

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

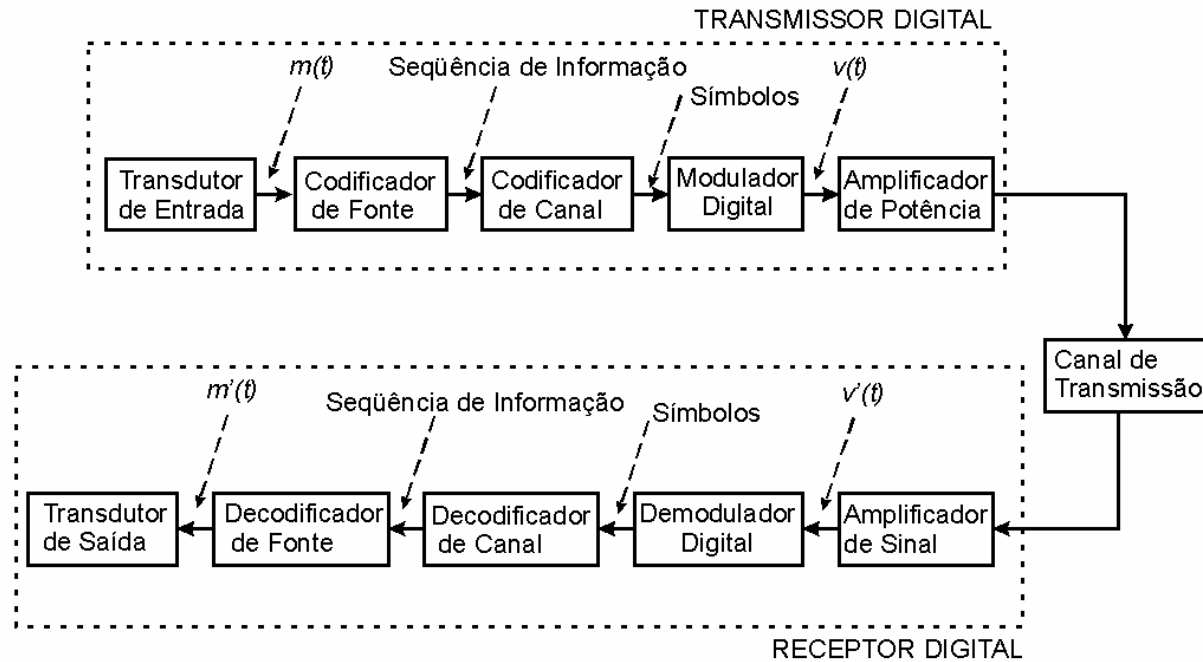
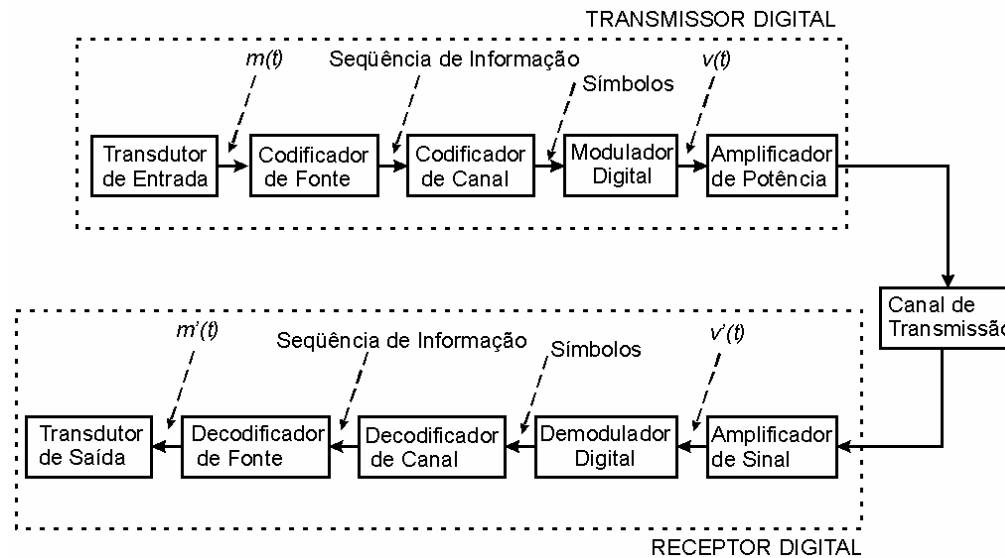


Figura 1: Diagrama de blocos simplificado, contendo os elementos básicos de um sistema de comunicações digital.

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 (meio físico através do qual a informação é transportada: eletromagnético, acústico, ótico, etc ...)



## O Transdutor de Entrada (Tx Digital)

- Dispositivo que converte uma grandeza física em um sinal elétrico.
- Transmissor/receptor de rádio  $\Rightarrow$  Transdutor de Entrada = microfone.

(A grandeza física pressão acústica movimentada 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.)

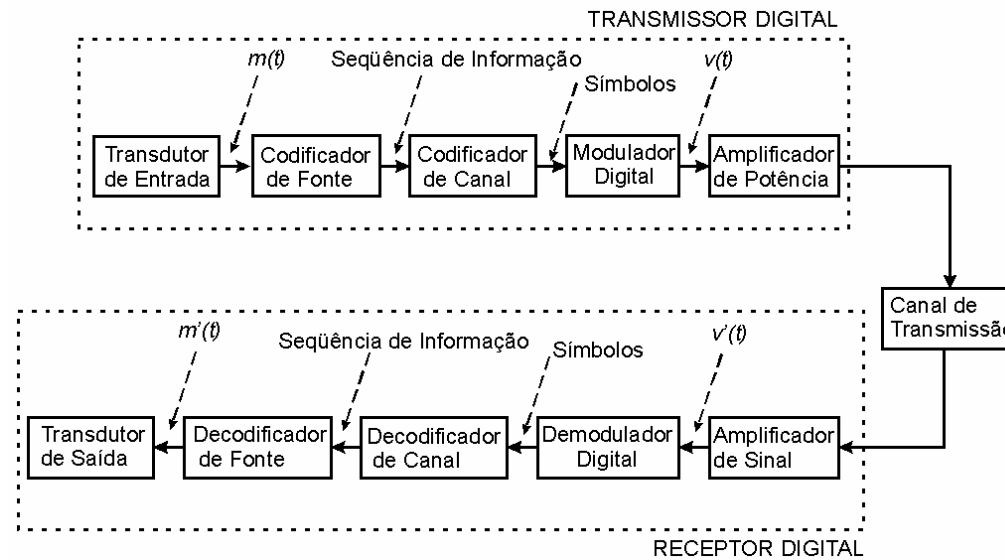
### Natureza do sinal elétrico $m(t)$ :

$\Rightarrow$  Sistema analógico:  $m(t)$  é forçosamente um sinal contínuo.

$\Rightarrow$  Sistema digital:  $m(t)$  pode ser  $\begin{cases} \text{contínuo,} \\ \text{discreto.} \end{cases}$

Um sinal discreto tem as seguintes características:

- Discreto no tempo, representado por um conjunto finito de símbolos.
- Discreto quanto aos valores que o representam – discreto em amplitude, ou quantizado.



### O Codificador de Fonte (Tx Digital)

Se  $m(t)$  é discreto  $\Rightarrow$  aplicado diretamente ao Codificador de Fonte, por já ser um sinal quantizado.

Se  $m(t)$  é contínuo  $\Rightarrow$  será transformado em um sinal discreto através de um processo de amostragem e quantização prévios.

**Processo de amostragem:**

- Sinal  $m(t)$  contínuo no tempo é transformado em um sinal discreto no tempo.
- Valores (ou amostras) do sinal  $m(t)$  são seqüencialmente tomadas 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.

**Processo de quantização:**

- Sinal  $m(n)$  contínuo em amplitude é transformado em um sinal  $m_q(n)$  discreto em amplitude.
- Dado  $m(n)$  no instante  $n$ ,  $m_q(n)$  assumirá um dos  $M$  possíveis valores, denominados níveis de quantização, do conjunto

$$\Theta = \{m_0, m_1, \dots, m_{M-1}\}, \text{ sendo } m_0 < m_1 < \dots < m_{M-1}.$$

- 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

$$Q\{\cdot\} = \arg \min_{m_k} |(\cdot) - m_k|, \quad m_k \in \Theta, \quad k = 0, 1, \dots, M-1.$$

$$Q\{\cdot\} = \arg \min_{m_k} |(\cdot) - m_k|, \quad m_k \in \Theta, \quad k = 0, 1, \dots, M - 1.$$

O operador  $Q\{\cdot\}$  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 contínuo, o processo de amostragem + quantização faz parte do Codificador de Fonte.
- ◆ Para representar os dígitos binários – ou bits – a nível de circuito, é comum associar:
  - nível lógico “1” a um pulso elétrico retangular de largura  $\tau$  tendo como amplitude a tensão  $V_H$  e
  - 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  $\tau$  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.**

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

$$\tau = \frac{100 \mu\text{s}}{16} = 6.25 \mu\text{s}, \quad \text{resultando em uma largura espectral para o trem de pulsos de } \frac{1}{\tau} = 160\text{kHz},$$

a qual proporcionalmente define a banda-passante necessária ao sistema.

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

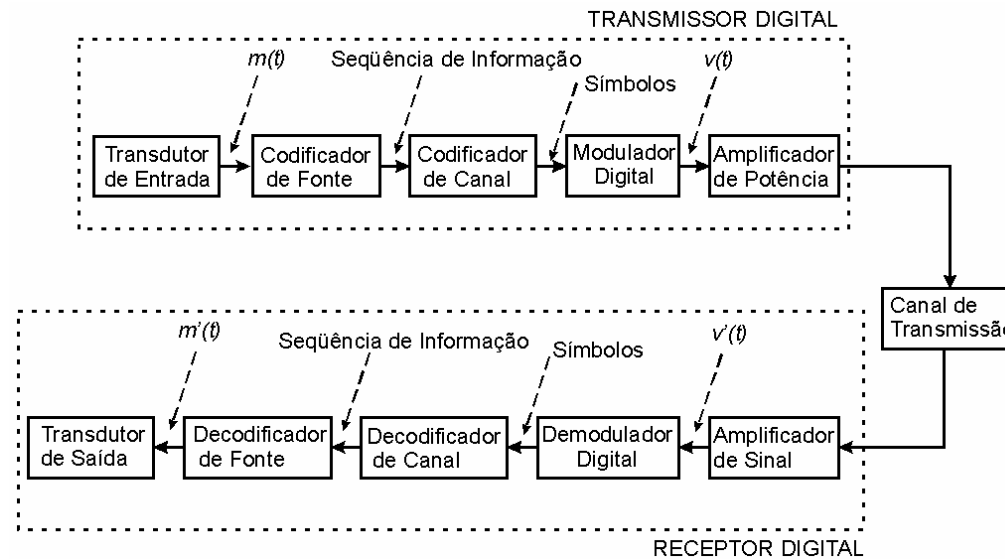
$$\tau = \frac{100 \mu\text{s}}{8} = 12.5 \mu\text{s} \quad \text{e} \quad \frac{1}{\tau} = 80\text{kHz},$$

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

Observação: O n°. de bits necessário para representar  $m(t)$  é dependente da aplicação porque, quanto menor o n°. 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.

Especificamente, o Codificador de Fonte procura **reduzir ao máximo a informação redundante no sinal  $m(t)$  quantizado** de forma que o **menor n°. de bits possível seja utilizado para sua representação sem, no entanto, perder informação significativa. Em outras palavras, o Codif. 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 Codificador de Canal (Tx Digital)

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.

**Mensagens de  $k$  bits são mapeadas em palavras-código de  $n$  bits, sendo  $n > k$ .**

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,  $k/n$ , é denominado de razão de codificação.

**Exemplo:**

Um Codificador de Canal simples é aquele que executa a operação denominada cheque de paridade (*parity check*).

Supondo 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 n<sup>o</sup> de dígitos '1' na mensagem é par, o 8<sup>o</sup> bit da palavra-código é '0' e
  - se o n<sup>o</sup> de dígitos '1' na mensagem é ímpar, o 8<sup>o</sup> bit da palavra-código é '1'.

Sejam, agora, por exemplo, as seguintes **mensagens**  $M_A$ ,  $M_B$  e  $M_C$ , tais que

$$M_A = 1000001, M_B = 1000010, M_C = 1000011.$$

As **palavras-código resultantes na saída do Codificador de Canal** são

$$P_A = 10000010, P_B = 10000100 \text{ e } P_C = 10000111.$$

Suponhamos que, **na saída do demodulador do receptor** tenhamos

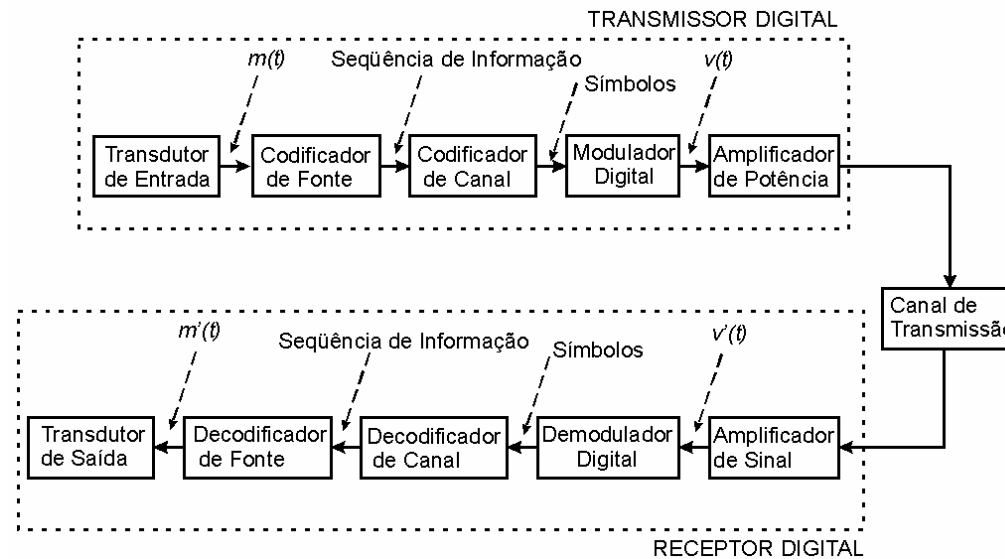
$$R_A = 10000010, R_B = \mathbf{00000100} \text{ e } R_C = \mathbf{00000000}.$$

O Decodificador de Canal do receptor **não detecta erro em**  $R_A$  porque o oitavo bit é '0' para um n° 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 n° 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 n° 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  $k/n = 7/8$ .



## O Modulador Digital (Tx 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

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

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.

### Observação:

Qualquer uma destas três características ou parâmetros de  $v(t)$  – valor instantâneo  $V_m$ , frequência  $f$ , fase  $\phi$  – podem ser variados, em função do sinal modulante  $m(t)$ .

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  $M = 2^4 = 16$ .

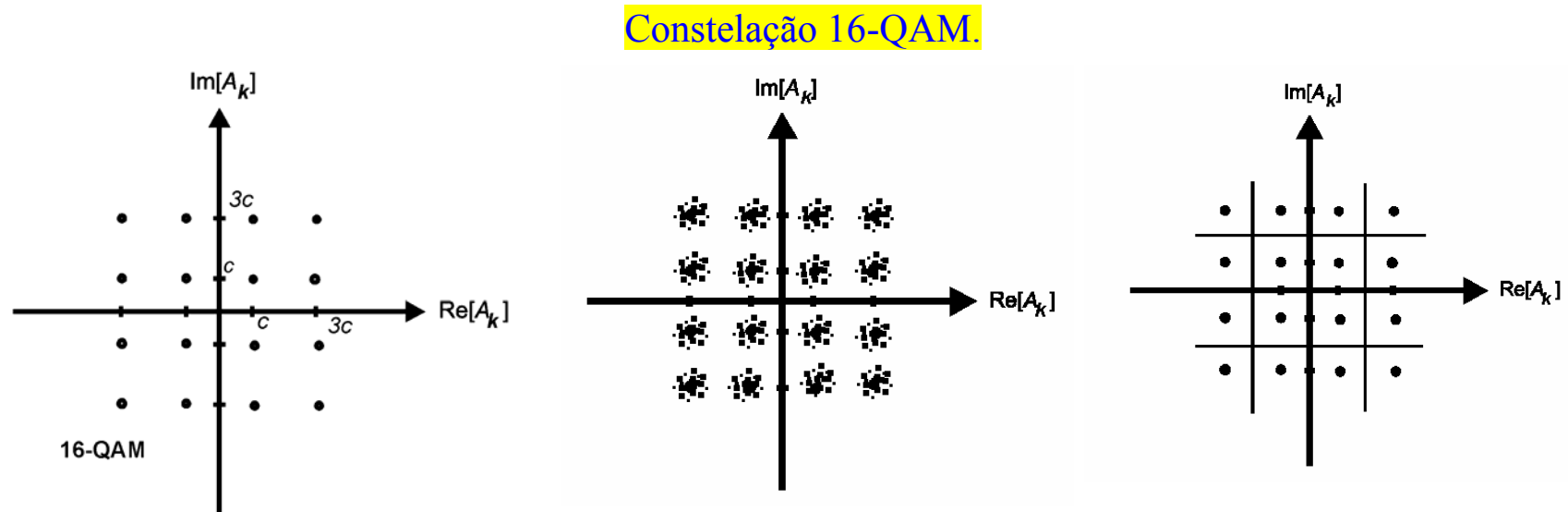
Um possível mapeamento seria associar os 16 possíveis blocos de 4 bits aos elementos do conjunto de sinais  $\{v_i(t)\}$ ,  $i = 0, 1, \dots, 15$ ,  $v_i(t) = V_i \cos(2\pi ft + \phi_i)$ , conforme Tabela 1.

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
$\phi_i$	135°	108°	45°	72°	162°	135°	18°	45°	-135°	-108°	-45°	-72°	-162°	-135°	-18°	-45°

Tabela 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 variadas, 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*).



Cada símbolo 16-QAM transmitido envia 4 bits através do canal.

As amostras recebidas são corrompidas por ruído Gaussiano aditivo e formam uma nuvem Gaussiana ao redor dos pontos na constelação de símbolos.

Região de decisão para a constelação 16-QAM.



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

$$R \left[ \frac{\text{bits}}{s} \right] / N \left[ \frac{\text{bits}}{\text{bloco}} \right] = \frac{R}{N} \left[ \frac{\text{bloco}}{s} \right],$$

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, são enviados 8 bits 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, apenas 4 bits são 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).

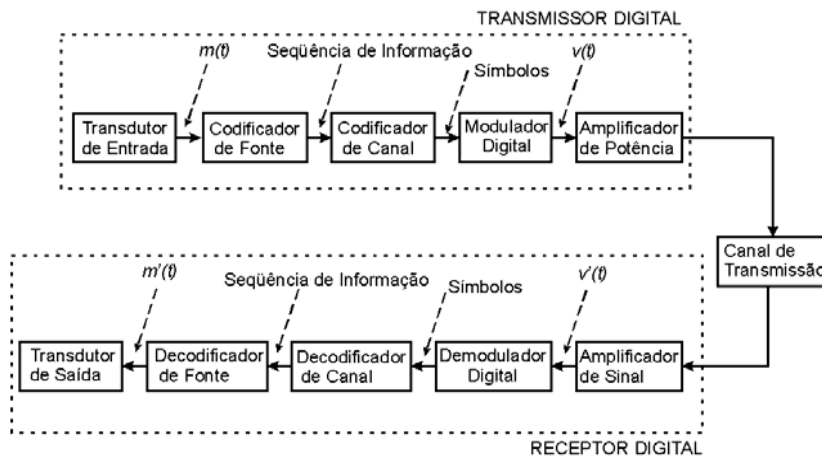
## O Canal de Transmissão

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 sistemas *wireless*, em especial, 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.

Exemplos de canais de transmissão utilizados em comunicações digitais: *wireline*, fibra ótica, *wireless*,...



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 a ecos e reverberação no canal, etc...

## 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*).

A informação a ser transmitida é enviada através de um canal de comunicações  $C$ , 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 existência da ISI no sinal recebido, é observada através do fato de  $u(n)$  assumir inúmeros valores, tais que  $u(n) \notin A$ , mesmo sob ausência total de ruído.

Sob o ponto de vista acústico humano, 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**.

No domínio frequência  $z$ , esta situação é expressa por  $H(z) = C(z)F(z) = z^{-d}$ .

A Figura 2 mostra o diagrama de blocos simplificado resultante do sistema no domínio frequência  $z$ , onde  $Y(z) = Z\{y(n)\}$  é a resposta à excitação  $S(z) = Z\{s(n)\}$  e  $U(z) = Z\{u(n)\}$  é a seqüência recebida  $u(n)$  no domínio  $z$ , sendo  $Z\{\cdot\}$  o operador Transformada Z.

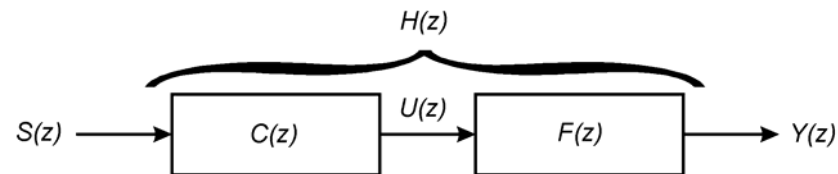


Figura 2: Modelo do canal e equalizador no domínio frequência.

No domínio tempo, a remoção de ISI efetuada por um equalizador de canal pode ser melhor compreendida através do exemplo mostrado nas figuras que seguem.

A Figura 3 mostra o alfabeto  $A$ , ou constelação, dos símbolos complexos referentes a uma fonte  $s(n)$  cuja modulação (ou sinalização) é 256-QAM (QAM – *Quadrature Amplitude Modulation*) com variância unitária.

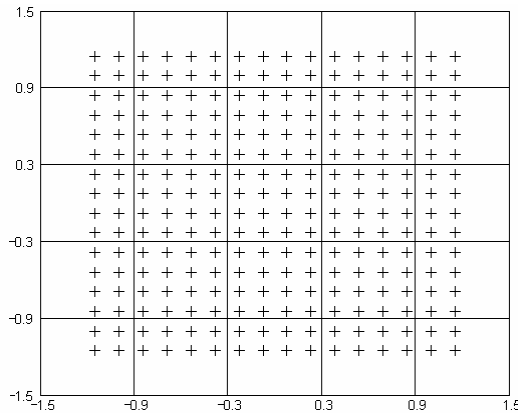


Fig. 3(a):

Constelação 256-QAM.

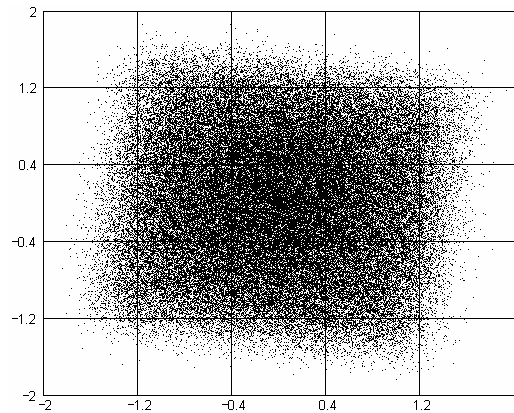


Fig. 3(b):

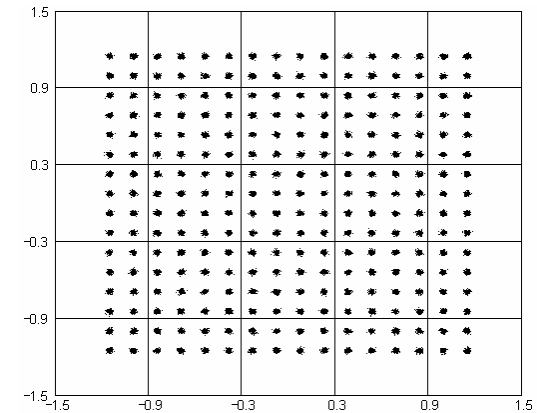
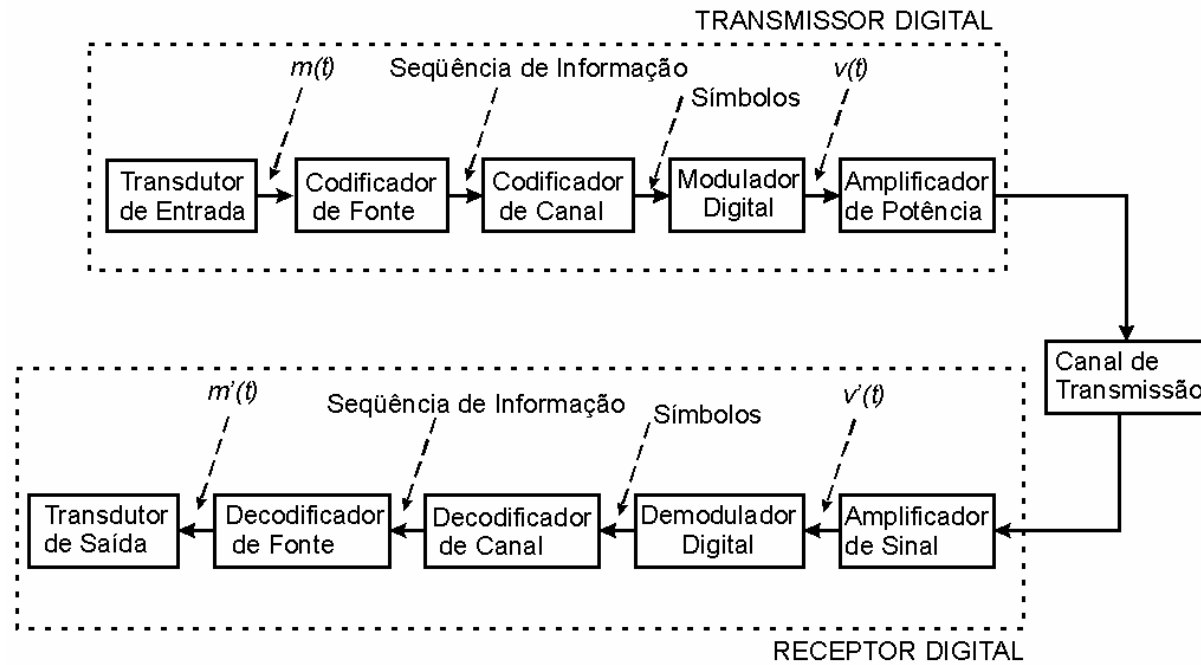
Conjunto  $u$  na entrada do equalizador.

Fig. 3(c):

Conjunto  $y$  na saída do equalizador

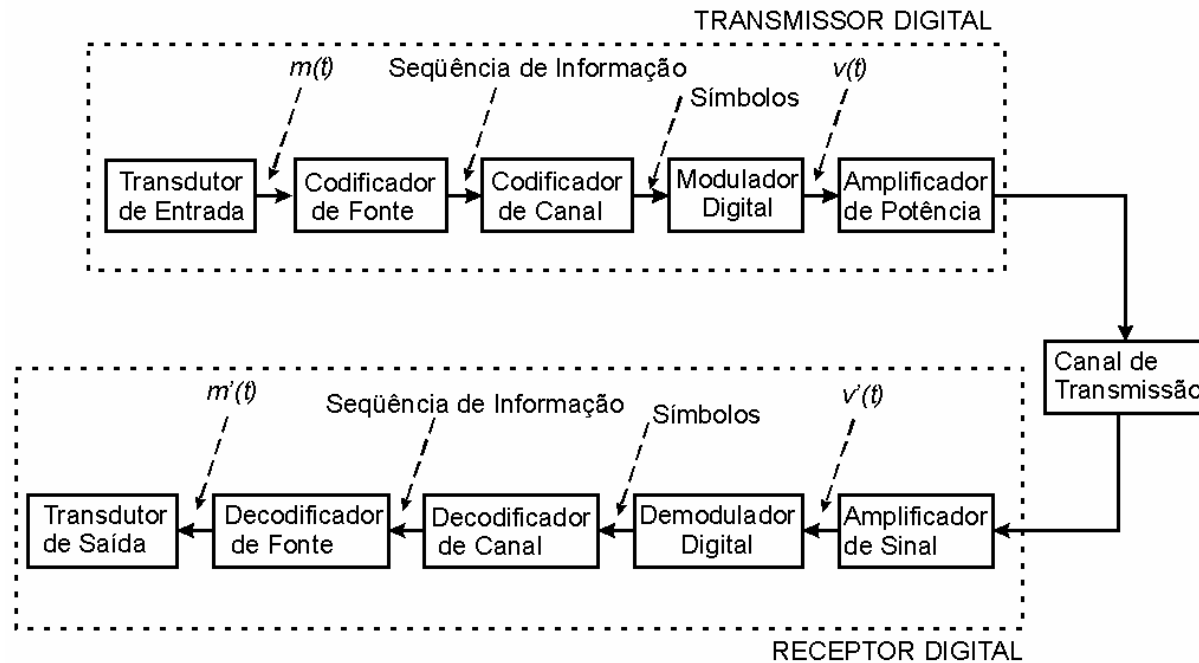
$N_a = 50000$  símbolos do alfabeto  $A$  da fonte de informação  $s(n)$ , gerados seqüencialmente com probabilidade uniforme (Fig. 3(a)), são enviados através do canal  $C$ , resultando no conjunto de  $N_a$  amostras  $u$  recebidas (Fig. 3(b)).

Ao ser submetido ao equalizador, o conjunto de amostras  $u$  transforma-se no conjunto de amostras equalizadas  $y$  (Fig. 3(c)), portanto, pertencentes à constelação original.



### O Demodulador Digital (RX 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 podem ser binários (2 símbolos) ou  $M$ -ários ( $M$  símbolos). Esta seqüência numérica é enviada ao Decodificador de Canal.



### O Decodificador de Canal (Rx Digital)

O Decodificador de Canal tenta reconstruir a Seqüência de Informação original a partir do conhecimento do código utilizado pelo Codificador de Canal e da redundância controlada contida na informação recebida.



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

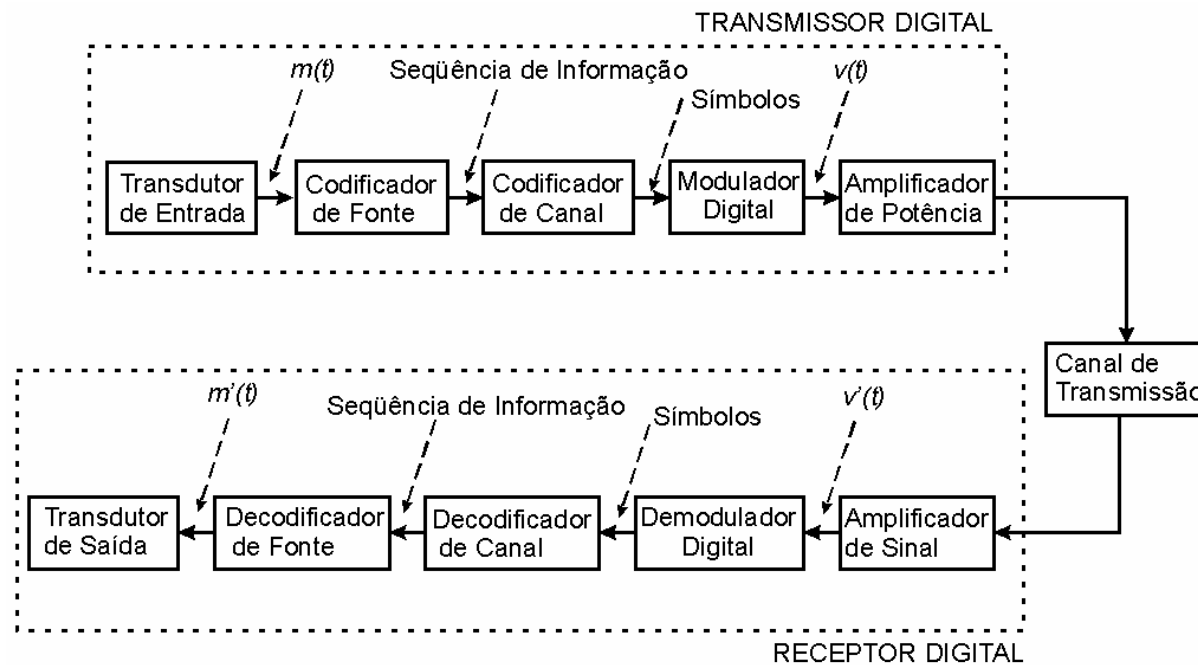
Uma medida de quão bem feito está sendo realizado o trabalho conjunto do Demodulador Digital + Decodificador de Canal é a frequência estatística em que erros ocorrem na Seqüência de Informação decodificada.

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 e do método de demodulação e decodificação.



### O Decodificador de Fonte (Rx Digital)

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.

