

# Capítulo I – Introdução

Neste texto são apresentados os princípios gerais necessários à compreensão da área da Engenharia Elétrica denominada Comunicação Digital. A Comunicação Digital consiste na transmissão de informação em forma digital a partir de uma fonte geradora da informação a ser transmitida até um ou mais destinatários. O termo “digital” refere-se ao fato de que toda informação a ser transmitida em um sistema digital é transformada em um conjunto de valores discretos passíveis de serem representados por dígitos numéricos.

Entre fonte e destinatário, ou seja, entre transmissor e receptor, encontra-se o canal de transmissão. O canal de transmissão é o meio físico através do qual a informação é transportada, meio físico este que pode ser eletromagnético, acústico, ótico, etc ... As características do canal de transmissão afetam de maneira crucial o projeto do transmissor/receptor digital e devem ser criteriosamente avaliadas para o sucesso do sistema como um todo. Típico exemplo desta situação são os transmissores/receptores digitais utilizados em telefonia celular: Existe todo um cuidadoso critério no projeto de tal sistema de forma que as múltiplas reflexões e reverberações da onda eletromagnética no meio urbano sejam compensadas, reflexões estas que, em caso contrário, tornariam os dígitos ininteligíveis ao receptor.

## 1.1 Comunicação Analógica

Antes de tratarmos de Comunicação Digital propriamente dita, é instrutivo brevemente discutirmos alguns conceitos básicos de Comunicação Analógica a título de posteriormente podermos efetuar comparações entre as duas.

A Figura 1.1 mostra o diagrama de blocos simplificado de um sistema de comunicações analógico.

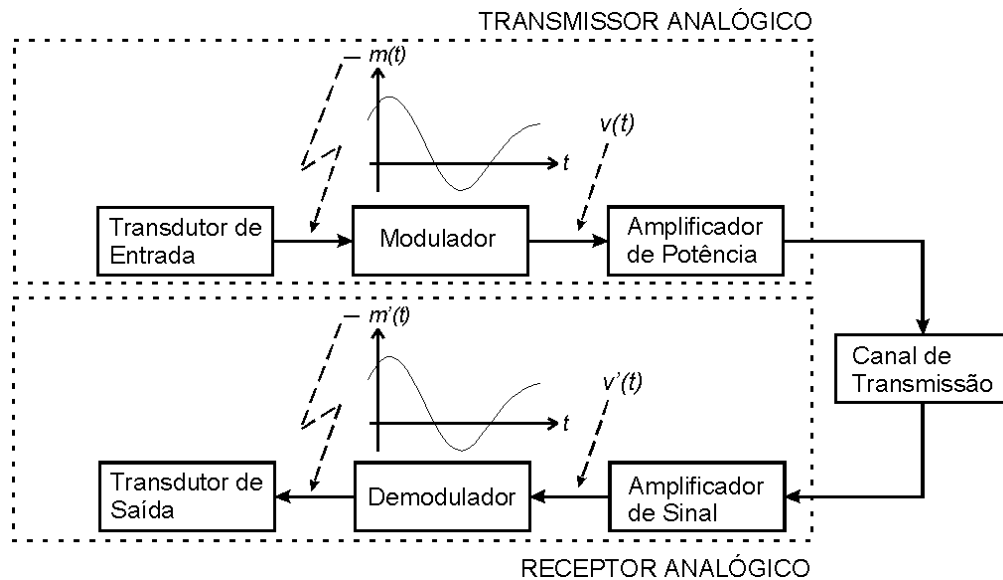


Figura 1.1: Diagrama de blocos simplificado de um sistema de comunicações analógico.

O Transdutor de Entrada é um dispositivo que converte uma grandeza física qualquer em um sinal elétrico. Por exemplo, no caso de o sistema mostrado na Figura 1.1 representar um transmissor/receptor de rádio, o Transdutor de Entrada pode ser um microfone: A grandeza física pressão acústica movimentada o diafragma do microfone o qual gera um sinal elétrico  $m(t)$  correspondendo à intensidade da pressão instantânea da onda sonora que chega ao microfone. Para um sistema analógico, o sinal  $m(t)$  é forçosamente um sinal contínuo.

O Modulador é um dispositivo que executa o processo denominado Modulação. Modulação é o processo através do qual um sinal  $v(t)$  tem alguma característica variada de acordo com o valor instantâneo do sinal modulante  $m(t)$ . Usualmente  $v(t)$  é senoidal e de frequência  $f$  muito maior que a da componente espectral de maior frequência  $f_M$  no espectro de  $m(t)$ . O sinal  $v(t)$  é denominado de portadora [Kennedy] e pode ser representado por

$$v(t) = V_m \cos(2\pi ft + \phi) \quad (1.1)$$

onde  $V_m$  é o valor instantâneo de  $v(t)$ ,  $f$  é a frequência de  $v(t)$  e  $\phi$  é a fase de  $v(t)$  com relação a alguma referência. Qualquer uma destas três características ou parâmetros de  $v(t)$  – valor instantâneo  $V_m$ , frequência  $f$ , fase  $\phi$  – podem ser variados dando origem respectivamente a sistemas analógicos AM (Amplitude Modulada), FM (Frequência Modulada), PM (Fase Modulada – *Phase Modulation*). Isto é,  $V_m = V_m(t) = f(m(t))$ ,  $f = f(t) = g(m(t))$  e  $\phi = \phi(t) = h(m(t))$  onde  $f(\cdot)$ ,  $g(\cdot)$  e  $h(\cdot)$  são funções contínuas e analíticas. Mais adiante veremos que em Comunicação Digital mais de um parâmetro de  $v(t)$  podem ser simultaneamente variados dando origem a formas de modulação mais elaboradas.

A translação em frequência resultante do processo de modulação [Carlson], a qual eleva o espectro do sinal em banda-base de  $m(t)$  para as vizinhanças da frequência  $f$ , permite que a informação contida em  $m(t)$  seja transmitida para o meio físico do canal através de irradiadores de dimensão física praticável. Isto ocorre porque  $f$  é muito maior que  $f_M$  e portanto  $v(t)$  necessita de um irradiador muito menor do que o necessário para transmitir para o canal o sinal em banda-base  $m(t)$ .

Por exemplo, voltemos ao caso do transmissor/receptor de rádio. Neste caso o sinal  $m(t)$  é um sinal de áudio cuja largura de espectro abrange frequências de 30Hz a 15KHz. Suponhamos que queiramos aplicar  $m(t)$  diretamente ao canal de transmissão através de um irradiador (no caso, uma antena vertical). O menor tamanho físico  $\ell_{\min}$  para um irradiador eletromagnético que possibilita transmissão eficiente é  $\ell_{\min} = \lambda/4$ , onde  $\lambda$  é o comprimento de onda do sinal a ser transmitido [Kraus-E]. Assumindo que a antena em questão tenha uma banda passante suficiente para a largura do espectro de  $m(t)$ , o bom senso indica que o comprimento do irradiador seja calculado para a frequência central do espectro, i.e.,  $f_0 \approx 7.5\text{KHz}$ , cujo comprimento de onda é  $\lambda_0 = C/7.5\text{KHz} = 40\text{Km}$ , onde  $C = 3 \times 10^8$  m/s é a velocidade de propagação de um sinal eletromagnético no vácuo.

Portanto, a antena necessária para enviar  $m(t)$  ao ar teria um tamanho físico de  $\lambda_0/4 = 10\text{Km}$ , o que é obviamente impraticável. No entanto, um sinal  $v(t)$  com  $f = 7.5\text{MHz}$ , o qual implicitamente carrega consigo a informação do sinal  $m(t)$  através do processo de modulação, necessita de uma antena para enviá-lo ao ar cujo tamanho físico é de apenas 10m.

Ainda, a translação em frequência resultante do processo de modulação permite que um conjunto  $\{m_0(t), m_1(t), \dots, m_{K-1}(t)\}$  de  $K$  sinais em banda-base  $m_k(t)$ ,  $k = 0, 1, \dots, K-1$ , respectivamente originados por  $K$  distintas fontes geradoras, possa ser transmitido através do mesmo canal de transmissão sem que o sinal  $m_i(t)$  interfira no sinal  $m_j(t)$ ,  $i \neq j$ ,  $i, j = 0, 1, \dots, K-1$ .

Por exemplo, voltemos novamente ao caso do transmissor/receptor de rádio. Consideremos uma cidade na qual existem  $K$  emissoras na faixa comercial de AM cujo espectro abrange 535 KHz a 1605 KHz. A  $i$ -ésima e a  $j$ -ésima emissoras utilizam o mesmo canal de transmissão, cujo meio físico é o ar, para transportar respectivamente os sinais em banda-base  $m_i(t)$  e  $m_j(t)$  através dos sinais modulados em amplitude  $v_i(t) = g(m_i(t))\cos(2\pi f_i t + \phi_i)$  e  $v_j(t) = g(m_j(t))\cos(2\pi f_j t + \phi_j)$ , sendo  $g(\cdot) = 1 + (\cdot)$  para AM [Carlson]. Ambos sinais  $m_i(t)$  e  $m_j(t)$  ocupam o mesmo espectro de áudio (100Hz a  $f_M = 5\text{KHz}$  para a faixa de AM comercial [ITT]) mas o receptor distingue  $m_i(t)$  de  $m_j(t)$  porque  $f_i$  é suficientemente afastada de  $f_j$  (i.e.,  $|f_i - f_j| > 2f_M$  [Taub]). Assim, quando sintonizamos o dial de um receptor AM na frequência  $f_i$  do espectro da faixa de AM comercial estamos ouvindo a programação  $m_i(t)$  da  $i$ -ésima emissora, e quando sintonizamos o dial de um receptor AM na frequência  $f_j$  estamos ouvindo a programação  $m_j(t)$  da  $j$ -ésima emissora. Portanto o conjunto de  $K$  sinais em banda-base  $\{m_0(t), m_1(t), \dots, m_{K-1}(t)\}$  encontra-se multiplexado em frequência (FDM – *Frequency Division Multiplex*) [Carlson] no mesmo canal de transmissão.

Voltando à Figura 1.1, o Amplificador de Potência eleva o nível de potência do sinal  $v(t)$  de forma que o sinal recebido no Receptor tenha um nível suficientemente alto para sobrepujar a degradação decorrente das interferências e ruído inerentes ao Canal de Transmissão. É importante lembrar que qualquer canal de transmissão prático introduzirá os efeitos indesejáveis de ruído e/ou interferências.

O Amplificador de Sinal é um amplificador de baixo ruído que possui um filtro passa-banda centrado na frequência  $f$  do sinal  $v(t)$ . O objetivo principal do Amplificador de Sinal é eliminar sinais interferentes e reduzir o nível de ruído pelo efeito de corte no espectro do ruído efetuado pelo filtro passa-banda.

O Demodulador recupera o sinal  $m(t)$  através do processo denominado demodulação [Carlson]. Em um sistema analógico ideal o sinal demodulado  $m'(t)$  pode ser aproximado por  $m'(t) = G m(t - \tau)$ , onde  $G$  é uma constante de ganho e  $\tau$  é um atraso no tempo devido às constantes de tempo intrínsecas ao Transmissor, Canal de Transmissão,

Amplificador de Sinal e Demodulador. No caso de um Receptor AM, o Demodulador é um simples Detetor de Envelope [Carlson].

O Transdutor de Saída é um dispositivo que converte o sinal elétrico  $m'(t)$  em uma grandeza física qualquer. Por exemplo, no caso de o sistema mostrado na Figura 1.1 representar um transmissor/receptor de rádio, o Transdutor de Saída pode ser um alto-falante: O sinal elétrico  $m'(t)$  movimenta o diafragma do alto-falante o qual gera uma onda acústica cuja intensidade da pressão instantânea corresponde ao sinal  $m'(t)$ .

## 1.2 Comunicação Digital

A Figura 1.2 mostra o diagrama de blocos simplificado e os elementos básicos de um sistema de comunicações digital.

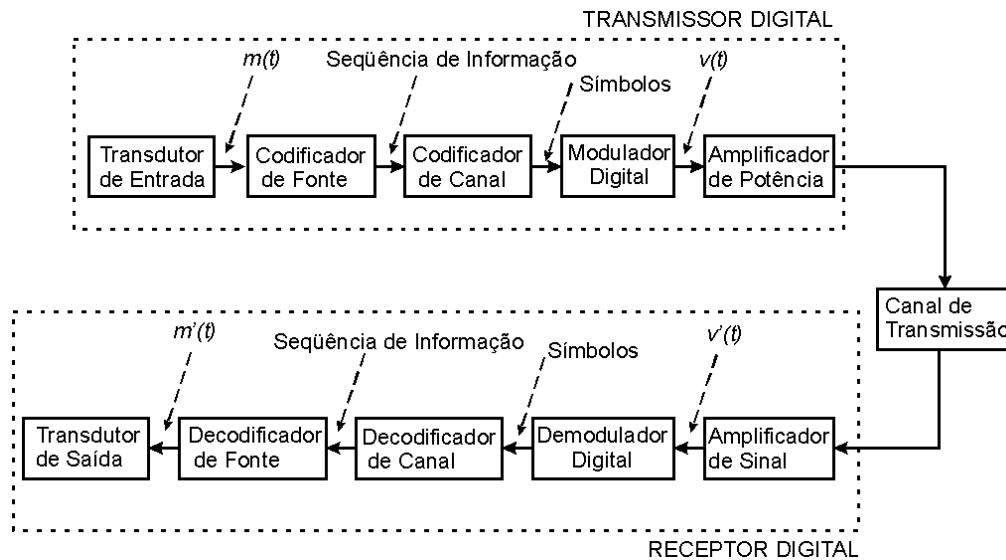


Figura 1.2: Diagrama de blocos simplificado de um sistema de comunicações digital.

Assim como em um sistema analógico, o Transdutor de Entrada é um dispositivo que converte uma grandeza física qualquer em um sinal elétrico. No entanto, em um sistema digital, o sinal  $m(t)$  pode ser

- I. Um sinal contínuo. Exemplo: O sinal gerado por um microfone.
- II. Um sinal discreto no tempo representado por um conjunto finito de símbolos. Isto é, tal sinal é discreto não só no tempo como também quanto aos valores que o representam – ou seja, o sinal é quantizado. Exemplo: O sinal gerado pelo foto-diodo que lê a informação de um CD musical através de um feixe LASER assume somente dois valores de tensão – portanto, dois símbolos – de acordo com os *pits* (*pit*: cova, fossa, buraco – em inglês) e *bumps* (*bump*: protuberância, galo – em inglês) marcados ao longo da trilha em espiral na superfície de policarbonato do disco em rotação.

Se o sinal  $m(t)$  é do tipo II ele é aplicado diretamente ao Codificador de Fonte, por já ser um sinal quantizado. Se  $m(t)$  for do tipo I ele será transformado em um sinal do tipo II através de um processo de amostragem e quantização prévios, conforme veremos no

Capítulo II. Na realidade, o processo de amostragem + quantização faz parte do Codificador de Fonte em sistemas que operam com sinais  $m(t)$  do tipo I. Este processo serve para transformar o sinal contínuo  $m(t)$  em uma seqüência de dígitos numéricos em base numérica binária. Para representar os dígitos binários – ou bits – a nível de circuito, é comum associar o nível lógico “1” a um pulso elétrico retangular de largura  $\tau$  tendo como amplitude a tensão  $V_H$  e o nível lógico “0” a um pulso retangular de mesma largura tendo como amplitude a tensão  $V_L$ .

Idealmente, busca-se representar o valor quantizado do sinal  $m(t)$  a cada instante discreto através de uma seqüência de bits que utilize o menor número de bits possível. Isto porque, um menor número de bits enviados no mesmo intervalo de tempo implica em pulsos de largura  $\tau$  maior, o que reduz a largura de espectro do sinal  $m(t)$  quantizado e, portanto, reduz a banda-passante necessária para enviá-lo através do sistema + canal [Carlson]. Por exemplo, suponhamos que cada amostra do sinal  $m(t)$  possa ser representado por uma seqüência de 16 bits, significando que cada amostra de  $m(t)$  pode assumir um valor dentre os  $2^{16} = 65536$  valores ou níveis de quantização possíveis. Suponhamos ainda que se deseja transmitir uma amostra de  $m(t)$  durante um intervalo de tempo de  $100 \mu\text{S}$ , de modo que o pulso que representa cada bit tem uma duração de  $\tau = 100 \mu\text{S}/16 = 6.25 \mu\text{S}$ . Isto resulta em uma largura espectral para o trem de pulsos de  $1/\tau = 160\text{KHz}$ , a qual proporcionalmente define a banda-passante necessária ao sistema [Carlson]. No entanto, se cada amostra de  $m(t)$  puder ser representada por uma seqüência de 8 bits em vez de 16 bits,  $1/\tau = 80\text{KHz}$ , e a banda-passante necessária ao sistema será a metade do necessário para 16 bits. O número de bits necessário para representar  $m(t)$  é dependente da aplicação, porque, conforme veremos na Seção 2.2.1, quantos menos bits usarmos para representar um sinal, maior será o ruído de quantização, que é uma distorção não-desejada mas intrínseca ao processo de quantização.

Representar o sinal  $m(t)$  quantizado através de uma seqüência de bits que utilize o menor número de bits possível é a tarefa principal do Codificador de Fonte. Especificamente, o Codificador de Fonte procura reduzir ao máximo a informação redundante no sinal  $m(t)$  quantizado de forma que o menor número de bits possível seja utilizado para sua representação sem perder informação significativa. Em outras palavras, o Codificador de Fonte efetua uma compressão de dados.

A seqüência de bits gerada na saída do Codificador de Fonte é denominada Seqüência de Informação e é aplicada à entrada do Codificador de Canal. O propósito do Codificador de Canal é introduzir na Seqüência de Informação, de maneira controlada, uma determinada quantidade de informação redundante, de tal forma que, no receptor, esta informação redundante possa ser utilizada para detectar e corrigir erros decorrentes de ruído e interferência que afetam o sinal quando este é transmitido através do canal de transmissão. Portanto, a redundância adicionada serve para aumentar a confiabilidade da informação recebida e melhorar a fidelidade do sinal  $m'(t)$  no Receptor Digital. De fato, a redundância controlada introduzida na Seqüência de Informação auxilia o receptor na decodificação da Seqüência de Informação desejada. Por exemplo, uma forma trivial de codificação de uma seqüência de informação binária é simplesmente repetir  $m$  vezes cada

dígito binário, sendo  $m$  um inteiro positivo. Uma maneira mais sofisticada de codificação seria tomar um conjunto de  $k$  bits da Seqüência de Informação na entrada do Codificador de Canal, conjunto este denominado de mensagem, e mapear cada mensagem de  $k$  bits em uma seqüência de  $n$  bits,  $n > k$ , seqüência esta denominada de palavra-código, tal que cada mensagem seja univocamente relacionada com a respectiva palavra-código. O mapeamento deve ser unívoco de forma que, sendo conhecido no receptor, este tenha condições de inferir, a partir do mapeamento, se ocorreu ou não erro e eventualmente corrigi-lo. A quantidade de redundância controlada introduzida pela codificação de canal é medida pelo quociente  $n/k$ . O recíproco deste quociente, i.e.  $k/n$ , é denominado de razão de codificação.

Um Codificador de Canal simples é aquele que executa a operação denominada cheque de paridade (*parity check*). Suponhamos que tenhamos uma mensagem de  $k = 7$  bits a ser codificada em uma palavra-código de  $n = 8$  bits através do seguinte mapeamento: Os 7 primeiros bits da mensagem são mapeados sem nenhuma alteração nos 7 primeiros bits da palavra-código. O oitavo bit da palavra-código é tal que se o número de dígitos “1” na mensagem é par o oitavo bit da palavra-código é “0” e se o número de dígitos “1” na mensagem é ímpar o oitavo bit da palavra-código é “1”. Sejam, agora, por exemplo, as seguintes mensagens  $M_A$ ,  $M_B$  e  $M_C$  tal que  $M_A = 1000001$ ,  $M_B = 1000010$ ,  $M_C = 1000011$ . As palavras-código resultantes na saída do Codificador de Canal são  $P_A = 10000010$ ,  $P_B = 10000100$  e  $P_C = 10000111$ . Suponhamos que na saída do demodulador do receptor tenhamos  $R_A = 10000010$ ,  $R_B = \mathbf{00000100}$  e  $R_C = \mathbf{00000000}$ . O Decodificador de Canal do receptor não detecta erro em  $R_A$  porque o oitavo bit é “0” para um número par de bits “1” nos dígitos correspondentes à mensagem, o que é uma decisão correta pois  $R_A = P_A$ . O Decodificador de Canal detecta erro em  $R_B$  porque o oitavo bit é “0” para um número ímpar de bits “1” nos dígitos correspondentes à mensagem, o que é uma decisão correta pois  $R_B \neq P_B$  no primeiro bit. O Decodificador de Canal não detecta erro em  $R_C$  porque o oitavo bit é “0” para um número par de bits “1” nos dígitos correspondentes à mensagem, o que é um decisão incorreta pois  $R_C \neq P_C$  nos dígitos marcados em negrito. A razão de codificação para este caso simples é  $k/n = 7/8$ .

A saída do Codificador de Canal é enviada ao Modulador Digital cuja função é mapear a seqüência binária proveniente do Codificador de Canal em um conjunto de  $M$  valores distintos de parâmetros de um sinal elétrico  $v(t)$ . Por exemplo, seja  $v(t)$  dado pela Equação (1.1) e suponhamos que desejamos transmitir a seqüência binária proveniente do Codificador de Canal de um em um bit a uma razão uniforme de  $R$  bits/s. O Modulador Digital pode, por exemplo, simplesmente mapear o dígito "0" no sinal  $v_0(t) = V \cos(2\pi ft + \phi_0)$  e o dígito "1" no sinal  $v_1(t) = V \cos(2\pi ft + \phi_1)$ , situação que define a modulação digital denominada BPSK (*Binary Phase Shift Keying*) para  $\phi_0 = 0^\circ$  e  $\phi_1 = 180^\circ$ . Neste caso  $M = 2$ , e dizemos que a modulação é binária porque o mapeamento envolve dois valores de parâmetros de  $v(t)$ .

Uma outra forma de modulação seria tomar um bloco de  $N$  bits consecutivos da seqüência binária proveniente do Codificador de Canal e efetuar a transmissão de um em

um bloco a uma razão constante de  $R$  [bits/s]. Para tanto, o modulador mapeia  $M = 2^N$  blocos (ou símbolos) distintos no conjunto de sinais  $\{v_i(t)\}$ ,  $i = 0, 1, \dots, M - 1$ . Este tipo de modulação é denominada  $M$ -ária porque existem  $M > 2$  sinais  $v(t)$  distintos. Por exemplo, seja  $N = 4$  tal que  $M = 2^4 = 16$ . Um possível mapeamento seria associar os 16 possíveis blocos de 4 bits aos elementos do conjunto de sinais  $\{v_i(t)\}$ ,  $i = 0, 1, \dots, 15$ ,  $v_i(t) = V_i \cos(2\pi ft + \phi_i)$ , conforme Tabela 1.1.

$i$	bloco (símbolo)	$V_i$	$\phi_i$
0	0000	1.3	135°
1	0001	1.0	108°
2	0010	1.3	45°
3	0011	1.0	72°
4	0100	1.0	162°
5	0101	0.5	135°
6	0110	1.0	18°
7	0111	0.5	45°
8	1000	1.3	-135°
9	1001	1.0	-108°
10	1010	1.3	-45°
11	1011	1.0	-72°
12	1100	1.0	-162°
13	1101	0.5	-135°
14	1110	1.0	-18°
15	1111	0.5	-45°

Tabela 1.1: Possível mapeamento entre um conjunto de 16 blocos (símbolos) distintos de 4 bits e o conjunto de sinais  $\{v_i(t)\}$ ,  $i = 0, 1, \dots, 15$ ,  $v_i(t) = V_i \cos(2\pi ft + \phi_i)$ . Note que amplitude  $V$  e fase  $\phi$  do sinal  $v(t)$  são variados, mas a frequência  $f$  é mantida constante neste tipo de modulação. Os valores de  $V_i$  e  $\phi_i$  mostrados caracterizam a modulação conhecida por 16-QAM (QAM - *Quadrature Amplitude Modulation*), e será estudada em capítulo posterior.

Note que o Modulador Digital recebe bits do Codificador de Canal a uma razão uniforme de  $R$  [bits/s] e os envia na mesma razão ao Canal de Transmissão através do Amplificador de Potência. Cada bloco possui  $N$  bits, portanto o Modulador Digital processa  $R \left[ \frac{\text{bits}}{\text{s}} \right] / N \left[ \frac{\text{bits}}{\text{bloco}} \right] = \frac{R}{N} \left[ \frac{\text{bloco}}{\text{s}} \right]$ , ou seja, cada bloco de  $N$  bits possui um intervalo de duração de  $N/R$  segundos. Em outras palavras, para uma taxa fixa de transmissão de bits enviados ao canal de  $R$  [bits/s],  $N/R$  segundos é o intervalo de tempo durante o qual o Modulador Digital gera um dos  $M$  sinais  $v(t)$  e o transmite ao Canal de Transmissão através do Amplificador de Potência.

Note também que quanto maior o número  $M$  de sinais disponíveis, maior será o tamanho  $N$  do bloco representado por um dos  $M$  sinais, o que implica em maior velocidade de transmissão. Por exemplo, seja um sistema digital com  $M = 256$  tal que  $N = \log_2 M = 8$ . Toda vez que um dos 256 possíveis sinais  $v(t)$  é transmitido, significa que 8 bits foram enviados através do canal. Comparemos este sistema com o sistema para o

qual  $M = 16$  tal que  $N = \log_2 M = 4$ , mas com o mesmo intervalo entre emissão de sinais  $v(t)$  do sistema com  $M = 256$ . Para  $M = 16$ , toda vez que um dos 16 possíveis sinais  $v(t)$  é transmitido significa que apenas 4 bits foram enviados através do canal. Portanto o sistema com  $M = 256$  apresenta o dobro da velocidade de transmissão  $R$  [bits/s] que o sistema para  $M = 16$ , assumindo que ambos possuam a mesma taxa  $R/N$  [blocos/s] de transmissão de blocos (símbolos).

O Canal de Transmissão, semelhantemente ao caso analógico, é o meio físico que é utilizado para enviar a informação entre o Transmissor e Receptor, a partir do Amplificador de Potência no Transmissor. Basicamente, em comunicações digitais é possível encontrar canais do tipo:

1. *Wireline*: Canais que transportam informação através de uma linha de transmissão feita de fios condutores elétricos. Exemplo: Linhas telefônicas para transmissão de voz e/ou dados através de cabo coaxial ou linhas bifilares.
2. Fibra ótica: Canais que transportam informação através de um feixe de luz modulada emitida por um LED ou LASER. O meio físico de um cabo ótico é um longo tubo finíssimo de fibra de vidro feita usualmente a partir de sílica, protegido por uma capa protetora. A informação é transmitida variando (modulando) a intensidade de luz emitida. Na outra extremidade do cabo, um foto-diodo no receptor transforma as variações de luz em sinal elétrico. A banda-passante de um canal ótico é pelo menos uma ordem de grandeza maior que a banda-passante de um canal *Wireline*. Enquanto a transmissão de informação através de um canal *Wireline* exige repetidores de sinal a cada 5Km, um cabo de fibra ótica exige repetidores somente a cada 30Km [Tanenbaum]. Ainda, o peso de um cabo ótico é centenas de vezes menor do que um cabo *Wireline* com mesma banda-passante e mesma extensão de percurso, o que facilita o processo de instalação. Exemplo: A rota de interligação entre duas WANs (WAN – *Wide Area Network*).
3. *Wireless*: Canais que transportam informação através de ondas eletromagnéticas de determinada frequência, acopladas ao meio de propagação por uma antena, a qual serve como irradiador. Em consequência, não há necessidade de nenhum cabo ou fio para transmissão da informação. Daí, portanto, a denominação *wireless* – sem fio. A faixa de frequência para comunicações *wireless* viáveis se estende desde 30KHz até 300GHz. Obviamente, sistemas que operam com frequências mais altas permitem uma banda-passante maior. Exemplo: Telefonia celular digital na faixa dos 850 MHz.
4. Acústico sub-aquático: Canais que transportam informação através de ondas acústicas cujo meio de propagação é água. Sistemas digitais que utilizam este tipo de canal foram desenvolvidos para contornar o problema de excessiva atenuação que a transmissão de informação por ondas eletromagnéticas encontra quando transmissor e/ou receptor encontram-se submersos, pois a onda eletromagnética não se propaga na água exceto em frequências extremamente baixas. Exemplo: Comunicação entre submarinos.
5. Armazenamento: Canais cujo objetivo é a armazenagem com posterior recuperação de grandes volumes de informação. Exemplos: CD-ROM, DVD, fita magnética, disco magnético.



Qualquer que seja o tipo de Canal de Transmissão, o sinal é corrompido de maneira aleatória através de uma variedade de possíveis mecanismos, como ruído térmico aditivo gerado por dispositivos eletrônicos, ruídos industriais, ruídos de ignição, ruídos atmosféricos, ruído da fauna sub-aquática, interferência de outros transmissores, interferência do próprio sinal devido à ecos e reverberação no canal, etc...

No Receptor, o Amplificador de Sinal recebe o sinal do Canal de Transmissão, executando função semelhante à do caso analógico.

O Demodulador Digital processa o sinal corrompido pelo canal e reduz o sinal  $v'(t)$  a uma seqüência numérica que representa as estimativas dos símbolos de dados (blocos) transmitidos, símbolos estes que, conforme já discutido, podem ser binários (2 símbolos) ou  $M$ -ários ( $M$  símbolos). Esta seqüência numérica é enviada ao Decodificador de Canal, o qual tenta reconstruir a Seqüência de Informação original baseado no conhecimento do código utilizado pelo Codificador de Canal e na redundância controlada contida na informação recebida.

Uma medida de quão bem feito está sendo realizado o trabalho conjunto do Demodulador Digital + Decodificador de Canal é a frequência estatística em que erros ocorrem na Seqüência de Informação decodificada. Precisamente falando, a probabilidade média de erros em bits da Seqüência de Informação na saída do Decodificador de Canal é uma medida da performance do trabalho conjunto do Demodulador e Decodificador de Canal. Na prática esta probabilidade média de erro é obtida contando-se o número de bits errados  $N_e$  em um número suficientemente grande de bits totais  $N_t$  recebidos, bits estes provenientes da recepção de diversas Seqüências de Informação consecutivas. Computa-se então a razão  $BER = N_e/N_t$ , onde o parâmetro de performance BER (BER – *bit error rate*) é a taxa de erro de bits do Demodulador Digital + Decodificador de Canal e é uma aproximação da probabilidade média de erro. Em geral, a probabilidade de erro é função das características do código utilizado, do tipo de sinal  $v(t)$  adotado, da potência do Amplificador de Potência no transmissor, das características do canal (nível de ruído, natureza da interferência, etc...) e do método de demodulação e decodificação.

Finalmente, o Decodificador de Fonte tenta recuperar o sinal original  $m(t)$  baseado no método de codificação usado pelo Codificador de Fonte no transmissor. Devido a erros no Decodificador de Canal e possível distorção introduzida pelo Codificador/Decodificador de Fonte, o sinal  $m'(t)$  é uma aproximação de  $m(t)$ . A diferença entre  $m'(t)$  e  $m(t)$  (ou alguma função desta diferença:  $(m'(t) - m(t))^2$ , por exemplo) é uma medida da distorção introduzida pelo sistema de transmissão digital.

### 1.3 Referências Bibliográficas (incompleta)

[Carlson] A. B. Carlson, *Communication Systems*, McGraw-Hill, 1965.

[Ash] R. Ash, *Information Theory*, Interscience - John Wiley & Sons, 1967.

[Proakis] J. G. Proakis, *Digital Communications*, McGraw-Hill, 1995.

[Shannon] C.E. Shannon, “A Mathematical Theory of Communications”, *Bell Systems Technical Journal*, vol. 27, pp. 379 –423 (part I) and pp. 623 –656 (part II), 1948.

[Taub] H. Taub and D.L. Schilling, *Principles of Communications Systems*, McGraw-Hill, 1986.