

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.

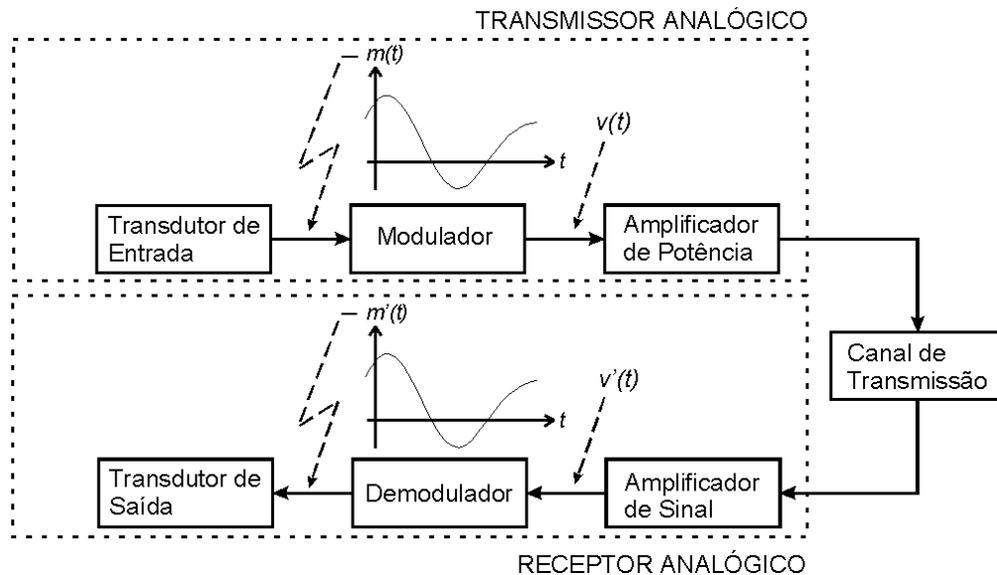


Figura 1.1: Diagrama de blocos simplificado de um sistema de comunicações analógico.

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 ϕ 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 ϕ – 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 ℓ_{\min} para um irradiador eletromagnético que possibilita transmissão eficiente é $\ell_{\min} = \lambda/4$, onde λ 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 τ 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.

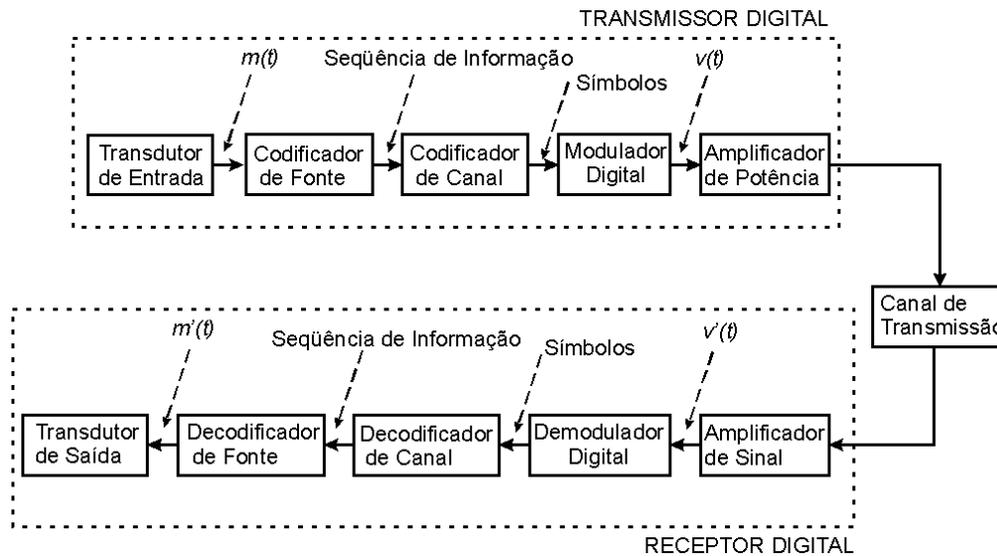


Figura 1.2: Diagrama de blocos simplificado de um sistema de comunicações digital.

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 τ 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 τ 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 Sequência 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	ϕ_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 ϕ do sinal $v(t)$ são variados, mas a frequência f é mantida constante neste tipo de modulação. Os valores de V_i e ϕ_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.