

Capítulo 2

Elementos de um Sistema de Telecomunicações Digital

Conceito de Comunicação Digital: Transmissão de informação em forma digital a partir de uma fonte geradora da informação até um ou mais destinatários.

Em um sistema digital, toda a informação a ser transmitida é transformada em um conjunto de valores discretos, 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 ...

A Figura 2.1 mostra o diagrama de blocos simplificado e os elementos básicos de um sistema de comunicações digital, a seguir descritos.

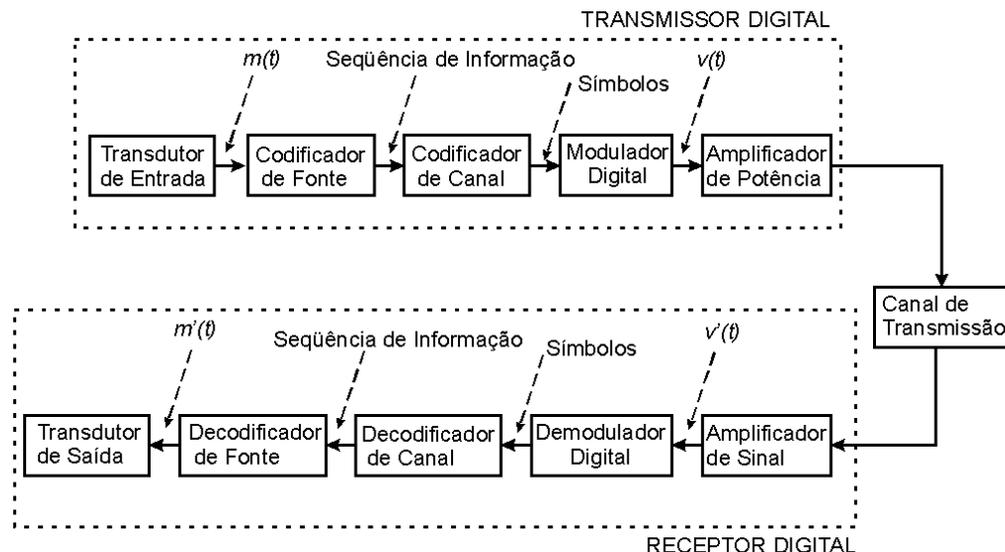


Figura 2.1: Diagrama de blocos simplificado de um sistema de comunicações digital.

No Transmissor Digital estes elementos são: o Transdutor de Entrada, o Codificador de Fonte, o Codificador de Canal, o Modulador Digital, o Amplificador de Potência.

No lado do destinatário, os elementos básicos do receptor digital são: Amplificador de Sinal, Demodulador Digital, Decodificador de Canal, Decodificador de Fonte e Transdutor de Saída.

2.1 Elementos que compõem o Transmissor Digital

A seguir são descritos alguns dos principais elementos que compõem o Transmissor Digital, mostrados na Figura 2.1.

2.1.1 O Transdutor de Entrada

O Transdutor de Entrada é um dispositivo que converte uma grandeza física qualquer em um sinal elétrico.

Caso o sistema mostrado na Figura 2.1 represente um transmissor/receptor de rádio, o Transdutor de Entrada pode ser um microfone: a grandeza física pressão acústica movimenta o diafragma do microfone, o qual gera um sinal elétrico $m(t)$ que corresponde 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. No entanto, em um sistema digital, o sinal $m(t)$ pode ser:

1. Um sinal contínuo.
2. 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.

2.1.2 O Codificador de Fonte

Se o sinal $m(t)$ é do tipo 2 ele é aplicado diretamente ao Codificador de Fonte, por já ser um sinal quantizado.

Se $m(t)$ for do tipo 1 ele será transformado em um sinal do tipo 2 através de um processo de amostragem e quantização prévios.

No processo de amostragem, o sinal contínuo no tempo $m(t)$ é transformado em um sinal discreto no tempo. Ou seja, valores (amostras) do sinal $m(t)$ são seqüencialmente tomados em instantes distintos, igualmente espaçados no tempo de um intervalo T_s , e são levados à saída do processo de amostragem. Especificamente, o sinal $m(t)$ é transformado no sinal $m(nT_s)$, onde T_s é denominado de intervalo de amostragem e $n = 0, 1, \dots$ é o índice do instante de amostragem. Como para um dado sistema digital o intervalo de amostragem T_s é definido e constante, para efeito de simplificação de representação, é comum o sinal $m(nT_s)$ ser referido como $m(n)$.

No processo de quantização, o sinal $m(n)$ contínuo em amplitude é transformado em um sinal $m_q(n)$ discreto em amplitude (valor). Ou seja, dado $m(n)$ no instante n , $m_q(n)$ assumirá um dos M possíveis valores, denominados níveis de quantização, do conjunto $\Theta = \{m_0, m_1, \dots, m_{M-1}\}$, sendo $m_0 < m_1 < \dots < m_{M-1}$. Especificamente, $m_q(n) = Q\{m(n)\}$, onde $Q\{\cdot\}$ é o operador que representa a quantização do valor do argumento e é dado por $Q\{\cdot\} = \arg \min_{m_k} |(\cdot) - m_k|$, $m_k \in \Theta$, $k = 0, 1, \dots, M - 1$. O operador $Q\{\cdot\}$ pode ser interpretado da seguinte maneira: Dado um valor x a ser quantizado, a operação definida por $Q\{x\} = \arg \min_{m_k} |x - m_k|$, $m_k \in \Theta$, $k = 0, 1, \dots, M - 1$, testa todas as M possíveis distâncias $|x - m_k|$ e atribui a $Q\{x\}$ aquele elemento m_q do conjunto $\Theta = \{m_0, m_1, \dots, m_{M-1}\}$ que resultou na menor distância $|x - m_q|$. Quanto menor o número M de níveis de quantização utilizados para representar $m(n)$, menos fiel será a representação e maior será o ruído de quantização.

Em sistemas que operam com sinais $m(t)$ do tipo 1, o processo de amostragem + quantização faz parte do Codificador de Fonte. 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, já que um menor número de bits enviado 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 [1].

Suponhamos que cada amostra do sinal $m(t)$ possa ser representada 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 $100 \mu\text{s}$. Assim, o pulso que representa cada bit terá uma duração de

$$\tau = \frac{100 \mu\text{s}}{16} = 6.25 \mu\text{s}, \quad (2.1)$$

resultando em uma largura espectral para o trem de pulsos de

$$\frac{1}{\tau} = 160\text{kHz}, \quad (2.2)$$

a qual proporcionalmente define a banda-passante necessária ao sistema [1].

No entanto, se cada amostra de $m(t)$ puder ser representada por uma seqüência de 8 bits em vez de 16 bits,

$$\tau = \frac{100 \mu\text{s}}{8} = 12.5 \mu\text{s} \quad \text{e} \quad (2.3)$$

$$\frac{1}{\tau} = 80\text{KHz}, \quad (2.4)$$

e a banda-passante necessária ao sistema será a metade da necessário para 16 bits.

Observação: O número de bits necessário para representar $m(t)$ é dependente da aplicação porque, quanto menor o número de bits que 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, no entanto, perder informação significativa. Em outras palavras, o Codificador de Fonte efetua uma compressão de dados.

2.1.3 O Codificador de Canal

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.

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, corrigí-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 $R_A = 10000010$, $R_B = 00000100$ e $R_C = 00000000$.

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 $k/n = 7/8$.

2.1.4 O Modulador Digital

A saída do Codificador de Canal é enviada ao Modulador Digital. **A função do Modulador Digital é mapear a seqüência binária proveniente do Codificador de Canal em um conjunto de M valores distintos de parâmetros de um sinal elétrico $v(t)$.**

O Modulador é um dispositivo que executa o processo de modulação, através do qual o sinal $v(t)$ tem alguma de suas características 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 e pode ser representado por

$$v(t) = V_m \cos(2\pi ft + \phi) \quad (2.5)$$

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.

Observação:

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) e 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. Em Comunicações Digitais mais de um parâmetro de $v(t)$ podem ser variados simultaneamente, dando origem a formas de modulação mais elaboradas.

Se desejarmos 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 a modulação é dita 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 2.1.

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

Tabela 2.1: 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 variadas, 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*).

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

$$R \left[\frac{\text{bits}}{s} \right] / N \left[\frac{\text{bits}}{\text{bloco}} \right] = \frac{R}{N} \left[\frac{\text{blocos}}{s} \right], \quad (2.6)$$

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 $M = 256$.

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).

2.2 Elementos que compõem o Receptor Digital

Neste item são descritos alguns dos principais elementos que compõem o Receptor Digital, mostrados na Figura 2.1.

2.2.1 O Demodulador Digital

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.

2.2.2 O Decodificador de Canal

O Decodificador de Canal 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.

2.2.3 A Performance Conjunta do Demodulador Digital e do Decodificador de Canal

Uma medida de quão bem feito está sendo realizado o trabalho conjunto do Demodulador Digital + Decodificador de Canal é a freqüência 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.

2.2.4 O Decodificador de Fonte

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.

2.3 O Canal de Transmissão

O canal de transmissão é o meio físico que é utilizado para enviar a informação entre o Transmissor e Receptor, a partir do Amplificador de Potência no Transmissor. 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.

Os transmissores/receptores digitais utilizados em telefonia celular requerem um cuidadoso critério no projeto, 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.

2.3.1 Tipos de Canais de Transmissão

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. 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...

2.3.2 Interferência Intersimbólica e Equalização de Canal

Um dos maiores obstáculos para a confiabilidade de comunicações digitais é a **Interferência entre Símbolos** (ISI – *Inter-Symbol Interference*), inerente a todos os canais dispersivos, classe à que pertence a grande maioria dos canais de transmissão práticos.

A informação a ser transmitida é enviada através de um canal dispersivo C , resultando em ISI no sinal recebido $u(n)$, onde n é um número inteiro. Representando a seqüência de símbolos $s(n)$ originados no transmissor digital, a cada instante nT , o transmissor envia o símbolo $s(nT) \in A$ através de C , sendo $A = \{s_0, s_1, \dots, s_{M-1}\}$ o alfabeto da informação a ser transmitida, constituído por M possíveis símbolos, e T o intervalo de amostragem dos símbolos ou intervalo de *Baud*. Conectado ao transmissor através do canal C , o receptor deverá ser capaz de identificar a quais símbolos do alfabeto A pertencem as amostras do sinal recebido $u(n)$, de acordo com a seqüência originalmente transmitida $s(n)$.

A dispersão de um canal é medida pelo intervalo de L_c amostras não nulas que resultam em resposta a uma excitação impulsiva imposta ao canal. A existência da ISI no sinal recebido, resultante da dispersão de C , é observada através do fato de $u(n)$ assumir inúmeros valores, tais que $u(n) \notin A$, mesmo sob ausência total de ruído. Portanto, ao transmitir $s(n)$ através de C , $u(n) \notin A$ como consequência da convolução da fonte original $s(n)$ com a resposta ao impulso $c(n)$ de C . Cada elemento da seqüência recebida $u(n)$ consiste em uma soma ponderada de todos os elementos prévios de $s(n)$, com ponderação determinada por $c(n)$. Sob o ponto de vista humano-acústico, a ISI pode ser percebida ao se estabelecer diálogo em um ambiente fechado com paredes de material reflexivo, como rocha polida. A reverberação acústica – ou ISI

– pode atingir tal nível de incômodo a ponto de não se compreender as palavras (símbolos) do interlocutor.

Uma solução para a distorção causada pela superposição de símbolos recebidos é adicionar ao receptor um sistema capaz de compensar ou reduzir a ISI no sinal proveniente do canal. Tal sistema compensador é denominado de **Equalizador**. Como a operação geradora de ISI é uma convolução, o equalizador deve realizar a operação inversa, a desconvolução. Em consequência, um equalizador é considerado eficaz em atender ao objetivo a que se destina, se a convolução da resposta ao impulso do canal $c(n)$ com a resposta ao impulso do equalizador $f(n)$ resultar em uma resposta impulsiva conjunta $h(n)$ definida por um único impulso $\delta(n-d)$ em algum instante d . A resposta $\delta(n-d)$ caracteriza uma resposta impulsiva conjunta sem nenhuma dispersão.

2.4 Referências Bibliográficas

- [1] A. B. Carlson, *Communication Systems*, McGraw-Hill, 1965.
- [2] R. Ash, *Information Theory*, Interscience - John Wiley & Sons, 1967.
- [3] J. G. Proakis, *Digital Communications*, McGraw-Hill, 2001.
- [4] 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.
- [5] H. Taub and D.L. Schilling, *Principles of Communications Systems*, McGraw-Hill, 1986.