

1. ELEMENTOS DA TEORIA DE SISTEMAS DE COMUNICAÇÕES DIGITAIS

1.1 INFORMAÇÃO E MENSAGENS

Claramente o conceito de informação é central para comunicações. Informação pode conter noções filosóficas que dificultam uma definição precisa. Para evitar essas dificuldades, ao invés de utilizar a palavra informação, pode-se utilizar a palavra mensagem, definida como a manifestação física da informação, produzida por uma fonte. O objetivo do sistema de comunicações é reproduzir no destino de forma aceitável uma réplica da mensagem gerada pela fonte.

Existem vários tipos de fontes de informação, incluindo máquinas e pessoas, de modo que as mensagens podem aparecer de várias formas. As mensagens podem ser analógicas ou digitais.

Algumas mensagens são elétricas. A maioria dos sistemas de comunicações possui transdutores na entrada e na saída. O transdutor de entrada converte a mensagem para um sinal elétrico, tensão ou corrente elétrica. Na saída, o sinal elétrico é convertido na forma desejada no destino.

1.2 SINAIS

Sinais analógicos, discretos e digitais

Os fenômenos físicos da natureza implicam transformação da matéria e são provocados pela energia presente nos elementos do ambiente. A energia pode se manifestar sob variadas formas ou tipos, como na ligação entre os componentes da matéria, pelo deslocamento do ar etc., classificadas como energia química, eólica, mecânica, elétrica etc. Independentemente da forma da energia, os fenômenos podem ser mensurados por grandezas físicas, utilizando-se unidades de medida convencionadas.

Sinais analógicos

O comportamento das grandezas relacionadas aos fenômenos da natureza apresenta, na maioria deles, uma variação contínua de valores, além de ser definida em qualquer instante do tempo, em uma janela temporal de

observação. A grandeza (x) é uma função do tempo (t), tal que $x = f(t)$, tal que em um intervalo crescente $[x_0, x_1]$ é sempre possível determinar um valor X da grandeza, $x_0 < X < x_1$, assim como em uma janela temporal crescente $[t_0, t_1]$ é sempre possível definir um instante T , $t_0 < T < t_1$. Matematicamente esse conceito é o conceito de continuidade do sinal.

A função que representa matematicamente um fenômeno é chamada de sinal. Os sinais podem mudar de acordo com o instante de tempo em que o fenômeno é observado, podem variar de acordo com a posição em que ocorrem, assim por diante. O comportamento do sinal é dependente de uma variável de referência, chamada variável independente. Por esse motivo os sinais são variáveis dependentes. Interessa à nossa discussão especialmente a variação dos sinais de acordo com o tempo.

Sinais que apresentam continuidade dos valores de grandeza e continuidade no tempo de observação são chamados de sinais analógicos. Por exemplo, um termômetro de mercúrio com um bulbo possui uma régua contínua sobre a qual o mercúrio varia à medida que a temperatura ambiente flutua. A temperatura pode variar infinitamente entre dois valores quaisquer (isso não significa que seja possível medir essas variações), variação que se reflete na régua de mercúrio, assim como em qualquer instante do tempo. Tipicamente caracteriza-se um fenômeno cuja grandeza é analógica e que matematicamente pode ser definida pela expressão $temperatura = f(tempo)$, onde a temperatura é a variável dependente e o tempo é a variável independente.

A Figura 1 representa o comportamento geral dos sinais analógicos.

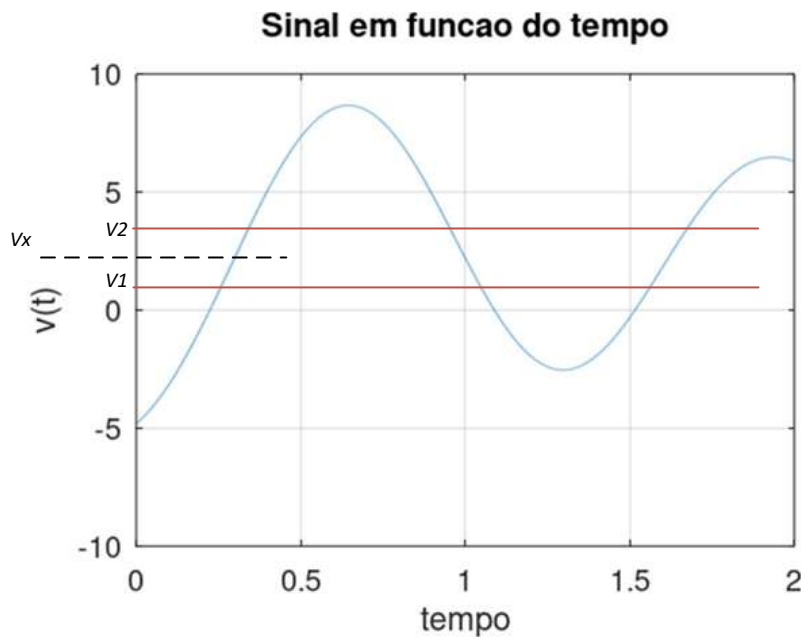


Figura 1 – Sinal analógico: continuidade na grandeza e no tempo

Embora o sinal $V(t)$ esteja apresentado somente nos limites entre - 10 V e 10 V, no intervalo considerado entre dois valores quaisquer de tensão $[V_1 \ V_2]$ sempre é possível definir um valor intermediário V_x .

Sinais discretos

A intensidade dos fenômenos da natureza, que são quantificados por grandezas físicas, pode ser estabelecida com a utilização de instrumentos. Os instrumentos são calibrados para apresentar a intensidade da grandeza utilizando uma unidade de medida e conforme uma escala adequada.

Embora as grandezas da natureza se comportem tipicamente de forma analógica, a medição nem sempre precisa refletir o comportamento contínuo no valor da grandeza medida, variável dependente, nem da variável independente de tempo. Voltando ao exemplo da temperatura, para algumas finalidades a medição da temperatura pode ser realizada, por exemplo, em intervalos de hora. Para outras finalidades pode ser necessário realizar a coleta de temperaturas em intervalos de poucos minutos. As variações de temperatura em intervalos de uma hora podem não ser significativas para uma aplicação, embora não sejam admitidas para outras. Isso significa que a descontinuidade pode ser admitida. De forma similar, dependendo da aplicação pode-se admitir uma precisão maior ou menor do valor medido da grandeza física, o que caracteriza uma descontinuidade do sinal.

Os sinais que admitem descontinuidade do valor da medida de grandeza ou descontinuidade da variável independente em função da qual são observados são chamados sinais discretos. Os valores das medidas dos sinais podem ser considerados somente conforme N níveis discretos pré-definidos. Os sinais analógicos são aproximados a um dos níveis de acordo com uma regra qualquer. Esse processo é chamado de quantização do sinal. Obviamente, a quantização de um sinal analógico implica uma perda de informação.

A Figura 2 apresenta um sinal analógico $S(t)$ e o apresenta após o processo de quantização $S_q(t)$.

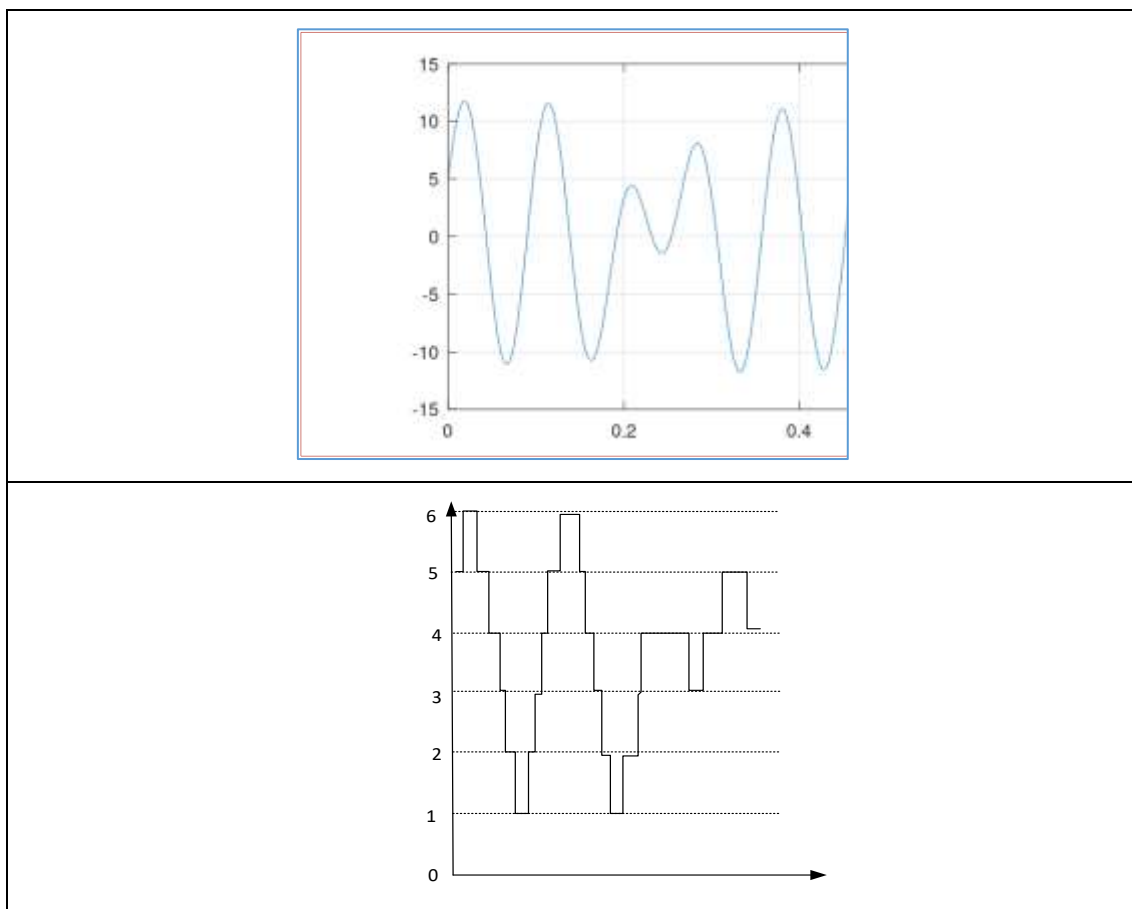


Figura 2 – $S(t)$, sinal analógico; $S_q(t)$, sinal quantizado

O sinal foi quantizado utilizando-se 7 níveis de aproximação, identificados de 0 a 6. A aproximação do valor do sinal $S(t)$ para um dos níveis é implementada matematicamente por uma função de quantização (estudaremos posteriormente com mais detalhes), de modo que $S_q(t)=f[S(t)]$. Uma função de quantização simples consiste em aproximar a medida da grandeza de $S(t)$ ao valor do nível mais próximo para determinar o nível $S_q(t)$. É evidente que o sinal perde em

resolução. Dependendo da aplicação a resolução utilizada pode ser adequada ou não.

Pode-se estabelecer um código binário para representar os níveis de $S_q(t)$. O código deve possuir n bits, de modo que $2^n \geq N$, onde N é o número de níveis. No exemplo utilizado, é evidente que são necessários pelo menos 3 bits para representar os 7 níveis. No exemplo, utilizando-se um código BCD (*Binary-Coded Decimal*) para representar cada nível de quantização, as palavras do código para representar $S_q(t)$ seriam 000-001-010-011-100-101-110.

A discretização pode não se observar no valor da medida do sinal, mas no instante de observação, que pode não ser qualquer instante da linha do tempo, mas somente instantes específicos. Os sinais analógicos são representados pelo valor medido somente em instantes discretos de tempo. Por conveniência, os instantes são múltiplos de um intervalo fixo $T=\Delta t$. O processo de transformação do sinal analógico no sinal medido em intervalos múltiplos de Δt é chamado de amostragem do sinal.

A Figura 3 apresenta um sinal analógico $S(t)$ e o apresenta após o processo de amostragem $S_A(t)$.

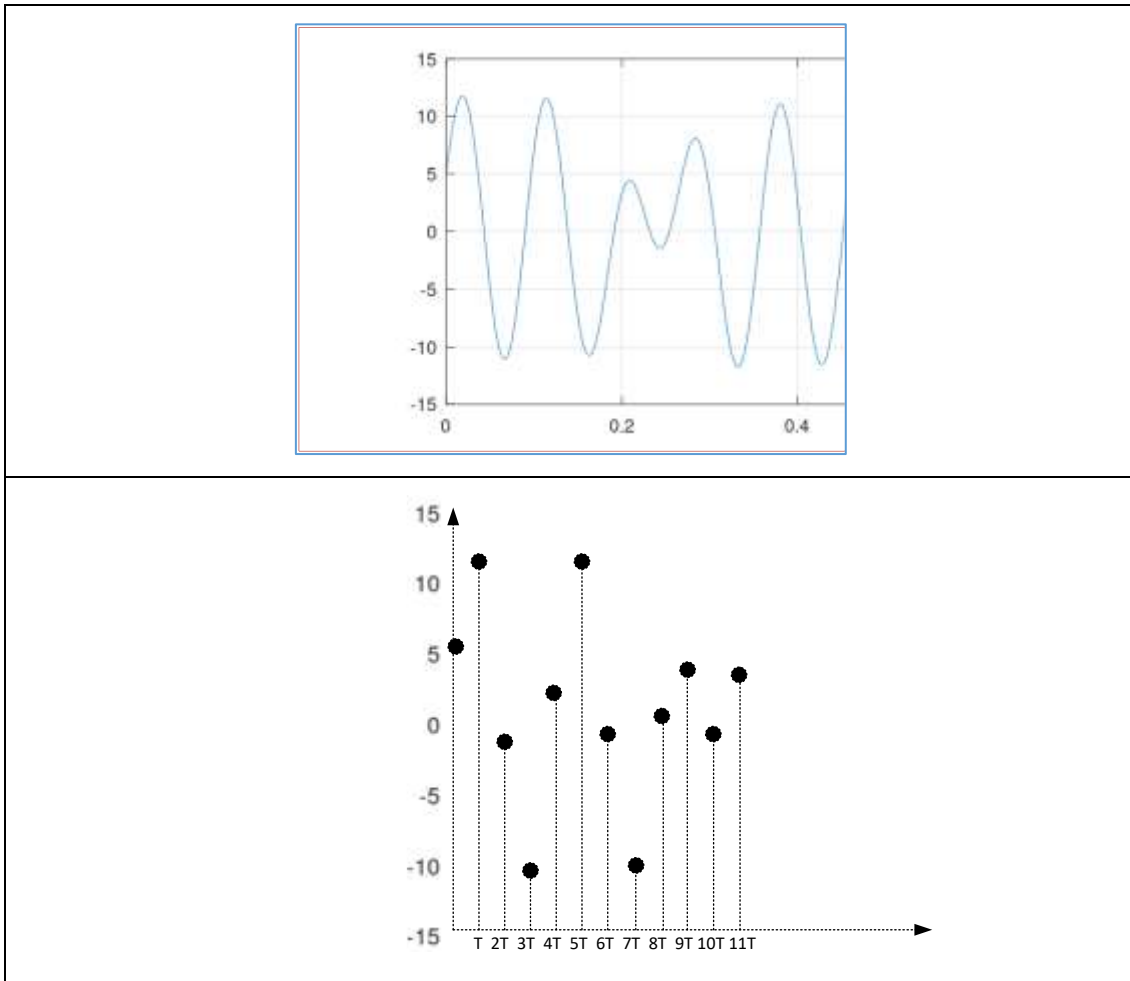


Figura 3 - $S(t)$, sinal analógico; $S_A(t)$, sinal amostrado

O intervalo regular de amostragem é chamado de período de amostragem (T_A). A taxa de amostragem do sinal é o inverso do período de amostragem, logo dada pela relação $f_A = 1/T_A$

Ora, como os instantes de amostragem são múltiplos de T_A , é fácil verificar que $S_A(n.T_A) = S(t), t = n.T_A$. Como o valor de T_A é constante, pode-se representar o sinal discreto no tempo, ou sinal amostrado, simplesmente em função de n , de modo que

$$S_A(n) = S(t), t = n.T_A$$

Assim como a quantização de um sinal analógico destrói parte da informação que contém, o processo de amostragem também subtrai informação do sinal. Pode-se estabelecer uma taxa ou frequência de amostragem adequada do sinal analógico em função das componentes de frequência do sinal, de modo a que sua representação discreta preserve a sua informação. Posteriormente

discutiremos com maior profundidade a frequência de amostragem adequada para usar nos sistemas de comunicações.

Sinais digitais

O sinal digital é aquele que é quantizado e amostrado, em seguida transformado em pulsos de onda quadrada, conforme apresenta a Figura 4. O pulso de onda quadrada é a manifestação física da abstração do dígito binário (bit), que assume os valores 0 ou 1, e possui uma largura t , em segundos.

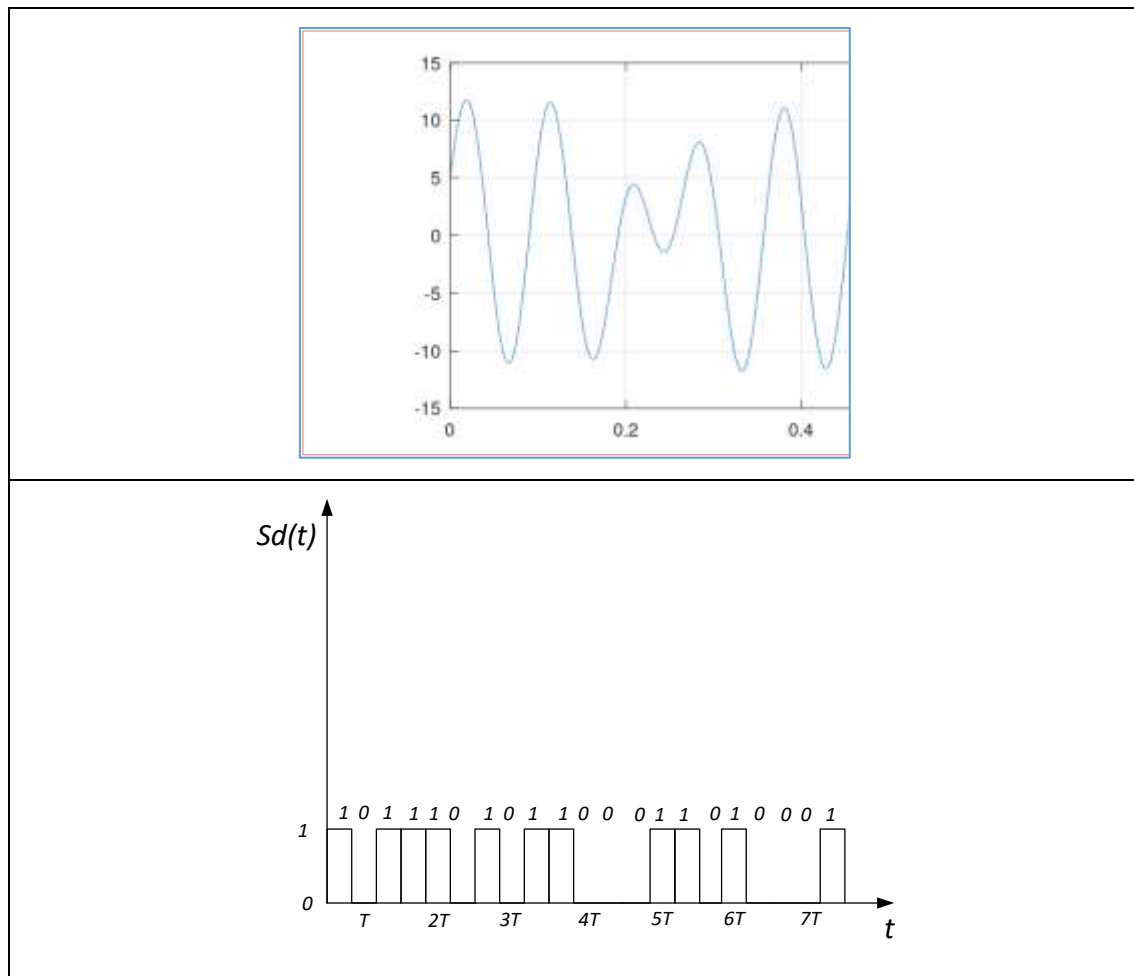


Figura 4 - $S(t)$, sinal analógico; $S_d(t)$, sinal digital

O sinal digital pode ser transmitido por um sistema de comunicações. A taxa de transmissão é definida pelo número de bits transmitidos por segundo, representado por *bps* (bits por segundo), ou pelos seus múltiplos (k, M, G, ...), determinada por $1/t$.

Em sucessivos intervalos de amostragem, os bits relativos a cada nível do sinal quantizado podem ser transmitidos, logo a taxa de transmissão também

pode ser calculada por $\frac{n}{T_A} = n \cdot f_A$, onde n é o número de bits usados para cada representar cada nível de quantização, T_A é o período de amostragem e f_A é a frequência de amostragem.

O transmissor de comunicações pode usar técnicas de codificação e modulação digitais que permitem a transmissão de um número maior de bits por segundo. O sinal digitalizado codificado e modulado é chamado de símbolo. Cada símbolo pode codificar vários bits. A medida da transmissão de símbolos na unidade de tempo é medida em *bauds*, logo a taxa de transmissão em

$$bps = \text{número de bits por símbolo} \times \text{bauds}$$

Sinais senoidais

Os sinais senoidais são muito comuns nos circuitos eletrônicos. Descrevem vários fenômenos da natureza bem como propriedades de circuitos lineares. Matematicamente, a tensão senoidal pode ser representada por

$$V(t) = A \cdot \text{sen}(2\pi f_0 t - \phi) = A \cdot \text{sen}(w_0 t - \phi)$$

, onde A representa a amplitude do sinal, f_0 representa a frequência fundamental, medida em ciclos por segundo (ou Hertz), $w_0 = 2\pi f_0$, representa a frequência fundamental angular e ϕ representa o atraso inicial do sinal – em radianos.

Os parâmetros de sinais senoidais estão apresentados na Figura 5.

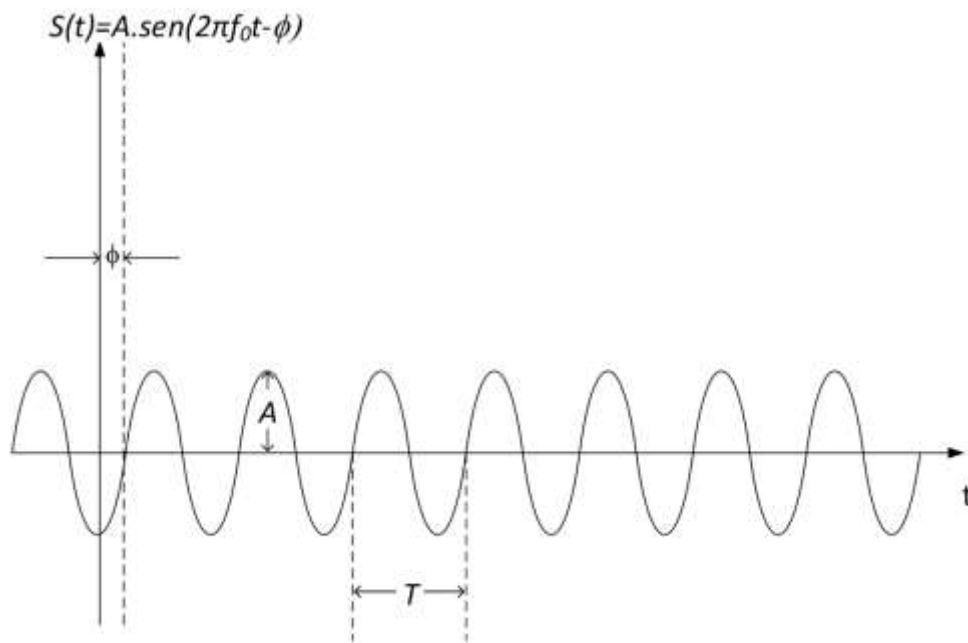


Figura 5 – Parâmetros de sinal senoidal

O uso dos parâmetros permite caracterizar plenamente um sinal senoidal em função da sua amplitude, fase e de sua frequência, $S(t)=[A(\phi), f]$. A Figura 6 apresenta a caracterização da amplitude do sinal $V(t) = 15\text{sen}(2\pi 60 - \frac{\pi}{5})$ em função da frequência.

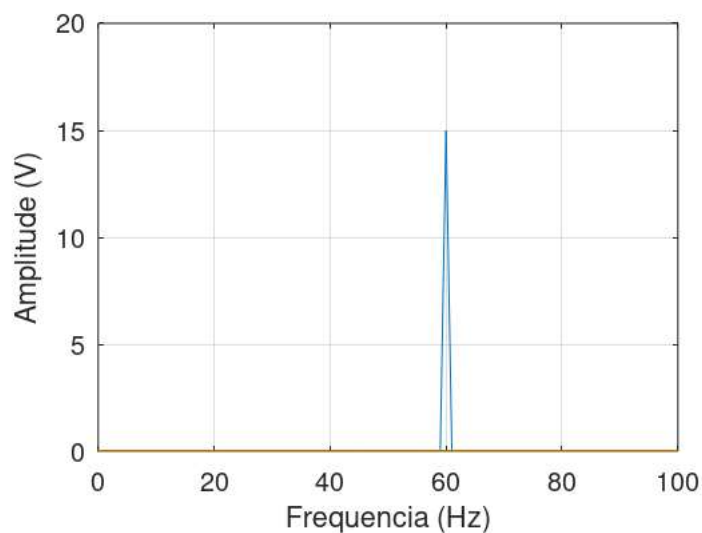


Figura 6 – Amplitude da representação de $V(t)=15\text{sen}(2\pi 60 - \pi/5)$

Observe que a amplitude $A=15$ é apresentada na frequência fundamental de $f_0=60 \text{ Hz}$. Nas demais frequências a amplitude é nula.

Uma propriedade especial do sinal senoidal é seu comportamento periódico ao longo do tempo. Um sinal é periódico em relação ao tempo (t) se o seu domínio contiver $t+T$, tal que $V(t) = V(t + T)$, onde T é o período da função $V(t)$, portanto intervalo de tempo durante o qual a função repete seu comportamento.

A transição do comportamento de $V(t)$ com o tempo, ou seja, sua frequência, satisfaz a relação $f_0 = 1/T$.

Os sinais senoidais também são comumente caracterizados por outros parâmetros, como a amplitude pico a pico, que corresponde à variação entre o valor de amplitude do ciclo negativo à amplitude do ciclo positivo, amplitude pico a pico (V_{pp}). Nesse caso, $V_{pp} = 2 \cdot A$, onde A é a amplitude do sinal.

Em muitas circunstâncias, trabalha-se com a amplitude da raiz média quadrada (RMS), obtida por $V_{RMS} = \frac{1}{\sqrt{2}} A$.

Os circuitos lineares alimentados por um sinal senoidal respondem também com um sinal senoidal, de mesma frequência, porém com fase e amplitude alterada. Além disso, a linearidade assegura que os circuitos lineares alimentados por vários sinais senoidais de entrada X_1, X_2, \dots, X_n apresenta uma resposta igual à soma das saídas individuais Y_1, Y_2, \dots, Y_n , tal que Y_i é resposta à entrada X_i . Matematicamente, $Y(t) = Y_1(t) + Y_2(t) + \dots + Y_n(t)$, onde Y_i é resposta à entrada X_i . O comportamento não linear de canais de comunicações se configura como um dos fatores de produção de defeitos sobre os sinais a serem transmitidos.

Representação de sinais periódicos: série de Fourier

Todo sinal periódico pode ser representado como uma soma de sinais senoidais, definida pela expressão

$$S(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(nw_0 t) + b_n \sin(nw_0 t)]$$

, onde a_0 é o valor médio da função, a_n e b_n são os coeficientes da série de Fourier.

Os coeficientes da série de Fourier podem ser definidos pelas expressões, para $t=1, 2, \dots$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T V(t) \cos(nw_0 t) dt$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T V(t) \sen(nw_0 t) dt$$

A expressão da série de Fourier pode ser apresentada de forma compacta por

$$S(t) = C_0 + \sum_{n=1}^{\infty} C_n \cos(nw_0 t + \theta_n) \quad (1)$$

, onde $C_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}$ e $\theta_n = -\arctan\left(\frac{b_n}{a_n}\right)$, $t=1,2,\dots$

Analisando a expressão da série de Fourier na sua forma compacta, fica evidenciado que qualquer sinal periódico contém um valor constante C_0 , que independe da variação de frequência, chamado de componente DC.

Os termos da série dependentes da variação em frequência, $n.w_0$, possuem o valor mais baixo para $n=1$. Essa é a chamada frequência fundamental w_0 (frequência angular obviamente). As frequências múltiplas da frequência fundamental são chamadas de harmônicos.

A Figura 7 apresenta a representação do comportamento do sinal periódico $S(t)$ em uma janela de observação de 1 segundo. Apresenta também a representação da amplitude do sinal em função da frequência, $|S(f)|$.

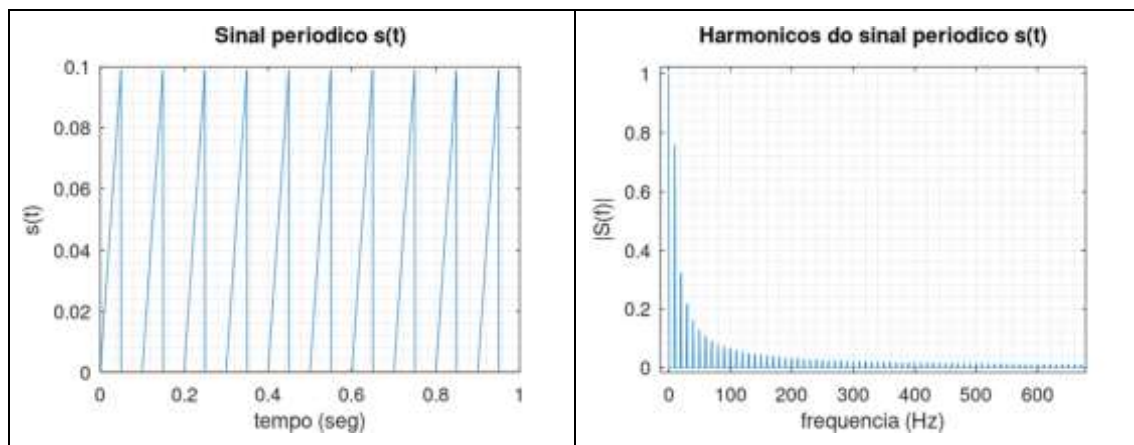


Figura 7 – (a) Sinal periódico $S(t)$ (b) Amplitude de $S(f)$

A figura evidencia que há um decaimento da amplitude do sinal nos harmônicos de mais alto valor. A análise desse comportamento é muito útil para

a eletrônica, a fim de projetar os circuitos, de modo a explorar as propriedades do sinal não somente no domínio do tempo, mas também explorá-las no domínio da frequência.

Representação de sinais não periódicos: transformada de Fourier

A representação em série de Fourier é útil para qualquer tipo de sinal, desde que se queira sua representação apenas no intervalo de 0 a T . Todo sinal arbitrário $S(t)$ pode ser representado por uma combinação linear de funções exponenciais em um intervalo T por

$$S(t) = \sum_{-\infty}^{\infty} F_n e^{-jnw_0 t}$$

$$, \text{ onde } F_n = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) e^{-jnw_0 t} dt, \quad t=1, 2, \dots$$

A expressão da fórmula é apenas uma maneira diferente de expressar a série de Fourier utilizando a exponencial complexa $e^{jw_0 t}$. O termo F_n expressa a amplitude espectral (da frequência) associada a cada componente de frequência nw_0 .

Matematicamente, pode-se definir que quando o intervalo de observação de um sinal de qualquer natureza tende a infinito, o comportamento espectral – ou seja, no domínio da frequência –, pode ser definido pela expressão

$$F(w) = \int_{-\infty}^{\infty} S(t) e^{-j\omega t} dt$$

, chamada de Transformada de Fourier, também chamada de integral de Fourier, cuja representação simplificada é $\mathfrak{F}[S(t)] = F(w)$.

Assim, a observação do comportamento espectral de um sinal, isto é, como varia de acordo com as frequências que o compõem, pode ser aplicada tanto a sinais periódicos quanto a sinais não periódicos.

A Transformada de Fourier possui algumas propriedades úteis à análise de sinais no domínio da frequência:

a. Linearidade:

$$\alpha x(t) = \alpha y(t), \text{ onde } y(t) = f[x(t)]$$

$$f(x_1) = y_1, f(x_2) = y_2 \rightarrow f(x_1 + x_2) = y_1 + y_2$$

- b. Escalonamento: o sinal comprimido no tempo se expande em frequência
- c. Simetria nas funções pares:
 $\mathfrak{F}[x(t)] = X(f), \mathfrak{F}\{\mathfrak{F}[x(t)]\} = x(t)$
- d. Deslocamento em t de t_0 : implica deslocamento em f de $w.t_0$
- e. Deslocamento em w de w_0 : implica atraso em t de $t.w_0$

Algumas transformadas de Fourier são muito utilizadas nas comunicações porque apresentam características que explicam o comportamento não somente da relação entre o sinal transmitido e os sinais indesejáveis presentes em qualquer sistema, tais como interferências e ruídos, como também entre o sinal transmitido e a resposta do canal de comunicações.

Sinal de pulso retangular

O pulso retangular pode ser definido por

$$p(t) = \begin{cases} A, & 0 \leq t \leq T \\ 0, & T < t \end{cases}$$

, onde T é a largura do pulso.

A Figura 8 apresenta um exemplo de pulso retangular, a partir da origem $t=0$. O sinal pode ser deslocado no tempo, atrasado de Δt . A correspondente transformada de Fourier, conforme a propriedade c, será deslocada em frequência.

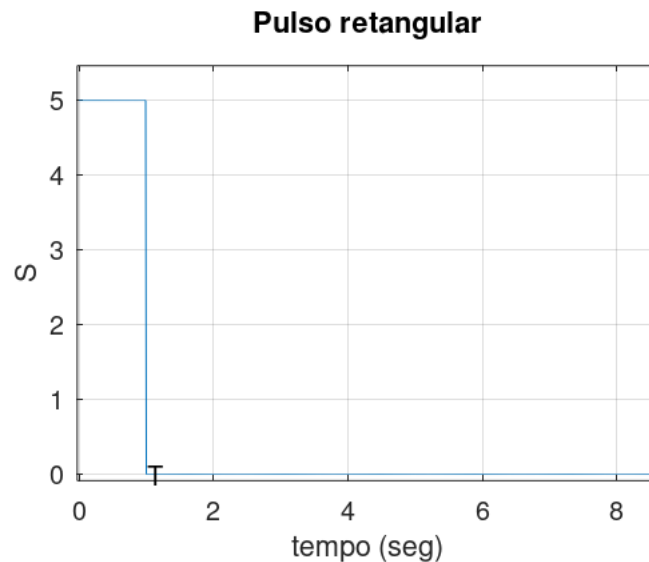


Figura 8 – Pulso retangular $p(t)$

A figura apresenta a Transformada de Fourier do sinal pulso retangular. O sinal obtido é intitulado função sinc(x), definida por $\text{sinc}(x) = \text{sen}(x)/x$. A Transformada do pulso retangular é dada por $\mathfrak{F}[p(t)] = P(w) = A.T \frac{\text{sen}(wT)}{2}$.

Observe que a largura do primeiro zero da função é dada pela frequência igual ao inverso da duração do pulso ($1/T$). Os demais zeros são observados em múltiplos da frequência fundamental.

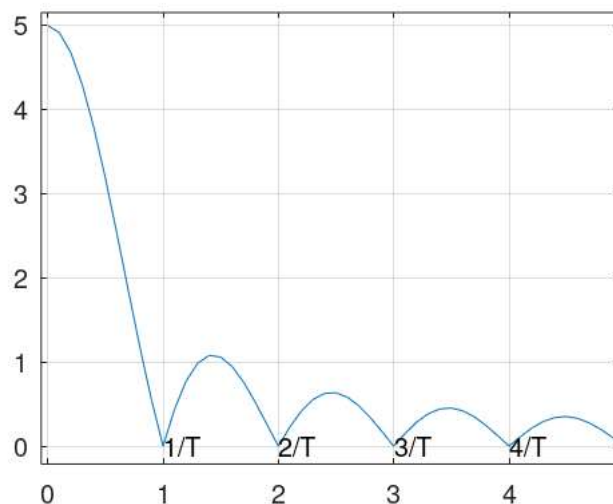


Figura 9 – Transformada de Fourier do pulso retangular

Analisando a expressão, não é difícil verificar que quando a largura do pulso tende a 0 seg, o primeiro zero da transformada do sinal tende a infinito, ou seja, a resposta de frequência tende a ser constante.

A Figura 10 apresenta três pulso retangulares com diferentes larguras.

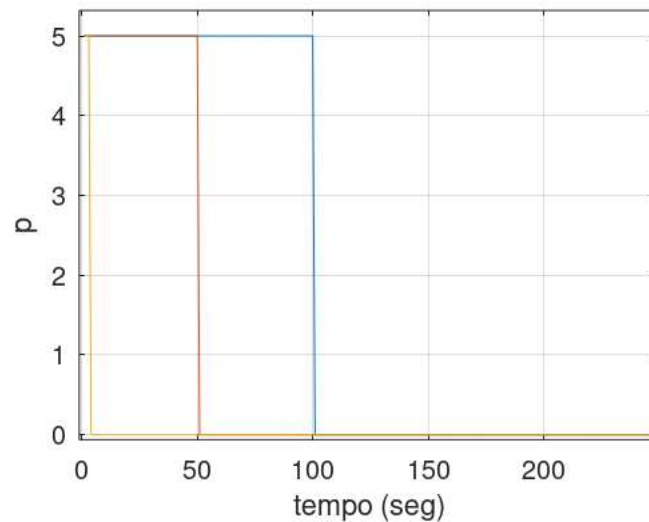


Figura 10 – Pulsos retangulares com larguras $T_2 > T_1 > T_0$

A Transformada de Fourier do sinal de pulso de largura T_0 tem comportamento espectral cuja frequência fundamental é maior do que a frequência dos demais sinais. A Figura 11 apresenta as respostas no domínio da frequência de cada um dos pulsos.

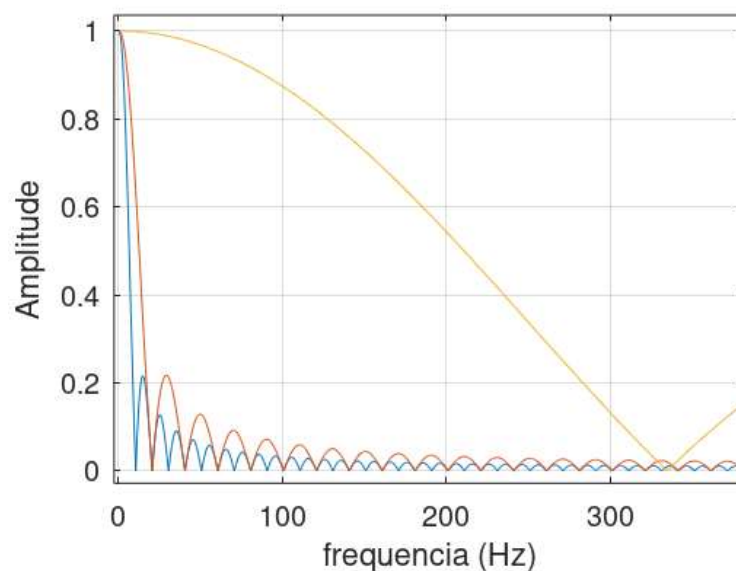


Figura 11 – Transformada de Fourier de pulsos retangulares com diferentes larguras

No limite, a função delta de Dirac, $\delta(t)$, definida por

$$\delta(t) = \begin{cases} 1, & t = 0 \\ 0, & t \neq 0 \end{cases}$$

Tem a resposta de frequência igual a

$$S(f) = 1$$

, conforme mostra a Figura 12.

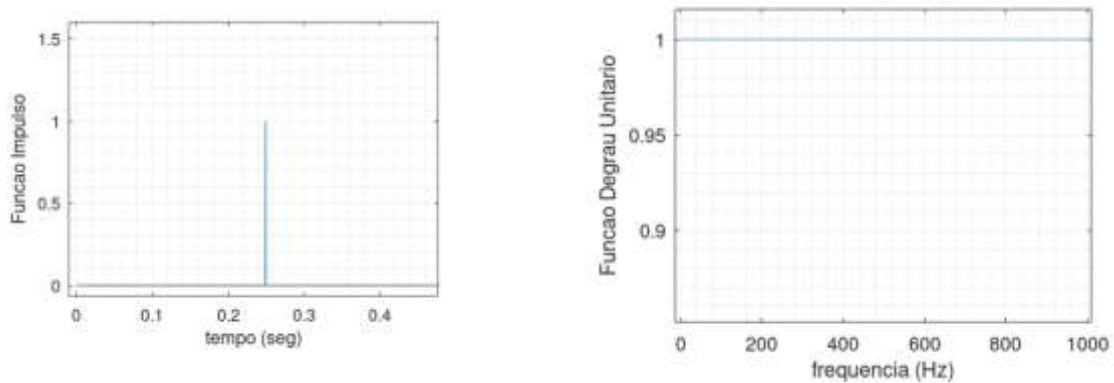


Figura 12 – Função delta de Dirac, $\delta(t)$ e sua resposta de frequência constante

A transformada de $\delta(t)$ é chamada de degrau unitário. O significado da resposta é que $\delta(t)$ apresenta componentes de frequência em todo o espectro com mesma amplitude.

Energia – Teorema de Parseval, média e potência de sinais

Para um sinal $S(t)$ real, analógico, a energia associada ao sinal é dada por

$$E = \int_{-\infty}^{\infty} S^2(t) dt.$$

A energia do sinal discreto $S(n)$ resultante da discretização de $S(t)$ pode ser obtida por

$$E = \sum_n S^2(n)$$

Para um sinal real $S(t)$ pode-se demonstrar que os sinais $S(t)$ e $S(t-\tau)$, ou seja, o sinal com um retardo ou *delay*, possuem a mesma energia.

A média de $S(t)$ é dada por

$$\bar{S}(t) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} S(t) dt.$$

Para o sinal discreto pode ser calculada por

$$E = \frac{1}{N} \sum_n S(n)$$

A potência média de $S(t)$ é dada por

$$\bar{P}_S = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} S^2(t) dt.$$

É comum a utilização de potência em decibéis (dB), dada por

$$(\bar{P}_S)_{dB} = 10 \log (\bar{P}_S).$$

Para o sinal discreto pode ser calculado por

$$P = \frac{1}{N} \sum_n S^2(n)$$

$$P_{dB} = 10 \log \left[\frac{1}{N} \sum_n S^2(n) \right]$$

1.3 ELEMENTOS DOS SISTEMAS DE COMUNICAÇÕES

Sinal da fonte, transdutores e sinais elétricos

A Figura 13 apresenta o diagrama em blocos que proporciona uma visão mais geral do processo de comunicações desde a fonte até o destino: transdutor de entrada, sistema propriamente dito e transdutor de saída.

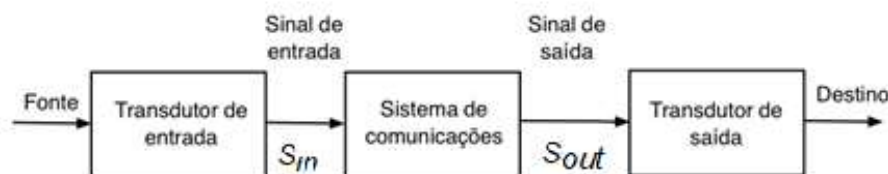


Figura 13 – Sistema Fonte-Sistema de Comunicações-Destino

Boa parte dos sinais que precisam ser tratados se originam de fenômenos cuja energia não é elétrica. Por exemplo, os sons de um modo geral, imagens etc. Os sinais que se apresentam em outras formas de energia $S(t)$ passam por dispositivos chamados de transdutores, que convertem uma forma de energia em outra. Os sinais são equivalentes, embora se manifestem em um tipo diferente de energia. São exemplos de transdutores muito comuns os microfones e as câmeras de vídeo.

O sinal S_{in} é o sinal de entrada no sistema de comunicações, após passar pelo transdutor, ou seja, na sua manifestação elétrica, tipicamente variante no tempo e analógico. A Figura 14 apresenta um sinal de voz captado por microfone.

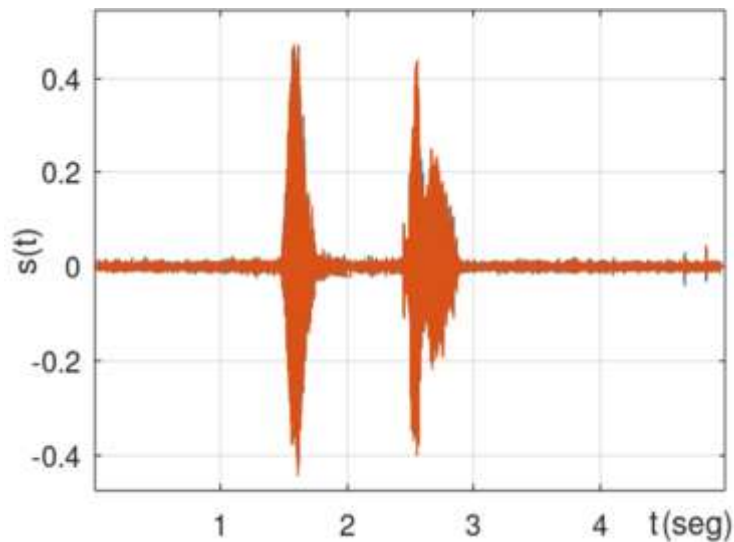


Figura 14 – Sinal analógico elétrico de áudio captado por microfone

Nem sempre o sinal a ser transmitido através do meio de comunicações tem origem de uma fonte externa, que precisa passar pelo transdutor antes de ser transmitido. Por exemplo, dados armazenados em uma plataforma computacional, portanto na forma discreta, em sua representação binária, podem precisar ser transmitidos em sistemas de comunicações móveis. O sinal S_{in} pode ser discreto ou não.

O sistema de comunicações transformará o sinal de entrada, produzindo o sinal de saída S_{out} , o qual passará por um transdutor de saída antes de ser entregue ao destino.

Visão de alto nível do sistema de comunicações

A Figura 15 apresenta a visão de mais alto nível do sistema de comunicações. Compreende o transmissor, o canal de comunicações e o receptor.

O transmissor processa o sinal de entrada utilizando componentes eletrônicos, gerando um sinal transmitido $S_{tx}(t)$. Processa a entrada para produzir o sinal transmitido condicionado para o canal de comunicações. O processamento do sinal para a transmissão quase sempre envolve filtragem, modulação e codificação. O transmissor busca compensar as imperfeições introduzidas no sinal de entrada pelo comportamento do meio.

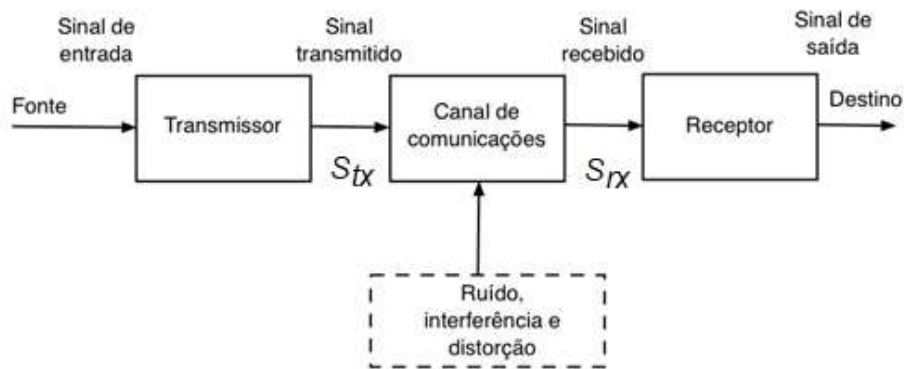


Figura 15 – Visão de alto nível do sistema de comunicações

O sinal da saída do transmissor atravessa o canal de comunicações até o receptor. O canal pode ser um cabo coaxial, um par trançado, uma fibra óptica, todos classificados como meios confinados, ou o espaço aéreo, usando radiofrequências, frequências de radiocomunicações, classificado como meio não confinado. Os sistemas de comunicações móveis utilizam o espectro de radiofrequências para transmissão do sinal produzido pelo transmissor. Após atravessar o canal, o sinal que contém a mensagem é recebido pelo receptor.

O canal de comunicações opera como um filtro sobre o sinal de saída do transmissor. Nesse sentido, possui uma função de transferência ou resposta de frequência $H(f)$, tal que

$$Y(f) = X(f) \cdot H(f).$$

No domínio do tempo,

$$y(t) = x(t) * h(t)$$

, onde $*$ representa a operação de convolução.

A Figura 16 ilustra a relação do sinal transmitido com o canal, produzindo o sinal recebido S_{rx} .

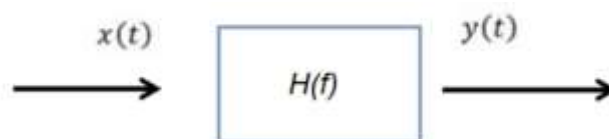


Figura 16 – Resposta de frequência do canal de comunicações

Considerando o que foi discutido em relação ao papel do transmissor, não é difícil presumir que o comportamento ideal da resposta do transmissor no domínio da frequência seria $\frac{1}{H(f)} = H^{-1}(f)$, tal que o sinal da fonte $Y(f) = X(f) \cdot H^{-1}(f) \cdot H(f) = X(f)$, ou seja, o sinal na entrada do receptor seria exatamente igual ao sinal da fonte.

Uma classificação do canal de comunicações se baseia no sentido da transmissão. O sistema pode admitir a transmissão pelo canal em um sentido, caracterizando uma comunicação chamada de *simplex*; transmissão em ambos os sentidos, ao mesmo tempo, chamada de *duplex* ou *full-duplex*; e transmissão em ambos os sentidos, em cada instante de tempo, chamada de *half-duplex*. Essa caracterização é importante para o projeto dos elementos terminais de recepção e transmissão. A maioria dos equipamentos hoje reúne a capacidade tanto de transmissão quanto de recepção, separando as funcionalidades como estágios distintos do mesmo equipamento, razão pela qual são chamados de transceptores. A Figura 16 ilustra a organização desse tipo de elemento.

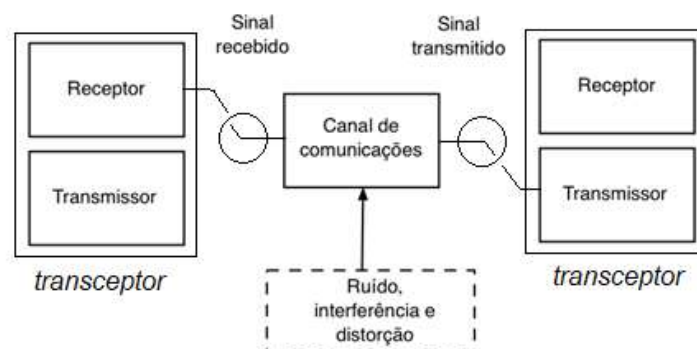


Figura 16 – Transmissor + Receptor = Transceptor ou *transceiver*

O receptor opera sobre o sinal recebido, em preparação para entregar o sinal ao transdutor de saída. A operação de recepção inclui amplificação, para compensar as perdas na transmissão, demodulação e decodificação. A filtragem também é uma importante função que geralmente está incluída no receptor.

Efeitos indesejados sobre o sinal transmitido

Vários efeitos indesejados modificam o sinal durante a transmissão. A atenuação reduz a potência do sinal transmitido. Outras perturbações são: distorção, interferência e ruído. Embora a contaminação possa ocorrer em

qualquer ponto, a convenção padrão é modelar esses efeitos no canal de comunicações.

Distorção é a perturbação da forma de onda causada pela resposta imperfeita do sistema em relação ao sinal desejado. Diferentemente da interferência e do ruído, a distorção desaparece quando o sinal é desligado. Se o canal tem uma resposta de distorção linear, então a distorção pode ser corrigida, ou reduzida, com a ajuda de filtros especiais chamados equalizadores.

Interferência é a contaminação por sinais externos provocada por fontes humanas – outros transmissores, linhas de potência e maquinaria etc. Interferência quase sempre ocorre em sistemas de rádio. Interferência de radiofrequência (RF) também aparece em cabos por efeito de radiação. Filtragem adequada pode remover interferências que ocupam bandas diferentes do sinal desejado.

Ruídos são sinais elétricos aleatórios e imprevisíveis produzidos por processos naturais internos e externos ao sistema. Quando variações aleatórias se sobrepõem ao sinal que contém informação, a mensagem pode ser parcialmente corrompida ou totalmente mascarada. O ruído constitui uma limitação fundamental do sistema.

Para efeito de simulação, o ruído, $n(t)$, é tipicamente aditivo, ou seja, se sobrepõe ao sinal $x(t)$ que transporta a mensagem produzindo uma saída $y(t)$, de modo que

$$y(t) = x(t) + n(t).$$

A medida do ruído em relação à informação é definida pela razão sinal ruído S/N ou SNR (*signal-to-noise ratio*).

Estatisticamente, o ruído nas comunicações manifesta comportamento aleatório com distribuição estatística gaussiana (normal). Além disso, possui componentes em todo o espectro de frequências, característica que o classifica como ruído branco.

A Figura 17 ilustra um modelo para simular o comportamento do ruído nos sistemas de comunicações.

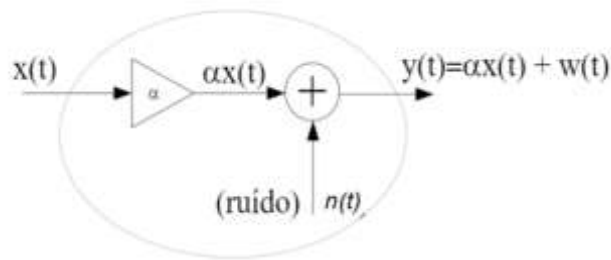


Figura 17 - Modelo de ruído branco aditivo ao sinal transmitido

Na figura, a constante α representa o ganho que o transmissor precisa assegurar para buscar uma SNR elevada de modo a compensar as perdas durante a transmissão.

Nas comunicações existem duas limitações físicas fundamentais: largura de banda e ruído. São inerentes ao sinal que transporta a mensagem e ao canal de comunicações. O conceito de largura de banda se aplica aos sinais e sistemas. Quando o sinal varia rapidamente com o tempo, as frequências que o compõem são ampliadas ou o espectro de frequências é largo. Similarmente, a capacidade do canal acompanhar as variações do sinal reflete-se na sua resposta em frequências ou largura de banda do canal. Consequentemente, o canal de comunicações possui uma largura de banda limitada B , que limita a variação do sinal.

O ruído estabelece uma segunda limitação na transmissão da informação. O ruído é inevitável. O movimento aleatório das cargas elétricas gera uma corrente ou tensão aleatórias, chamadas de ruído térmico. O ruído térmico é ordinariamente muito pequeno e imperceptível normalmente, no entanto em baixos valores de razão sinal ruído o problema pode se tornar muito severo.

Considerando essas limitações físicas, *Shannon* estabeleceu que a taxa de transmissão da informação não pode exceder a capacidade do canal, dada por

$$C = B \cdot \log\left(1 + \frac{S}{N}\right)$$

Visão detalhada do sistema de comunicações

A Figura 18 apresenta a visão detalhada dos blocos principais que compõem o transmissor. Os componentes principais são: o estágio de conversão

analógico digital, se o sinal de entrada for um sinal analógico; seguido pelo codificador da fonte, codificador do canal, modulador e estágio de RF.

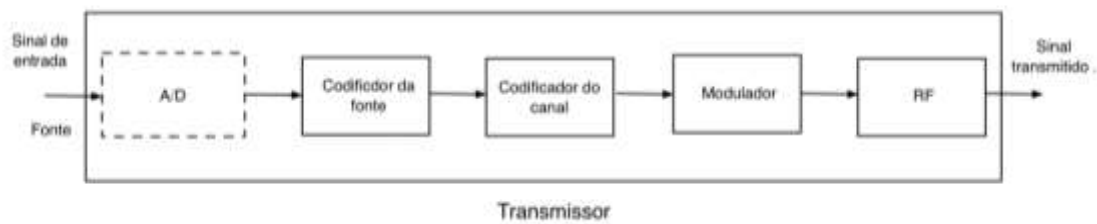


Figura 18 – Diagrama em blocos do transmissor

A fonte gera mensagens que têm a forma de funções contínuas de tempo ou são fluxos de símbolos discretos. Um exemplo de mensagem contínua em o tempo é uma forma de onda que caracteriza a voz. Neste caso, para enviar tal mensagens através do sistema de comunicação digital, o sinal de voz contínuo deve ser discretizada no tempo e suas amostras devem ser quantizadas.

Conversor A/D (codificador de voz)

Para cumprir este requisito, um conversor analógico-digital (A/D) amostra o sinal analógico na frequência de amostragem f_A e um bloco binário determinado pela amplitude da amostra é atribuído a cada amostra. Tal uma operação é realizada, por exemplo, pelo codificador PCM (*Pulse Code Modulation*) na telefonia padrão.

O codificador PCM amostra o sinal analógico do microfone na frequência $f_A = 8 \text{ kHz}$ e atribui sequências de 8 bits a cada amostra, usando um padrão não linear. Devido à quantização realizada com a precisão selecionada, uma certa parte da informação contida no sinal amostrado é perdida. No caso de sinais de voz, um quantizador não linear que atribui sequências para as amostras de sinal podem ser consideradas como um codificador de fonte. A amostra pode ser de 8 bits leva em consideração as propriedades dinâmicas do ouvido humano. A Figura 19 apresenta o diagrama em blocos do codificador PCM.

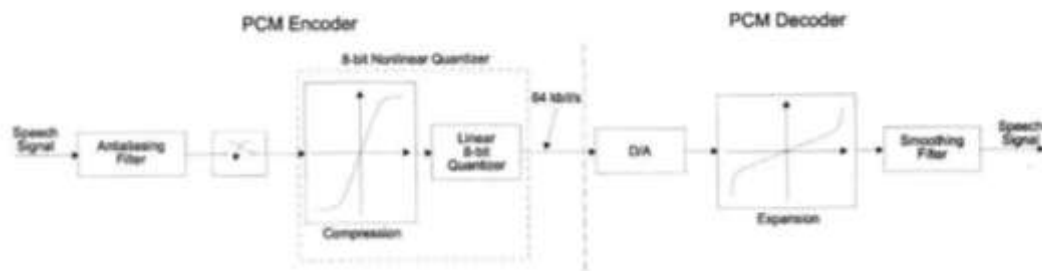


Figura 19 - Codificador PCM

Codificador da fonte

No caso de aplicações para voz o conversor A/D contém também o codificador da fonte. Nem sempre a fonte de mensagens gera um sinal analógico. Nesse caso a codificação dos símbolos discretos é necessária para a transmissão ser eficiente e confiável.

Um exemplo de uma fonte de mensagens discretas é um terminal de computador. Pode-se considerar os caracteres alfanuméricos gerados pelo terminal como as mensagens de origem. Eles são geralmente representados por blocos de 8 bits de acordo com o alfabeto ASCII amplamente utilizado.

Embora muito popular, o alfabeto ASCII não é uma representação eficiente dos caracteres alfanuméricos. Alguns caracteres ocorrem com muita frequência, os outros têm baixa taxa de ocorrência. Um bom codificador de fonte ajusta o comprimento das sequências binárias às propriedades estatísticas da origem da mensagem. Cada vez mais frequentemente, a compressão de dados é aplicada, o que permite a representação eficiente das mensagens geradas pela fonte.

A codificação do sinal da fonte é uma operação de processamento de símbolos para melhorar a comunicação quando a informação é digital ou pode ser aproximada na forma de símbolos discretos. Transforma uma mensagem digital em uma nova sequência de símbolos.

Modulador

Um modulador é um bloco que gera um sinal (uma onda portadora), cujos parâmetros como frequência, amplitude e/ou fase são funções do sinal aplicado à sua entrada. Como resultado da modulação, o sinal que transporta a informação é colocado na parte apropriada do espectro, com propriedades

espectrais adequadas para ser encaminhada pelo canal de comunicações. Esta é uma característica muito importante em sistemas de comunicação móvel. As características espectrais do sinal modulado devem minimizar a distorção dos sinais transmitidos por usuários na vizinhança do espectro. Devem também garantir o maior número possível de usuários na faixa de frequência atribuída. O espectro eletromagnético é um recurso valioso e limitado.

Muitos sistemas modernos operam com comunicações móveis e novos serviços são oferecidos a cada dia no mercado. Novos equipamentos e sistemas trabalhando em faixas de frequência cada vez mais altas requerem técnicas de modulação cada vez mais sofisticadas. A distribuição do espectro eletromagnético entre os sistemas de rádio é objeto de negociações e acordos.

A modulação envolve duas formas de onda: o sinal modulante, que representa a mensagem; e a portadora que ajusta o sinal modulante para ser transmitido. O modulador altera sistematicamente a onda portadora com as variações do sinal modulante, ou seja, com as variações da mensagem. A onda modulada transporta a informação da mensagem. A modulação deve ser, em princípio, uma operação reversível, executada na demodulação.

Existem vários benefícios para a comunicação quando o transmissor modula a mensagem: (a) assegurar a transmissão eficiente; (b) superar as limitações de hardware; (c) reduzir ruído e interferência; (d) definir a frequência; (e) multiplexação de sinais.

a. Assegurar transmissão eficiente

A transmissão de sinais sobre distâncias longas sempre envolve ondas eletromagnéticas, com ou sem meios confinados para guiá-las. A eficiência de qualquer método de transmissão depende da frequência do sinal a ser transmitido. A transmissão depende de antenas cujas dimensões precisam ter pelo menos $1/10$ do comprimento de onda do sinal. A modulação permite utilizar antenas com dimensões razoáveis. O comprimento de onda é definido pela relação $\lambda = c/f$, onde c é a velocidade da luz no vácuo (300.000 km/seg) e f é a frequência da onda.

b. Superar as limitações de hardware

O projeto de um sistema de comunicações pode ser limitado pelo custo e pela disponibilidade de hardware, cujo desempenho depende da frequência envolvida. A modulação permite que o projetista posicione o sinal que evita as limitações de hardware. Uma questão particular se refere à largura de banda fracional, definida como a banda absoluta dividida pelo centro da frequência ($\Delta f = B/f_c$). Os custos e as complicações de implementação são minimizados se a banda fracional é colocada entre 1 a 10%.

c. Reduzir ruído e interferência

Uma maneira de reduzir o ruído e a interferência é aumentar a potência do sinal para blindar a contaminação. Entretanto, aumentar a potência é caro e pode prejudicar o equipamento. Uma alternativa é aplicar algum método de modulação. Essa propriedade é chamada de redução de ruído em banda larga porque requer que a largura de banda seja muito maior do que a largura de banda do sinal modulante. Modulação em banda larga permite que o projetista amplie a largura de banda para reduzir o ganho de potência aplicado sobre o sinal modulante.

d. Definir a frequência de transmissão

Quando o usuário sintoniza o rádio está selecionando um dentre os vários sinais recebidos em um instante. Cada estação transmite em uma onda portadora de frequência específica. A estação desejada é separada das demais por filtragem.

e. Multiplexação de sinais

A modulação proporciona a transmissão de vários sinais modulantes em uma onda portadora. No destino, um circuito de demultiplexação permite regenerar cada um dos sinais.

O acesso múltiplo ao meio de transmissão é um assunto intimamente relacionado ao canal propriedades e as modulações aplicadas. O acesso múltiplo pode ser realizado por diferentes métodos. A primeira é a divisão do espectro atribuído ao sistema em um certo número de sub-bandas que são usadas por usuários diferentes (principalmente, apenas se forem ativo). Esse tipo de acesso ao canal é chamado de Acesso Múltiplo por Divisão de Frequência (FDMA). Em outra abordagem, os usuários compartilham o mesmo

espectro, mas dividem o tempo entre eles. Essa abordagem é chamada de Acesso Múltiplo por Divisão de Tempo (TDMA). Os usuários também podem gerar sinais que ocupam toda a largura de banda e tempo do sistema; no entanto, devido à aplicação de sequências de sinal específicas (sequências de código) exclusivamente caracterizando cada usuário, o receptor é capaz de extrair o sinal do usuário selecionado da soma dos sinais emitidos por diferentes usuários. Este método de acesso é chamado de Código Acesso Múltiplo por Divisão (CDMA). Combinações dos três múltiplos acima mencionados métodos de acesso são possíveis.

A codificação de canal é justamente o processo através do qual a redundância anteriormente citada é adicionada à informação de modo a permitir a detecção e correção de erros. O termo “redundância controlada” está relacionado à restrição das possíveis sequências de bits de informação na recepção. Dependendo do número de bits adicionados, os códigos de canal podem permitir a correção de erros na transmissão ou somente a detecção dos erros ocorridos. Ambos têm como objetivo minimizar o erro de decisão sobre os bits transmitidos. Existem duas grandes famílias de códigos detectores e corretores de erros: os códigos de bloco e os convolucionais. Existem vários algoritmos de codificação/decodificação para códigos de bloco e convolucionais.

Estágio de RF

O bloco RF do transmissor opera na faixa de frequências de rádio e amplifica o sinal de rádio ao nível requerido. A largura de banda do sinal depende da modulação selecionada e o método de acesso múltiplo aplicado.

Uma limitação frequentemente encontrada para o amplificador de RF aplicado em um sistema de comunicação móvel é o seu consumo de energia. Por exemplo, um telefone celular deve utilizar o mínimo de energia possível para prolongar o tempo entre a recarga subsequente da bateria. Por esta razão, o amplificador de RF deve ter grande dinâmica e deve funcionar na faixa não linear de suas características. Este fato tem sérias implicações para a escolha das modulações digitais aplicadas na sistemas de comunicação móvel.

Até agora, principalmente modulações digitais, caracterizadas por uma onda envelope constante ou de baixa dinâmica, foram aplicados a fim de

minimizar a não linearidade distorções causadas pelas características do amplificador de RF.

Em sistemas de comunicação móvel, o transmissor emite o sinal para o espaço usando a antena. As propriedades do canal dependem fortemente do tipo de transmissor e antenas receptoras, em particular em sua diretividade e ganhos. Os parâmetros da antena determinam o alcance do sistema e seu desempenho.

Visão completa do sistema de comunicações

A visão inteira do sistema de comunicações contempla o canal de comunicações e o receptor. O canal de comunicações contempla os efeitos indesejados como distorção, interferência e ruído.

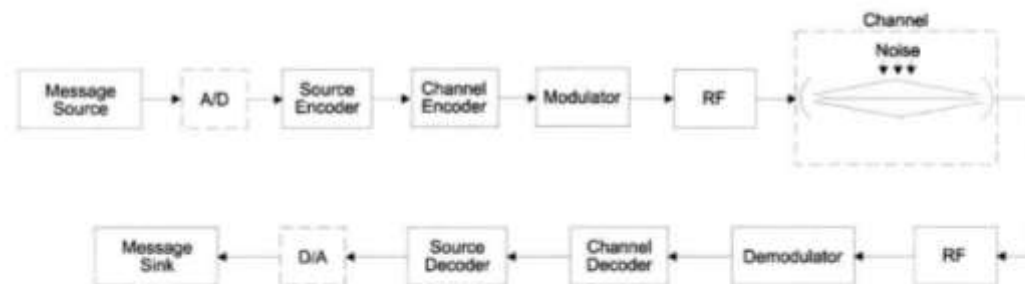


Figura 20 – Visão detalhada do sistema de comunicações

Os processos executados no receptor são combinados com aqueles que ocorrem no transmissor. Após amplificação e filtragem no *front-end* de RF, o sinal recebido é demodulado. O último processo depende fortemente da modulação digital aplicada e das propriedades do canal. O custo aceitável do receptor também tem impacto no tipo de demodulador aplicado. Em geral, o demodulador extrai o pulso sequência do sinal modulado recebido da parte de RF. Com base nesses pulsos, o detector toma as decisões sobre os símbolos de dados transmitidos e transforma em sequências binárias.

O decodificador de canal, usando os bits redundantes introduzidos pelo codificador de canal e às vezes aplicando informações adicionais sobre a confiabilidade dos símbolos recebidos, tenta encontrar a sequência de código e, com base nela, uma sequência de informação binária. Trata-se da decodificação da fonte.

Tendo uma sequência detectada um padrão diferente das possíveis sequências, o decodificador de canal “procura” dentre elas a sequência que mais se assemelha à sequência detectada. Essa semelhança é obtida através da correta utilização de critérios de decisão, sendo que os mais conhecidos são o critério do máximo a posteriori - MAP (*Maximum-a-posteriori*) e o de máxima verossimilhança - ML (*Maximum Likelihood*).

Na última etapa de recepção, as amostras recebidas são decodificadas, convertidas em um processo de conversão D/A e alimentadas através do amplificador e de um alto-falante para o coletor de mensagens - o ouvido do usuário, no caso de transmissão de voz.