pelo alto-falante ou dispositivo similar. Quando transmitida pelo rádio é, no radiotransmissor, o sinal modulante ou modulador da onda portadora.

Ao estudar o espectro do sinal complexo da **voz**, observam-se sinais de frequências entre 300 e 3400 Hz, enquanto os harmônicos podem atingir até cerca de 6000 Hz. Por isso o **timbre** da voz mais grave no homem e mais agudo na mulher, resultado da composição de ondas com diferentes amplitudes e frequências.

A faixa mínima de inteligibilidade da voz é **$B = 3400 - 300 = 3100$ Hz**, mas o valor de referência para o canal de voz em telefonia é **$B = 4$ kHz** e em alguns casos alcança 5 kHz.

Sinais analógicos da informação

A música, obtida das vibrações sonoras de instrumentos musicais, também pode ser captada e convertida em sinais elétricos analógicos pelo microfone e reproduzida pelo alto-falante. O espectro musical contém frequências que se estendem de poucos hertz até cerca de 19 kHz, valor considerado limite máximo da audição do ser humano.

Em telecomunicações, por força de legislação, os sistemas de radiodifusão FM operam com o canal de áudio de 15 kHz, enquanto em AM o canal de áudio fica limitado a 5 kHz.

Sinais digitais

As técnicas digitais da eletrônica moderna foram concebidas, teoricamente, há décadas, quando os projetos não podiam ser implementados em virtude da carência tecnológica da época, quando enormes válvulas termoiônicas eram usadas para gerar e amplificar sinais. Com o passar do tempo, as válvulas foram miniaturizadas e depois substituídas pelos transistores.

Os primeiros transistores foram feitos a partir do germânio, mas devido a problemas de instabilidade térmica foram substituídos pelos transistores de silício, utilizados nos dias de hoje.

As principais dificuldades encontradas nas antigas montagens eletrônicas eram as dimensões das válvulas, o calor dissipado e o valor da tensão contínua da fonte de alimentação, da ordem de 250 volts ou mais, e chegavam à baixa qualidade dos enormes componentes passivos (capacitares e resistores). Como a válvula opera a vácuo, feito no interior do bulbo de vidro, a denominação **estado sólido** refere-se ao dispositivo semicondutor, fabricado a partir de uma estrutura cristalina sólida.

Sinais digitais

A conversão dos sinais analógicos em sinais digitais ocorre no **conversor A/D** (de analógico em digital). A operação inversa, que **recupera a** informação na forma analógica, é feita no **conversor D/A** (de digital em analógico).

Um exemplo do que está sendo comentado é o aparelho conhecido por **secretária eletrônica sem fita**. A secretária atende à ligação, converte em digitais os sinais analógicos da bvoz da mensagem e armazena os bits em circuitos de memória. Quando se quer ouvir o que foi gravado, basta acionar um botão e os bits são removidos da memória, enviados ao conversor D/A para recuperar os sinais analógicos originais, amplificá-los e a informação, no caso a voz, ser reproduzida pelo alto-falante do aparelho.

Conceito de canal

Canal ou meio de comunicações é o meio físico entre o transmissor e o receptor por onde transitam os sinais elétricos ou eletromagnéticos da informação.

Em telecomunicações, o termo **canal** possui pelo menos três significados:

- 1) Usado para especificar um meio de comunicações: fio, rádio ou fibra óptica. Os materiais empregados dão nome aos meios de comunicações.
- 2) Caminho para o sinal, por exemplo, um amplificador de áudio estereofônico possui dois canais: esquerdo (L - *left*) e direito (R - *right*).
- 3) Segmento do espectro de frequências com largura de banda (*bandwidth*) B ou faixa ocupada por uma transmissão de rádio.

Conceito de canal

Canal fio

Consiste em pelo menos dois fios condutores elétricos usados para conduzir os sinais da informação.

Uma rede telefônica fixa é feita com fios e cabos. Os cabos são constituídos internamente de múltiplos condutores isolados, podendo abrigar, em seu núcleo, cabos coaxiais e fibras ópticas.

Canal rádio

Deve ser entendido como um segmento do espectro de frequências ocupado pela onda eletromagnética de um equipamento emissor. A onda de rádio se propaga no espaço livre, transportando os sinais elétricos da informação.

O espaço livre é o meio físico das comunicações rádio.

Canal fibra óptica

A fibra óptica é um elemento monofilar de estrutura cristalina, condutor de luz, que transporta a informação sob a forma de energia luminosa. É também chamada de guia de luz. Possui alto índice de refração, e a luz, ao se propagar na fibra, sofre atenuação e dispersão.

Conceito de canal

Atenuação da intensidade do sinal

O sinal elétrico vai perdendo energia ao se propagar no canal de comunicações e chega ao receptor com intensidade atenuada.

Por exemplo, um canal telefônico representado por um par de fios, comumente chamado de linha telefônica, tem impedância característica nominal de 600 ohms. O valor preconizado para o sinal aplicado à entrada da linha é de um miliwatt (1 mW sobre 600 Ω). Linhas muito longas (acima de 10 km) e em mau estado de conservação atenuam consideravelmente o sinal. A atenuação é medida com um sinal de teste na frequência de 1 kHz. Na efetivação do enlace, o valor da atenuação do sinal deve permanecer na faixa entre 13 e 18 dB. O recurso encontrado para restaurar o nível do sinal é o emprego do amplificador de linha.

Retardo

Retardo (*de/ay*) é o nome dado ao tempo gasto para o sinal atravessar o canal de comunicações. O tempo de retardo Δt é calculado dividindo a distância percorrida pela onda no enlace dos dois pontos pela velocidade de propagação da onda no meio de propagação.

As Ondas de Rádio

Ondas de rádio ou ondas hertzianas são campos eletromagnéticos de alta frequência, não audíveis e não visíveis pelo homem, irradiados pela antena do radiotransmissor.

Em engenharia elétrica, o estudo da onda de rádio é feito com o auxílio da matemática vetorial, no espaço tridimensional e com base nos campos elétrico e magnético na disciplina Eletromagnetismo. tendo sido abandonado o complexo tratamento matemático que dá suporte à teoria.

O radiotransmissor é o aparelho eletrônico gerador da onda alternada senoidal, numa certa frequência, que alimenta a antena.

A antena, feita de condutor metálico, tem por função na transmissão converter a corrente elétrica em energia radiante (onda eletromagnética) e, inversamente, na recepção captar a onda de rádio e convertê-la em corrente elétrica. As ondas hertzianas podem ser geradas em qualquer frequência; entretanto, são mais usadas em telecomunicações acima dos 100 kHz.

A onda irradiada pela antena transmissora vai perdendo potência ao longo do percurso no espaço livre e se contamina com ruído elétrico, sempre presente no canal de comunicações.

As Ondas de Rádio

Gerada pelo transmissor, em sua forma original, sem modulação, **a onda portadora** ou **carrier** é usada nas comunicações em telegrafia manual, chaveada em código Morse. Quando **modulada** pelo sinal da informação, em amplitude (AM) ou em frequência (FM), no transmissor, pode transportar a voz, a música, a imagem e os dados das comunicações digitais.

A demodulação da onda é a operação realizada na recepção, que retira o sinal de informação da onda portadora.

Resumidamente, o radio enlace de comunicações se desenvolve entre as antenas transmissora, localizada em A, e receptora, localizada em B

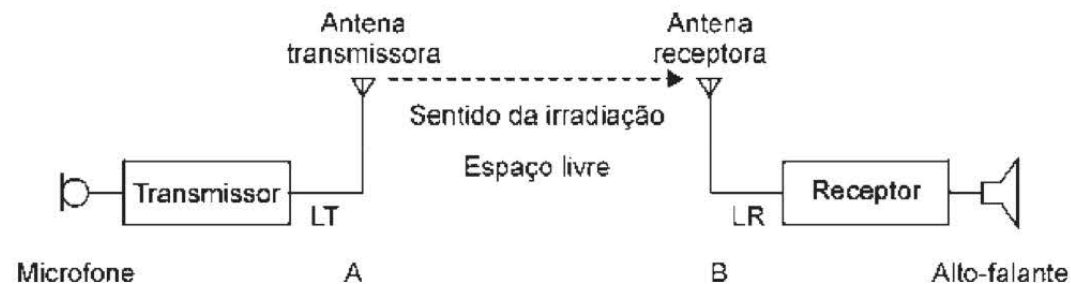


Figura 4.1 - Diagrama em blocos de um radioenlace entre dois pontos.

As Ondas de Rádio

Velocidade de propagação e comprimento de onda

A onda de rádio propaga-se no espaço livre com a velocidade da luz no vácuo, aproximadamente 3×10^8 m/s. O comprimento de onda λ (lambda - 11ª letra do alfabeto grego) é o resultado da relação entre a velocidade da luz no vácuo v_c e a frequência f da onda. Assim:

$$\lambda = \frac{v_c}{f} \text{ [m]}$$

em que $\lambda \Rightarrow$ ao comprimento em m (metro);

$v_c \Rightarrow 3 \cdot 10^8$ m/s;

$f \Rightarrow$ frequência em Hz;

$T \Rightarrow$ período, em s, o tempo de duração de um ciclo da onda.

As Ondas de Rádio

Velocidade de propagação e comprimento de onda - Exemplo

Calcular o comprimento de onda na frequência $f = 150 \text{ MHz}$.

Solução: dividindo $3 \times 10^8 \text{ m/s}$ por $150 \cdot 10^6 \text{ Hz}$, encontra-se $\lambda = 2 \text{ m}$.

O valor de λ é importante por servir de referência para os cálculos de antenas, atenuação da onda devido ao percurso, nas linhas de transmissão etc. Observe que quanto maior a frequência menor será o comprimento de onda e por isso as pequenas dimensões das antenas usadas em enlaces com frequências elevadas.

As Ondas de Rádio

Atenuação da onda devido ao espaço livre

A expressão matemática usada para calcular o valor da atenuação da onda devido ao espaço livre, no percurso entre as antenas transmissora e receptora, é:

$$L_{fs} = \left(\frac{\lambda}{4 \pi d} \right)^2 \text{ (adimensional)}$$

em que $L_{fs} \Rightarrow$ valor da atenuação do espaço livre;

$\lambda \Rightarrow$ comprimento da onda do enlace em [m];

$d \Rightarrow$ distância percorrida pela onda em [m];

em dB:

$$L_{fs} = 20 \log \left(\frac{\lambda}{4 \pi d} \right) \text{ dB}$$

Exercícios

Calcular os comprimentos de onda λ nas seguintes frequências:

- a) 860 kHz;
- b) 300 MHz;
- c) 6 GHz.

Calcular a atenuação do espaço livre, em dB, no percurso de 10 quilômetros, imposta às ondas nas seguintes frequências:

- a) 300 MHz;
- b) 1 GHz;
- c) 20 GHz.

Utilizar a expressão 4.4 para calcular a atenuação do espaço livre em dB, no percurso de 10 quilômetros, imposta à onda na frequência de 1 GHz.