

SIMON HAYKIN
MICHAEL MOHER

Sistemas de Comunicação

QUINTA EDIÇÃO





TRANSMISSÃO DE ANÁLOGICO PARA DIGITAL

Por que digitalizar fontes analógicas?

- Menos sensíveis a ruído;
- Integrar diferentes serviços;
- Circuitos para manipular sinais digitais são mais fáceis de se repetir;
- Sinais digitais são mais simples de se caracterizar e não possuem a mesma faixa de amplitude e variabilidade que os sinais analógicos.



TRANSMISSÃO DE ANÁLOGICO PARA DIGITAL

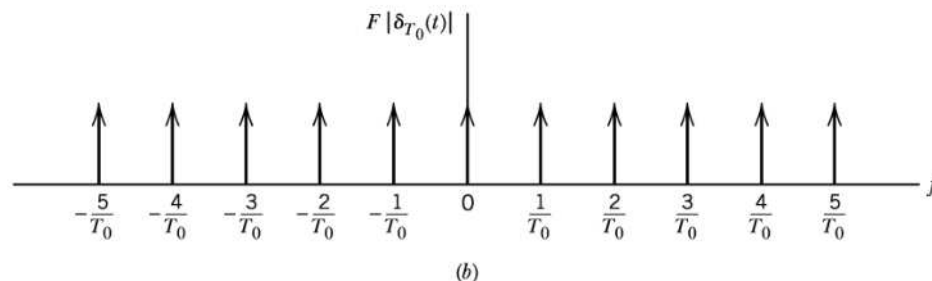
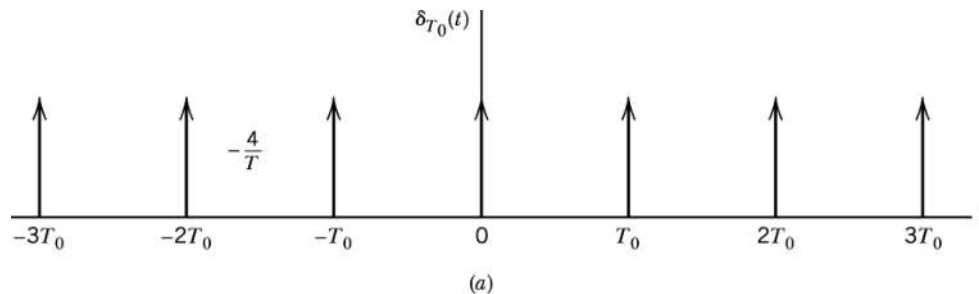
Utilização mais eficiente dos meios de comunicação (cabos, FO, ondas de rádios):

- Multiplexação para transmissão digital;
- Eliminação de redundância por meio de codificação de fonte em uma transmissão digital;
- Adição de redundância controlada para correção de erros;
- Especificações de padrões complexos que podem ser compartilhado em escala mundial;
- Facilidade em implementar técnicas de equalização.

Amostragem

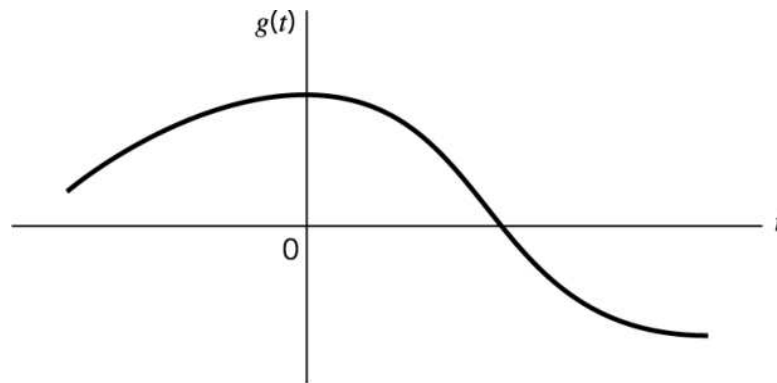
A TF de um sinal periódico consiste na função delta ocorrendo em múltiplos inteiros da frequência fundamental $f_0 = 1/T_0$ ponderada por um fator $G(nf_0)$.

$$\sum_{m=-\infty}^{\infty} g(t - mT_0) \Leftrightarrow f_0 \sum_{n=-\infty}^{\infty} G(nf_0) \delta(f - nf_0) \quad \sum_{m=-\infty}^{\infty} \delta(t - mT_0) \Leftrightarrow f_0 \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(f - nf_0)$$

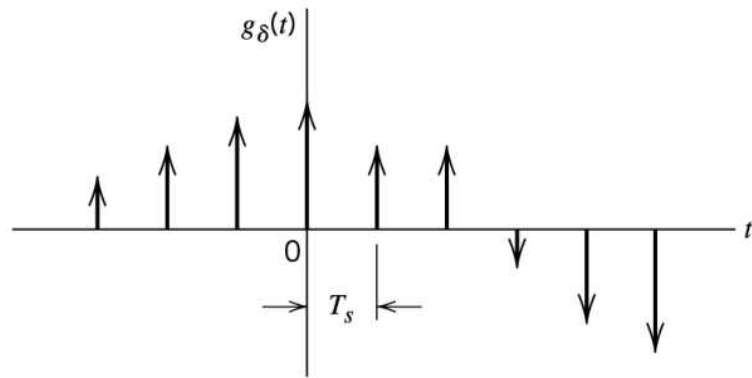


✓ Amostrar um sinal no domínio do tempo tem o efeito de tornar seu espectro periódico no domínio da frequência.

Amostragem Instantânea



(a)



(b)

Considerando $g(t)$ um sinal arbitrário de energia finita.

Suponhamos que amostramos $g(t)$ instantaneamente a uma taxa uniforme de T_s segundos.

Obtendo $\{g(nT_s)\}$, uma sequência de amostras espaçadas de T_s segundos.

T_s - período de amostragem e $f_s = 1/T_s$ - taxa de amostragem.

Seja $g_\delta(t)$ o sinal obtido na forma ideal de amostragem – **amostragem instantânea**.

$$g_\delta(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} g(nT_s) \delta(t - nT_s)$$

Figura 7.1 O processo de amostragem. (a) Sinal analógico. (b) Versão amostrada instantaneamente



Amostragem Instantânea

➤ TF de um sinal periódico:
$$\sum_{m=-\infty}^{\infty} g(t - mT_0) \Leftrightarrow f_0 \sum_{n=-\infty}^{\infty} G(nf_0) \delta(f - nf_0)$$

➤ Aplicando a propriedade da dualidade da TF, teremos:

$$g_{\delta}(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} g(nT_s) \delta(t - nT_s)$$

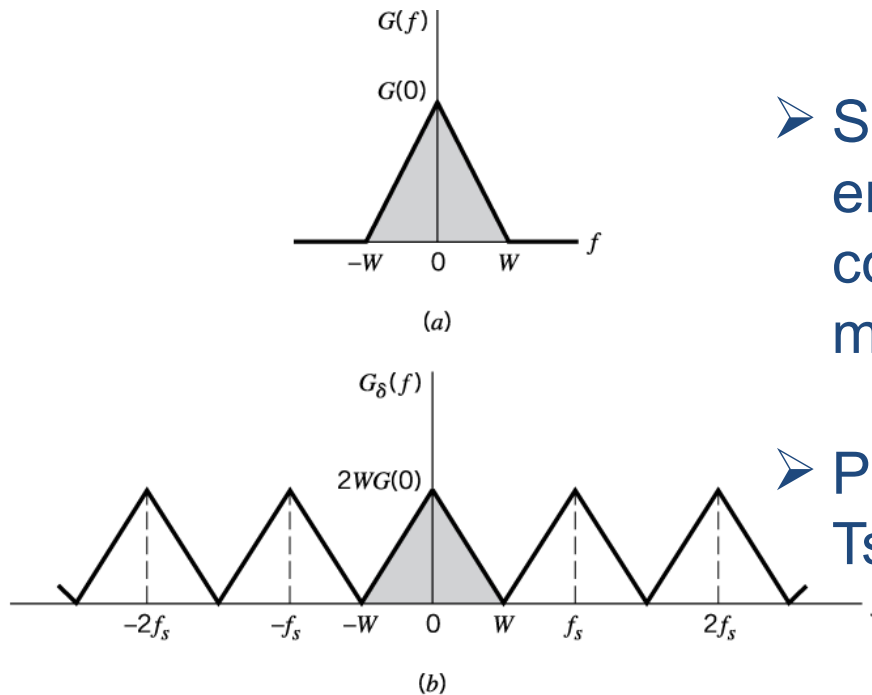
$G(f)$ T. F. do sinal $g(t)$

f_s Taxa de amostragem

$$g_{\delta}(t) \leftrightarrow f_s \sum_{m=-\infty}^{\infty} G(f - mf_s)$$

O processo de amostrar uniformemente um sinal de tempo contínuo de energia finita resulta em um espectro periódico com um período igual à taxa de amostragem.

Processo de Amostragem



➤ Sinal $g(t)$ estritamente limitado em banda, sem quaisquer componentes de frequência maiores do que W hertz.

➤ Período de amostragem $T_s = 1/2W$, ou seja, $f_s = 2W$.

Figura 7.2 (a) Espectro de um sinal $g(t)$ estritamente limitado em banda. (b) Espectro de uma versão amostrada de $g(t)$ para um período de amostragem $T_s = 1/2W$.

➤ Reescrevendo:

$$G_{\delta}(f) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} g(nT_s) \exp(-j2\pi n f T_s)$$

$$G_{\delta}(f) = f_s G(f) + f_s \sum_{\substack{m=-\infty \\ m \neq 0}}^{\infty} G(f - m f_s)$$



Teorema da amostragem

Um sinal de energia finita limitado em faixa, o qual não contém componentes de frequência em radiano mais elevados do que W , é descrito de maneira completa especificando-se seus valores em instantes de tempo separados $\frac{1}{2W}$ por segundos.

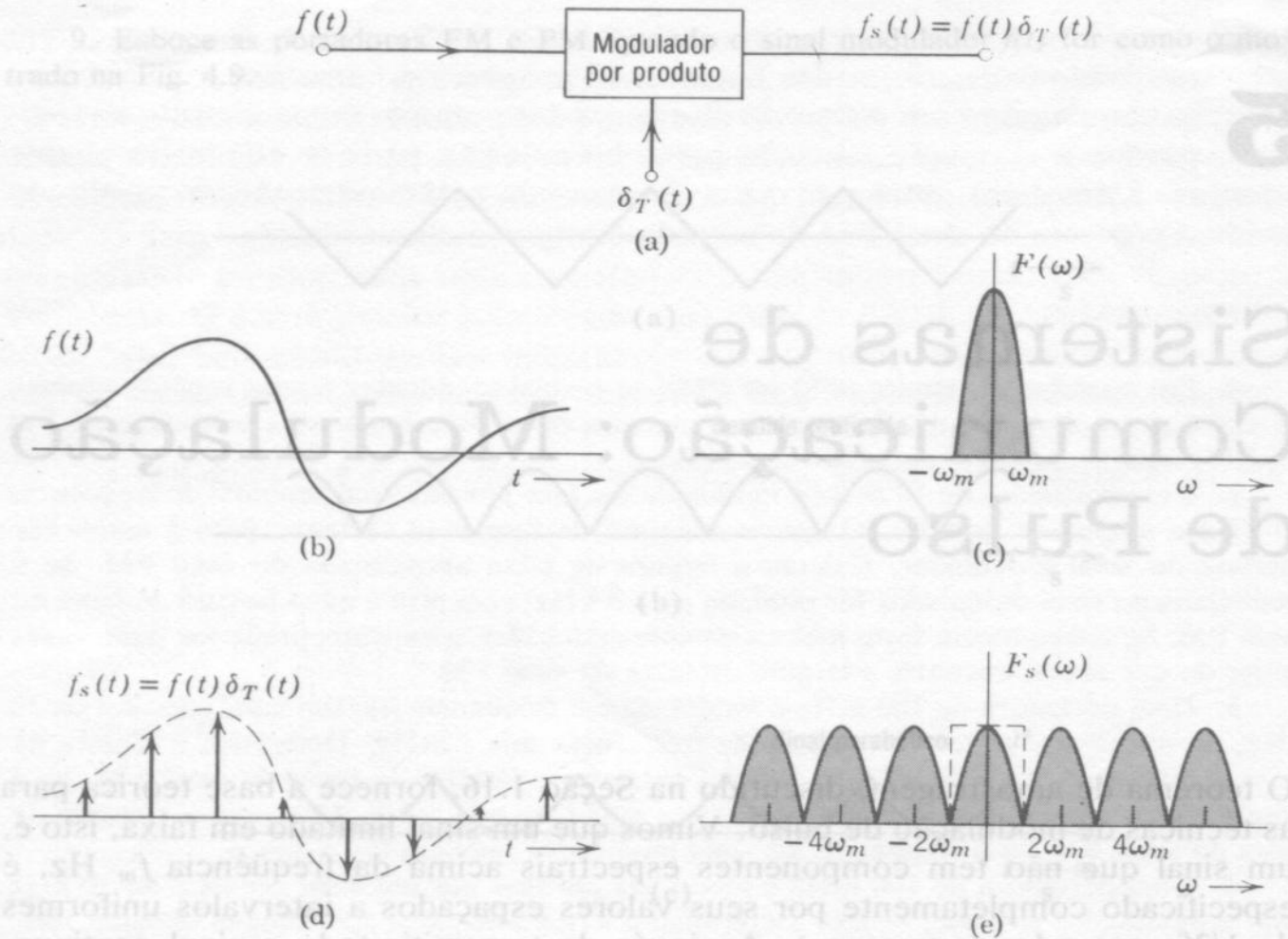
Um sinal limitado em banda de energia finita, que possui apenas componentes de frequência menores do que W hertz, pode ser completamente recuperado a partir do conhecimento de suas amostras tomadas à taxa de $2W$ amostras por segundo.

A frequência de amostragem deve ser maior ou igual a duas vezes a máxima frequência do sinal a ser amostrado (frequência de Nyquist).

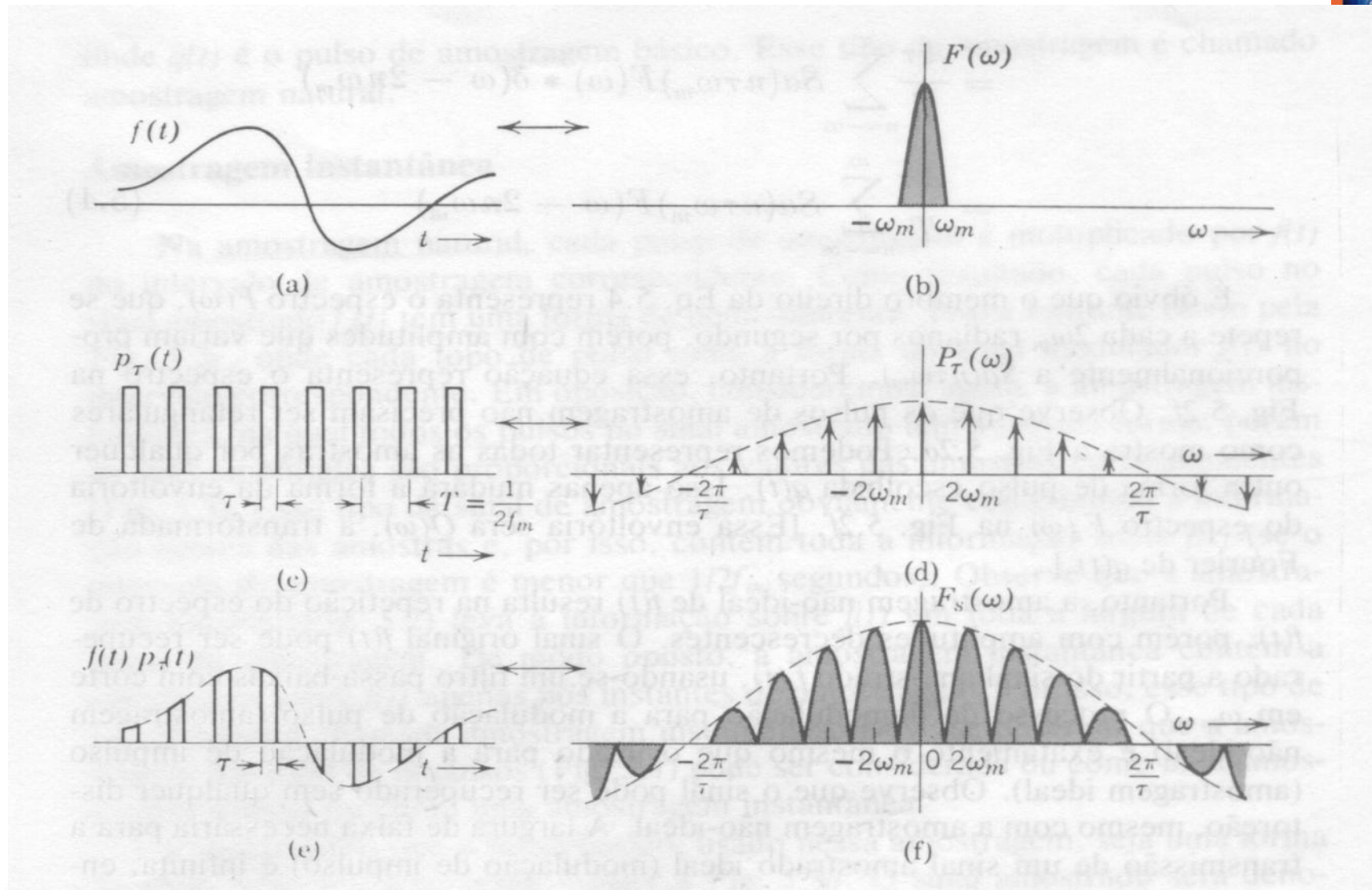
Amostragem instantânea

230

SISTEMAS DE COMUNICAÇÃO

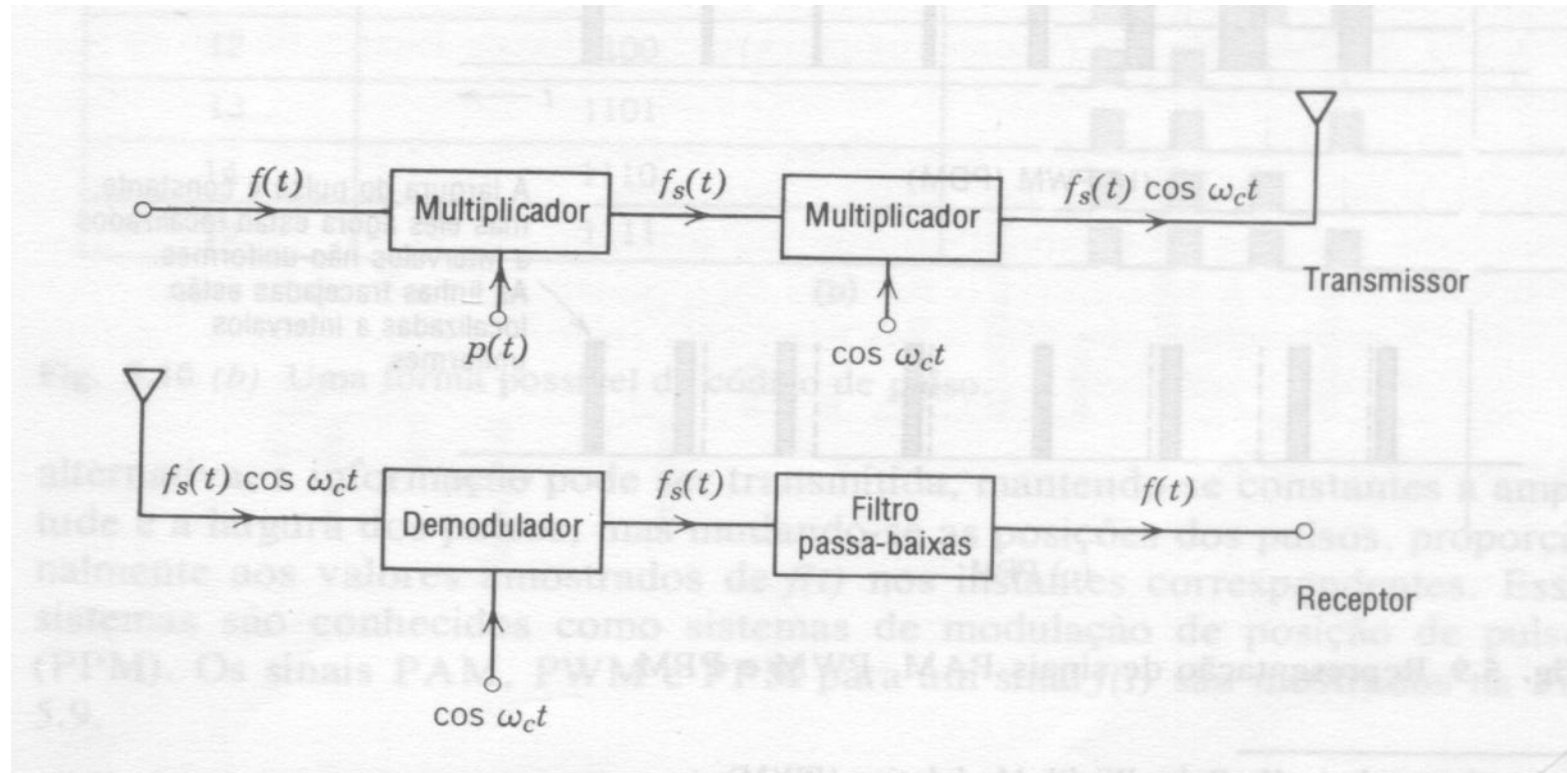


Amostragem natural





TX e RX – Sinal PAM



Efeitos de aliasing - Falseamento

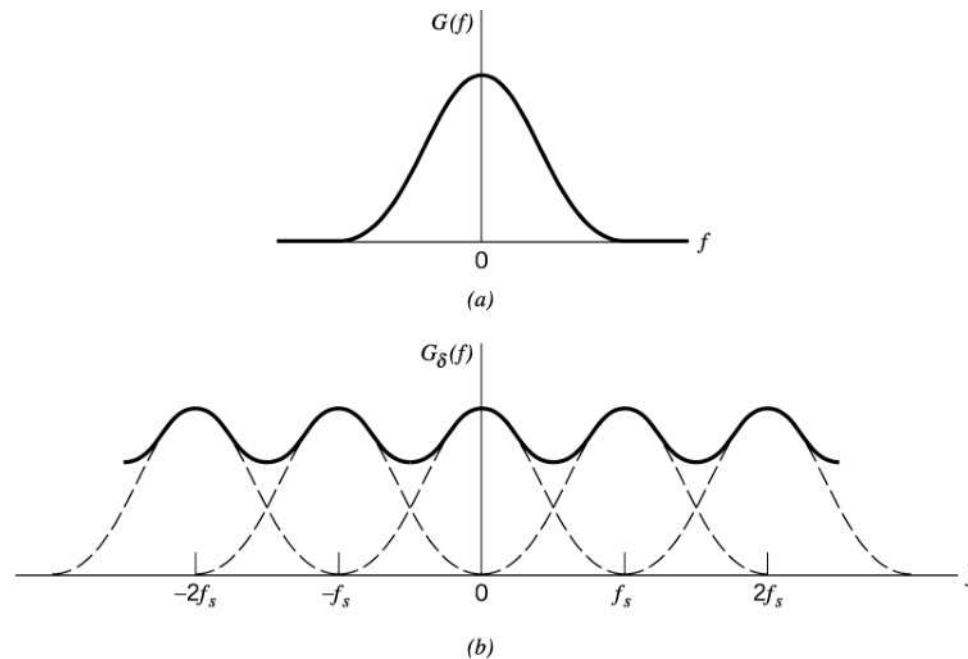
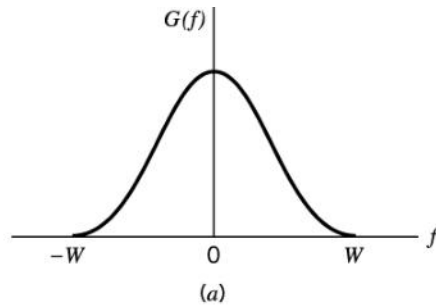


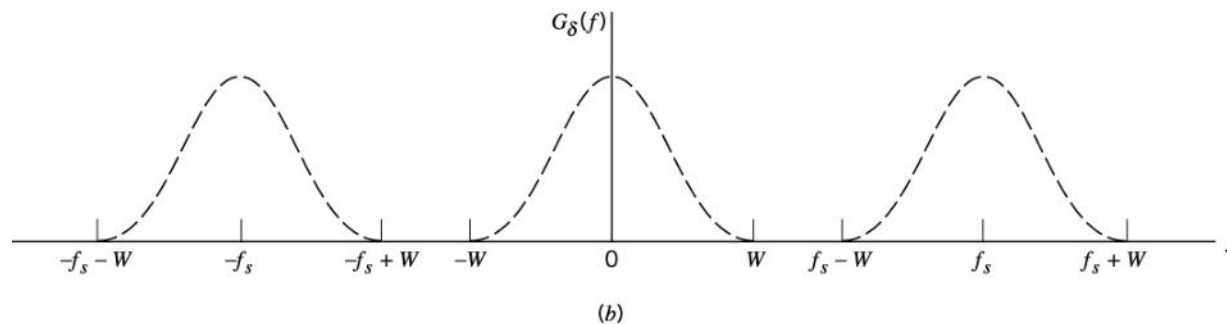
Figura 7.3 (a) Espectro de um sinal, (b) espectro de uma versão subamostrada do sinal que exhibe o fenômeno de falseamento.

- ❑ Antes da amostragem usa um filtro anti-aliasing passa-baixa, para atenuar as componentes em alta frequência do sinal.
- ❑ O sinal é amostrado em uma taxa ligeiramente superior a de Nyquist.

Teorema da amostragem – Filtro de reconstrução



✓ *Filtro de reconstrução é passa-baixas com uma banda passante que se estende de $-W$ a W , que é determinada pelo filtro antifalseamento.*



✓ *O filtro possui uma banda de transição que se estende de W a $f_s - W$, em que f_s é a taxa de amostragem.*

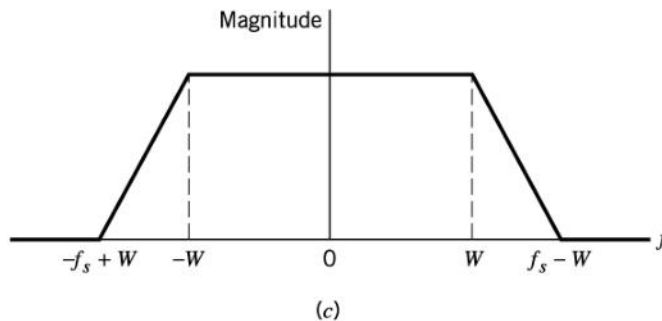
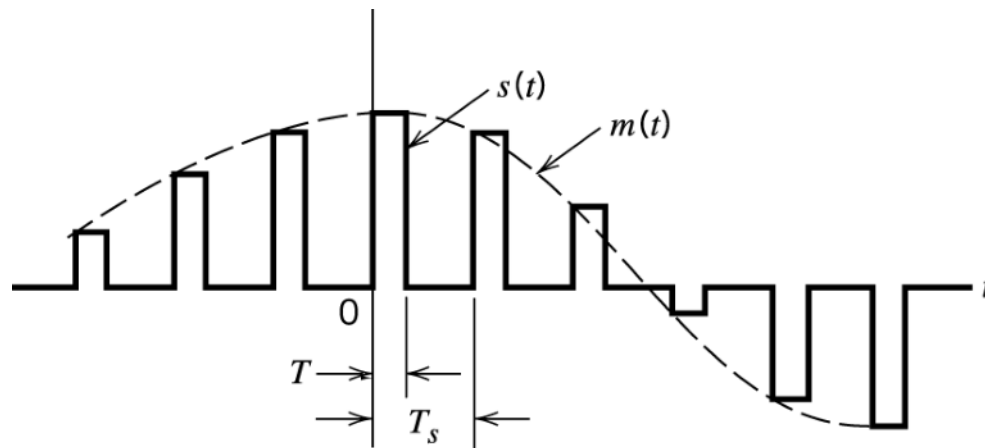


Figura 7.4 (a) Espectro de um sinal portador de informação processado por um filtro antifalseamento. (b) Espectro de uma versão instantaneamente amostrada do sinal, supondo a utilização de uma taxa de amostragem maior do que a taxa de Nyquist. (c) Resposta em magnitude do filtro de reconstrução.

PAM – Modulação por amplitude de pulso



$$S(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} m(nT_s)h(t - nT_s)$$



$$S(f) = f_s \sum_{n=-\infty}^{\infty} M(f - kf)H(f)$$

Figura 7.5 Amostras de topo plano.

$$H(f) = T \operatorname{sinc}(fT) \cdot e^{-i\omega t}$$

Sample and hold – (amostrar e reter) com o objetivo de diminuir a largura de banda, pois a largura de banda é inversamente proporcional à duração do pulso. $W \propto 1/T$

Demodulação de um sinal PAM

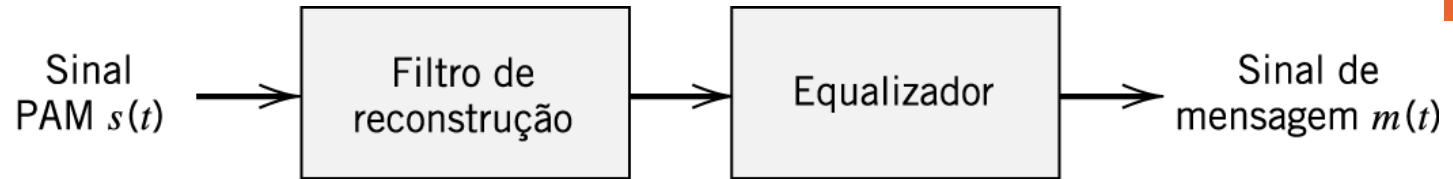


Figura 7.8 Recuperação de $m(t)$ a partir do sinal PAM $s(t)$.

PAM – Introduz uma distorção de amplitude e um retardo de $T/2$. A distorção pode ser corrigida com um equalizador (diminui a perda na banda de passagem do filtro de reconstrução quando a frequência se eleva).

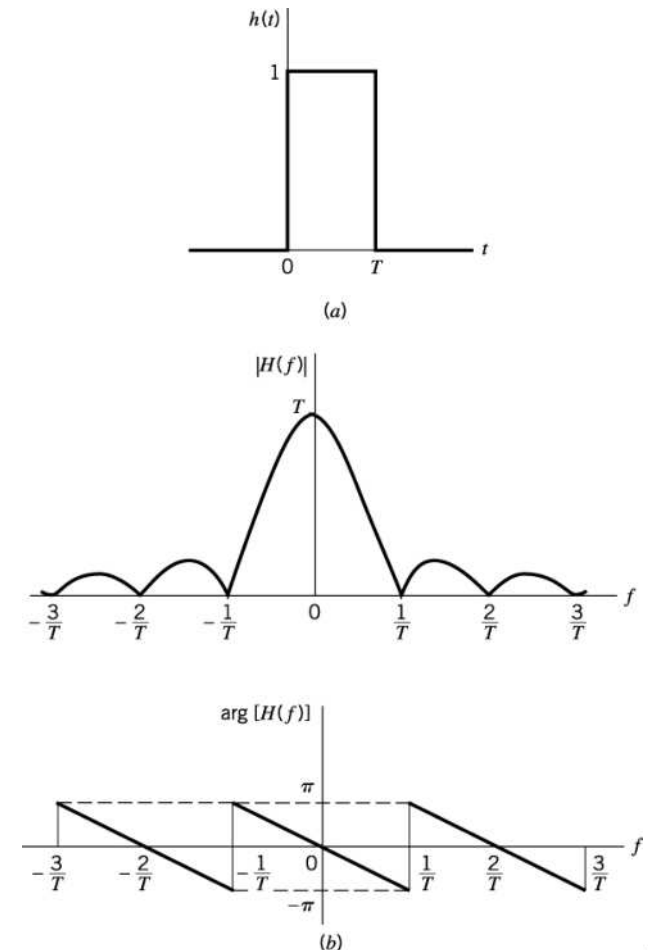
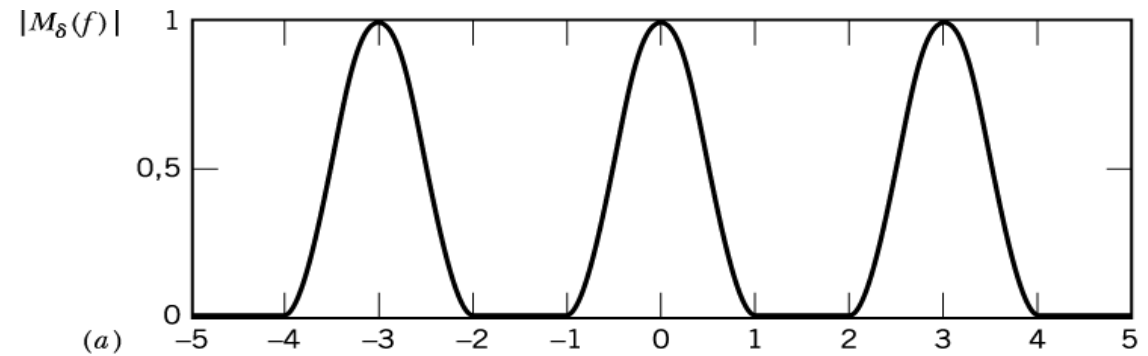


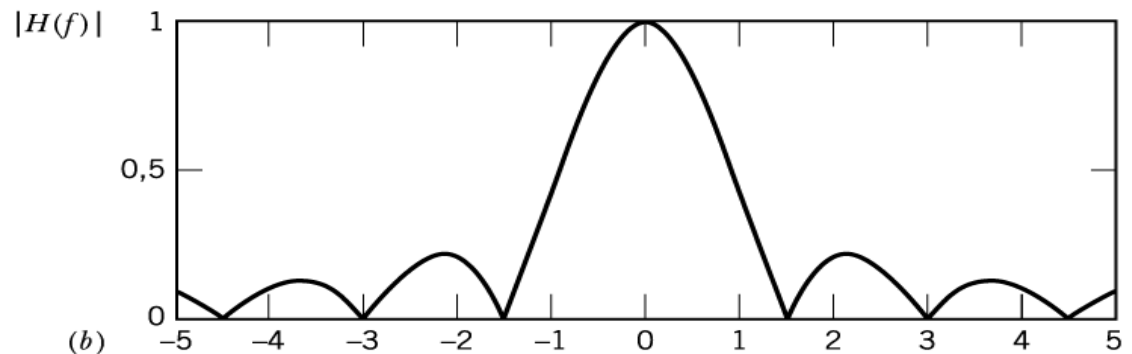
Figura 7.6 (a) Pulso retangular $h(t)$. (b) Espectro $H(f)$.



❖ Espectro do sinal amostrado

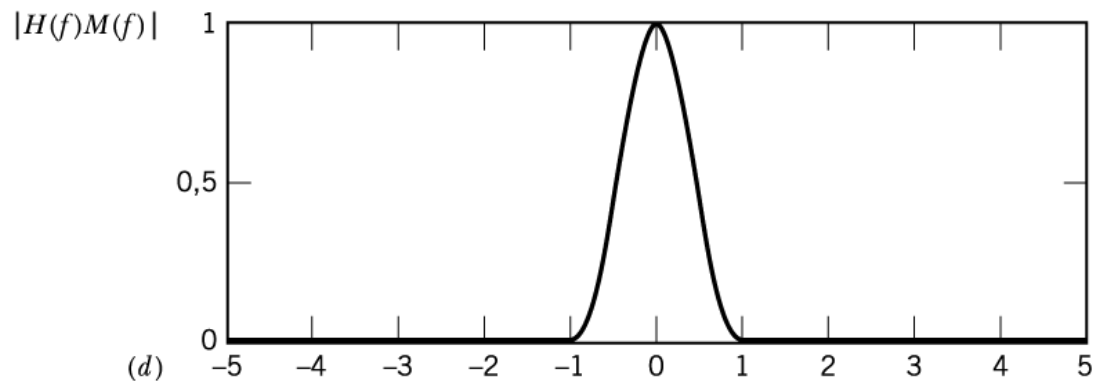


❖ Espectro do filtro passa-baixas

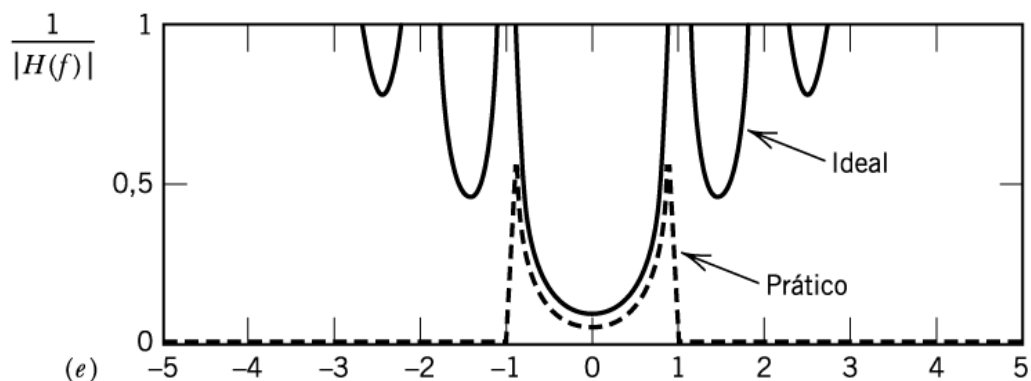




❖ Espectro após a filtragem do receptor



❖ Espectro do equalizador.



Multiplexação por divisão de tempo - TDM

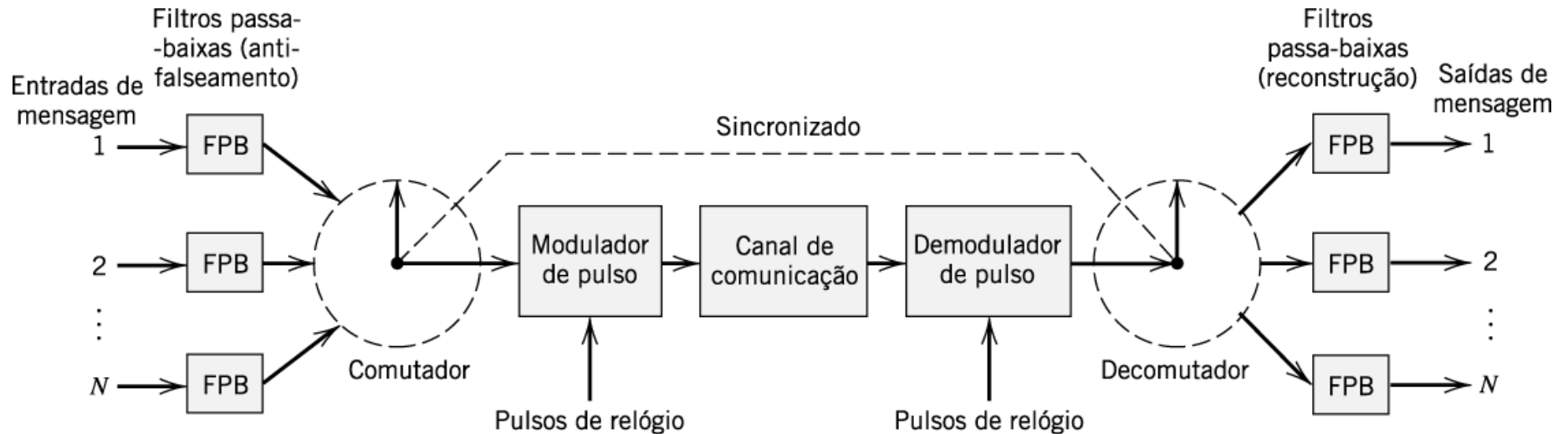
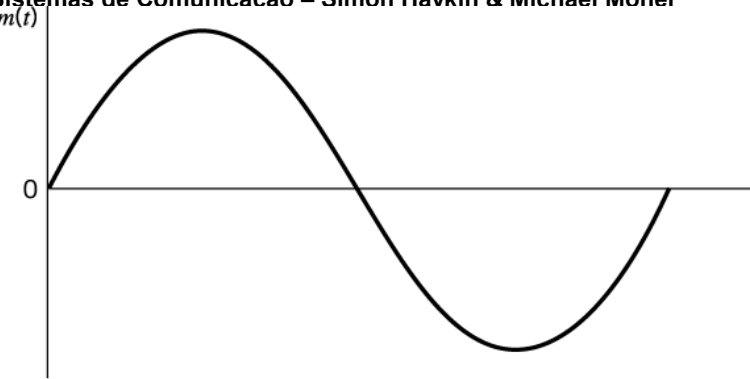


Figura 7.9 Diagrama de blocos do sistema TDM.

Outras formas de modulação



(a)



(b)



(c)



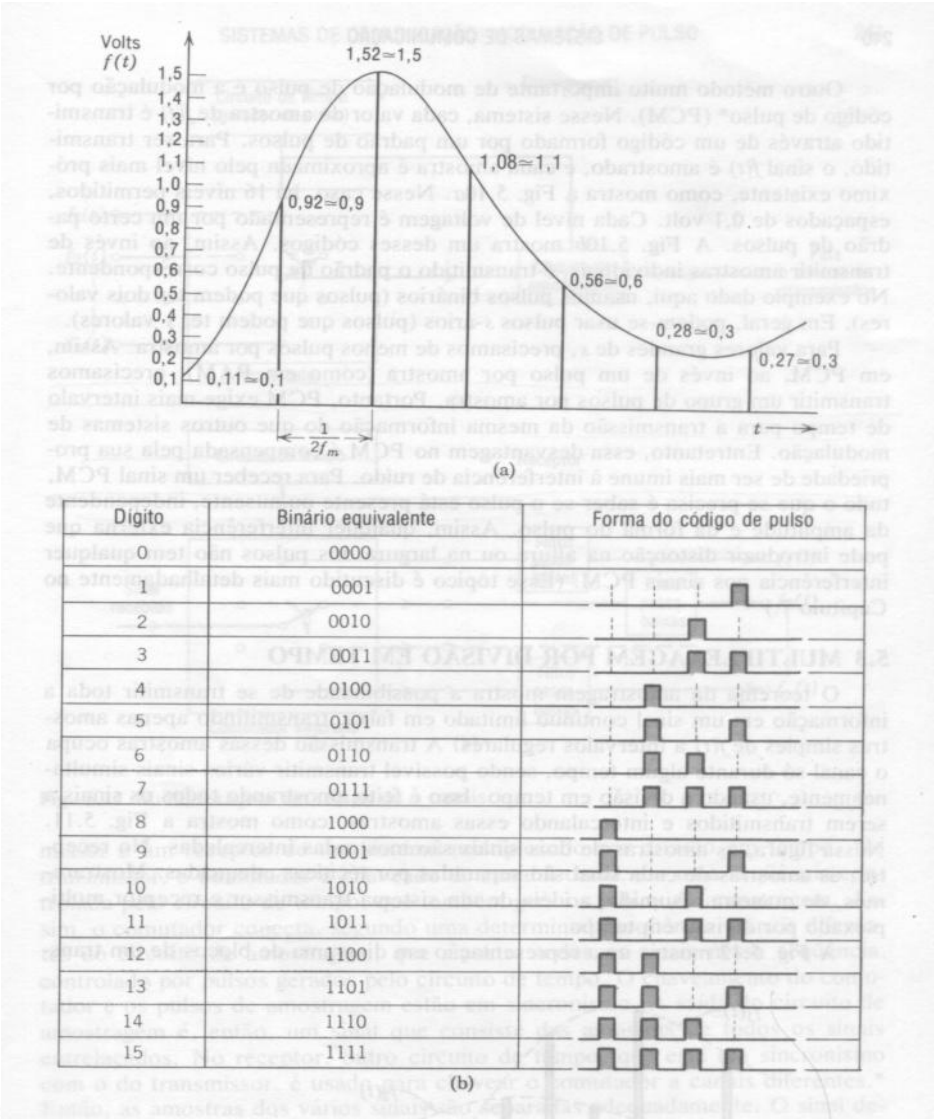
(d)

Tempo →

- Modulação por duração de pulso ou por largura de pulso ou por comprimento de pulso.
- Modulação por posição de pulso

Figura 7.10 Ilustração de duas formas diferentes de modulação por tempo de pulso para o caso de uma onda modulante senoidal. (a) Onda modulante. (b) Portadora de pulsos. (c) Onda PDM. (d) Onda PPM.

PCM



Outras formas de modulação

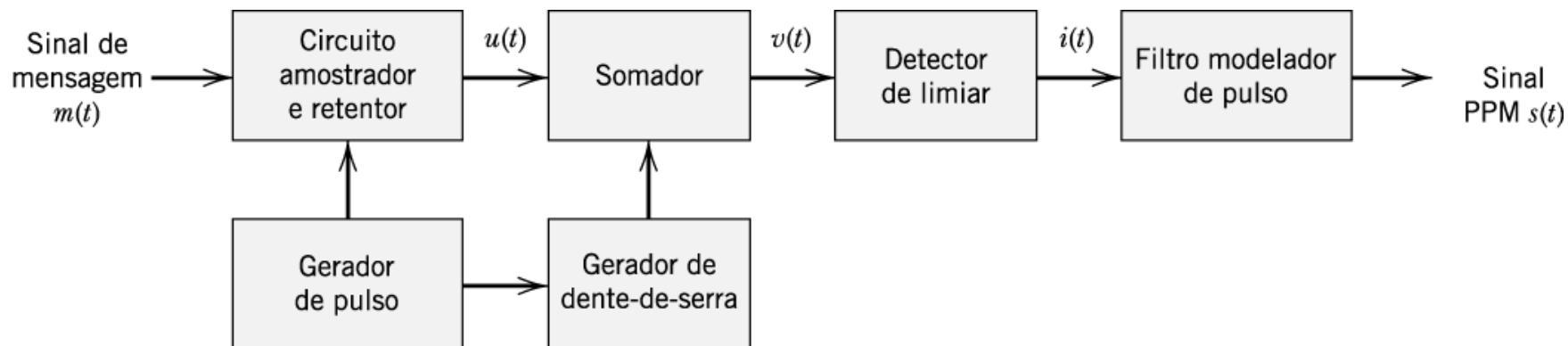
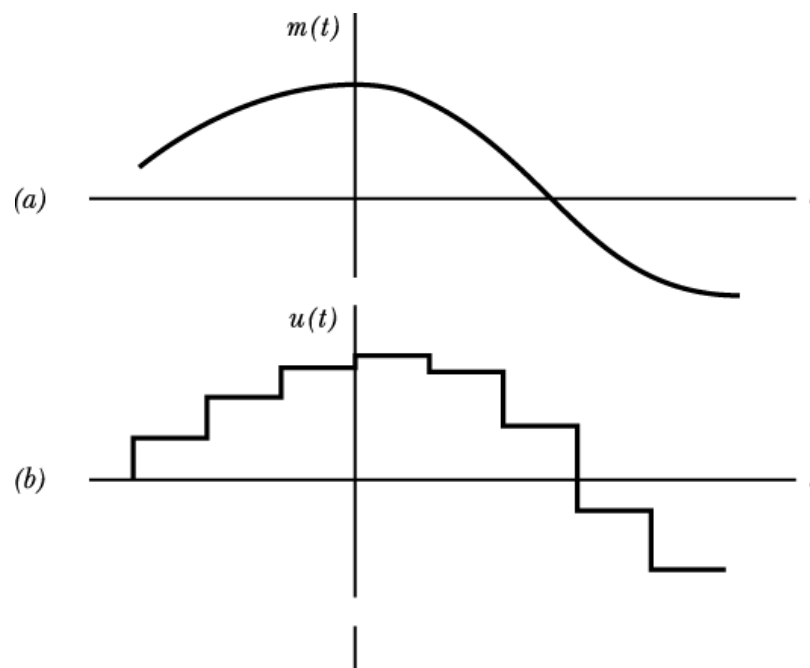


Figura 7.11 Diagrama de blocos de um gerador PPM.



Outras formas de modulação

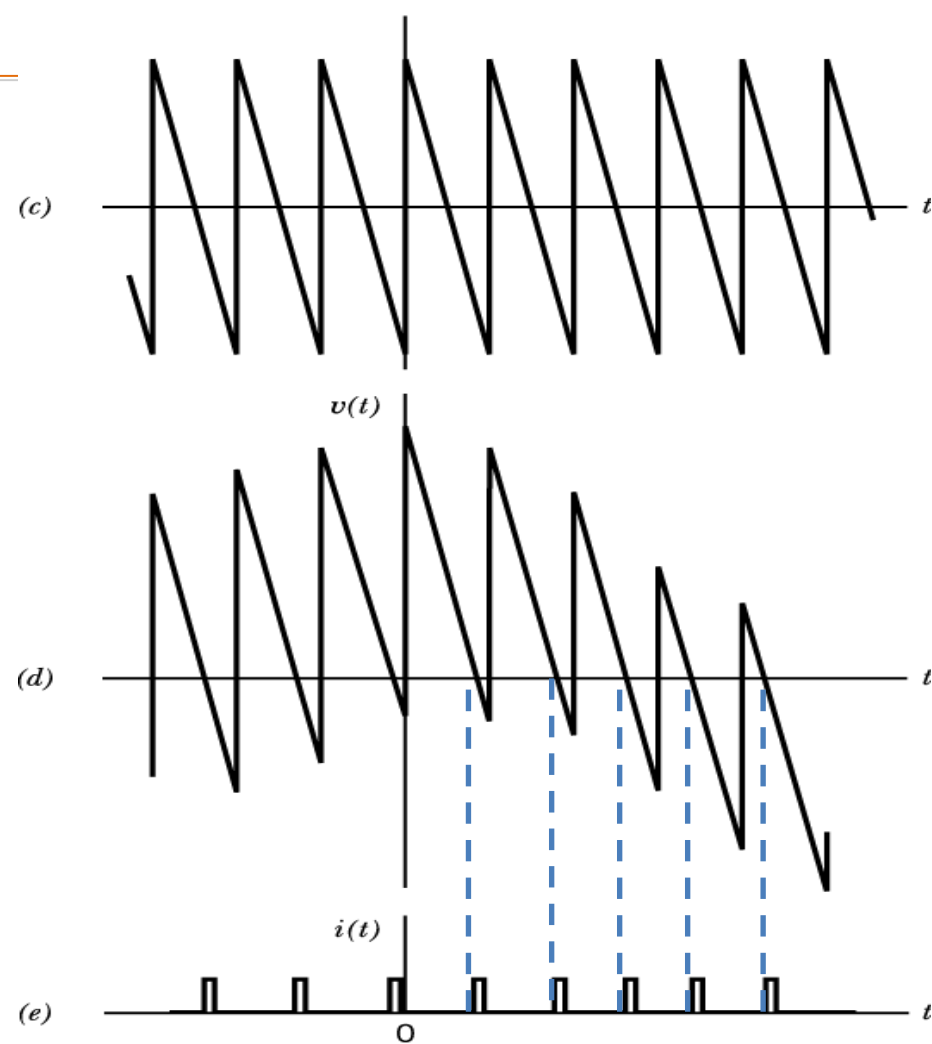
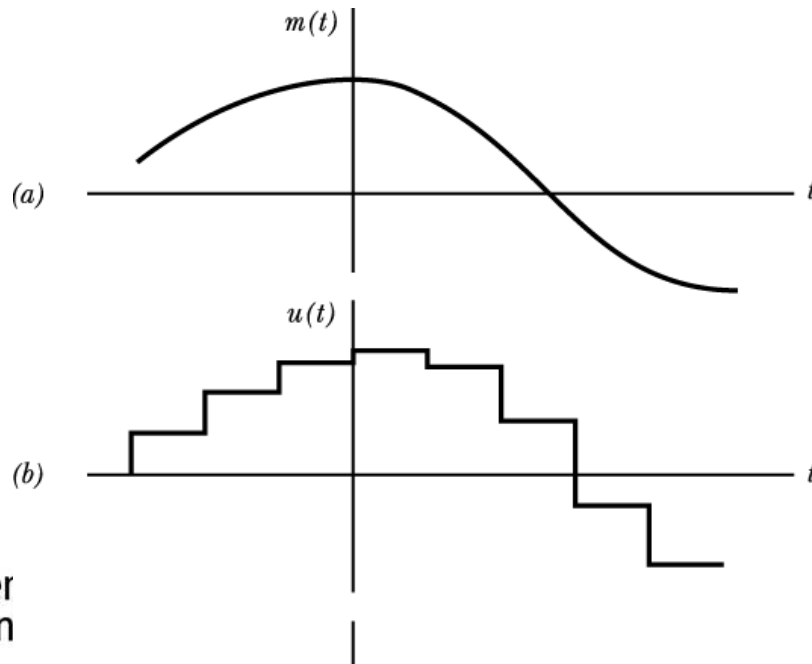


Figura 7.12 Geração de um sinal PPM. (a) Sinal de mensagem. (b) Aproximação em escada do sinal de mensagem. (c) Onda dente-de-serra. (d) Onda composta obtida adicionando-se (b) e (c). (e) Sequência de "impulsos" utilizada para gerar o sinal PPM.

EX: PPM em rádio impulsivo

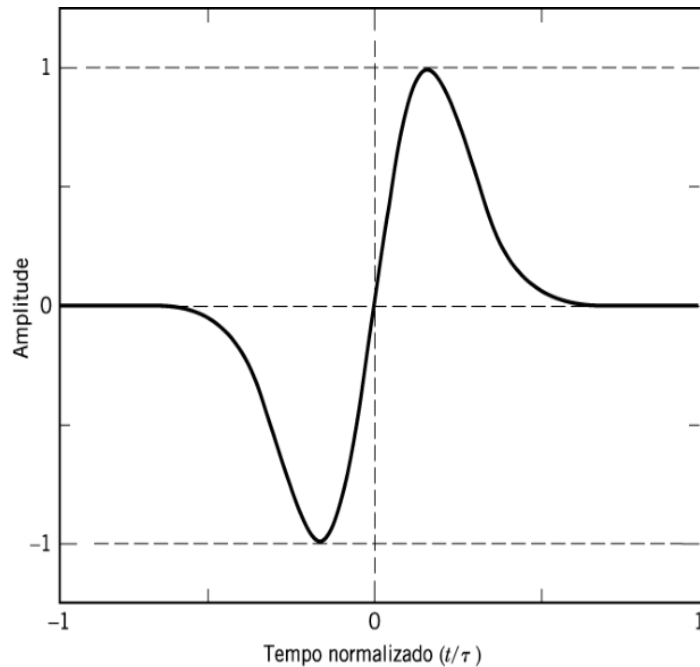


Figura 7.17 Ilustração de um monociclo gaussiano utilizado para rádio impulsivo.

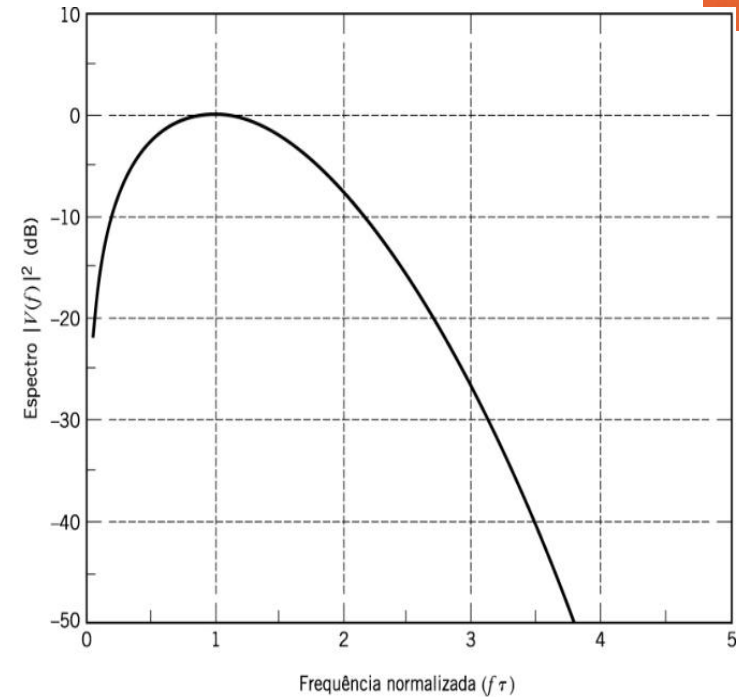


Figura 7.18 Espectro de magnitude de um monociclo gaussiano.

- Modulação por posição de pulso;
 - Transmissão de rádio em ultra banda larga (UWB);
 - Se $t_{al}=1$ nanossegundo o eixo de frequência varia de 0 a 5 GHz.
- $T_{al}=0,20$ a $1,50$ ns

EX: PPM em rádio impulsivo

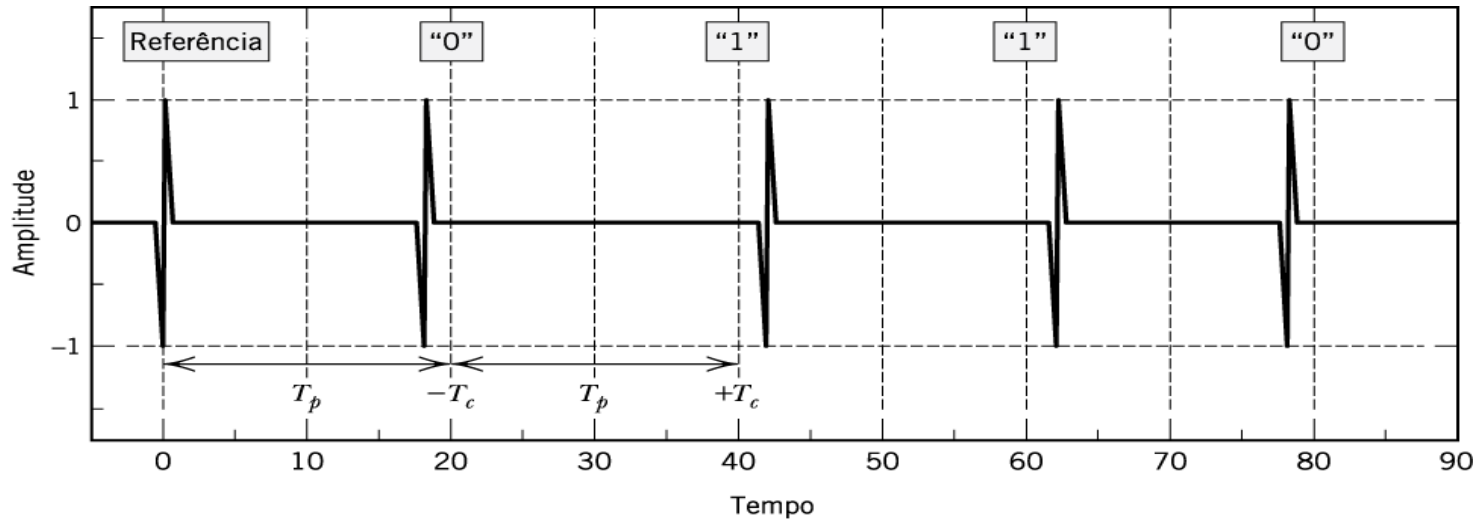


Figura 7.19 Modulação por posição de pulso de rádio impulsivo.

- Potência do sinal espalhada ao longo da largura de banda grande.
- Rádio UWB é limitado a aplicações de curta distância (< do que centenas de metros).
- Objetivo diminuir a interferência em canais de banda estreita que ocupam o mesmo espectro do rádio.
- Valores típicos da taxa de transmissão variam de 1 a 40 Mb/s.

Quantização

Consiste em aproximar as amplitudes das amostras $m(nTs)$ de um sinal de mensagem $m(t)$ no tempo $t=nTs$, para uma amplitude discreta $v(nTs)$, tomada de um conjunto finito de amplitudes possíveis.

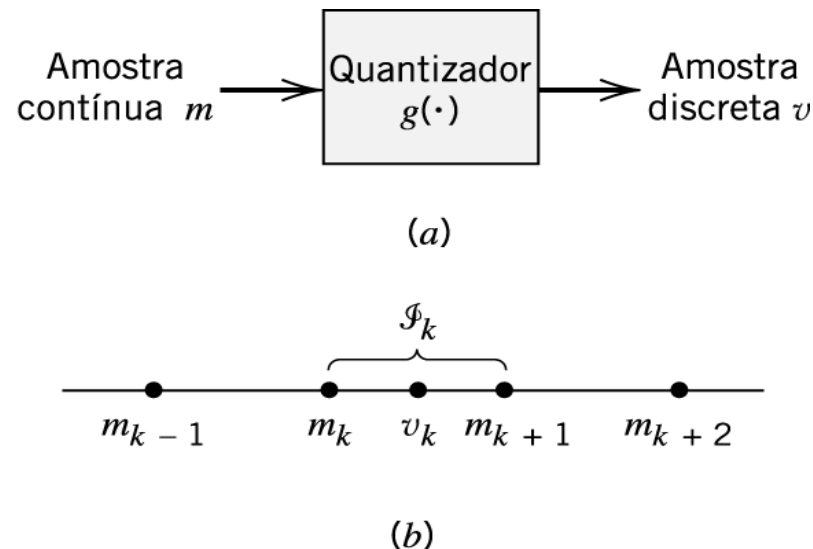


Figura 7.20 Descrição de um quantizador sem memória.

Quantização simétrica

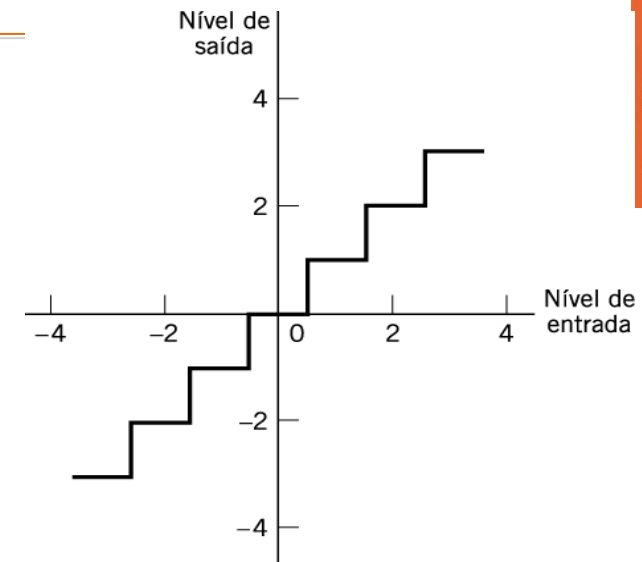
O tamanho do degrau será:

$$\Delta = \frac{2m_{max}}{L} = \frac{2m_{max}}{2^R}$$

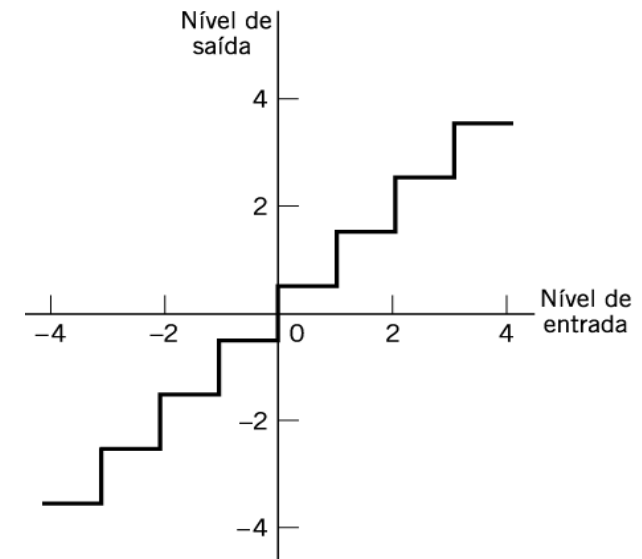
m_{max} máxima amplitude da entrada m com valor médio igual a zero;

L número total de níveis de representação;

R número total de bits por amostra;



(a)

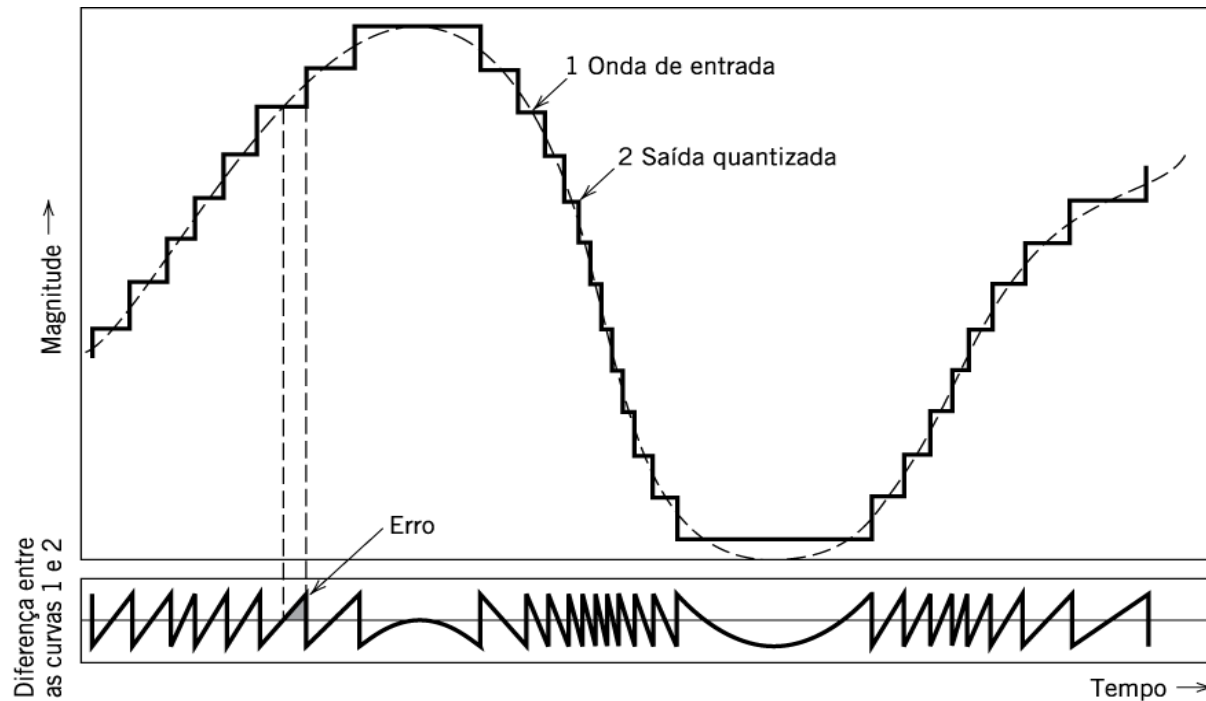


(b)

Figura 7.21 Dois tipos de quantização: (a) meio-piso e (b) meio-degrau.



Erro de quantização



$$Q = M - V$$

Q – erro de quantização;

M – entrada;

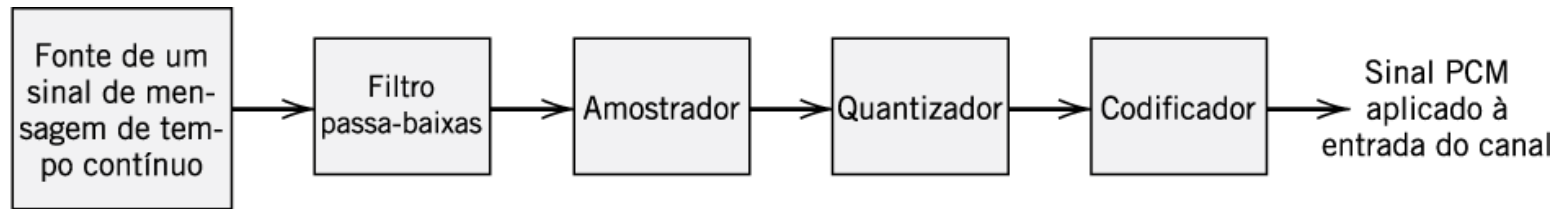
V – saída do quantizador;

Figura 7.22 Ilustração do processo de quantização. (Adaptado de Bennett, 1948, com autorização da AT&T.)

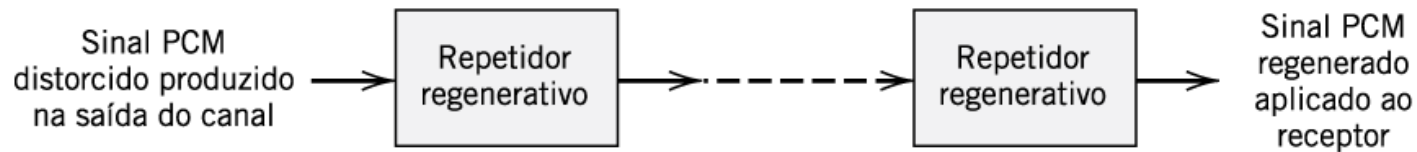
Erro de quantização será limitado em:

$$-\frac{\Delta}{2} \leq q \leq \frac{\Delta}{2}$$

PCM – Modulação por código de pulso



(a) Transmissor



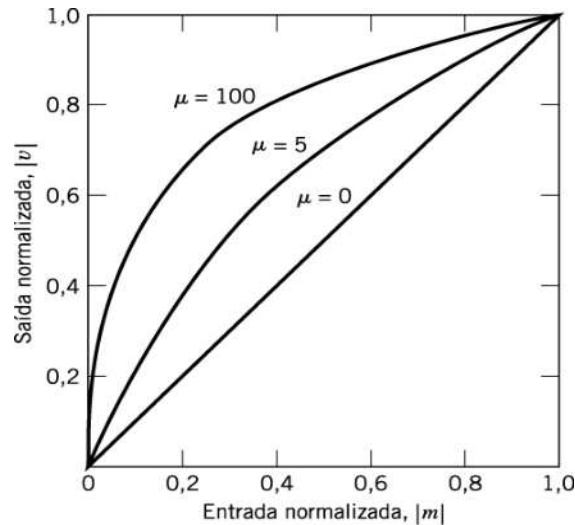
(b) Percurso de transmissão



(c) Receptor

Figura 7.23 Os elementos básicos de um sistema PCM.

Quantização não uniforme (Lei μ - Lei A)



(a)

$$|v| = \frac{\log(1 + \mu |m|)}{\log(1 + \mu)}$$

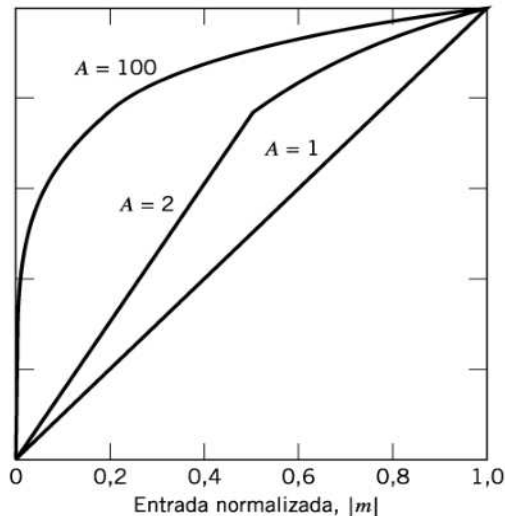
m – tensões de entrada normalizada

v – tensões de saída normalizada

μ – const.

$$\mu = 255$$

$$A = 87,6$$



(b)

$$|v| = \begin{cases} \frac{A|m|}{1 + \log A}, & 0 \leq |m| \leq \frac{1}{A} \\ \frac{1 + \log A|m|}{1 + \log A}, & \frac{1}{A} \leq |m| \leq 1 \end{cases}$$

Codificação

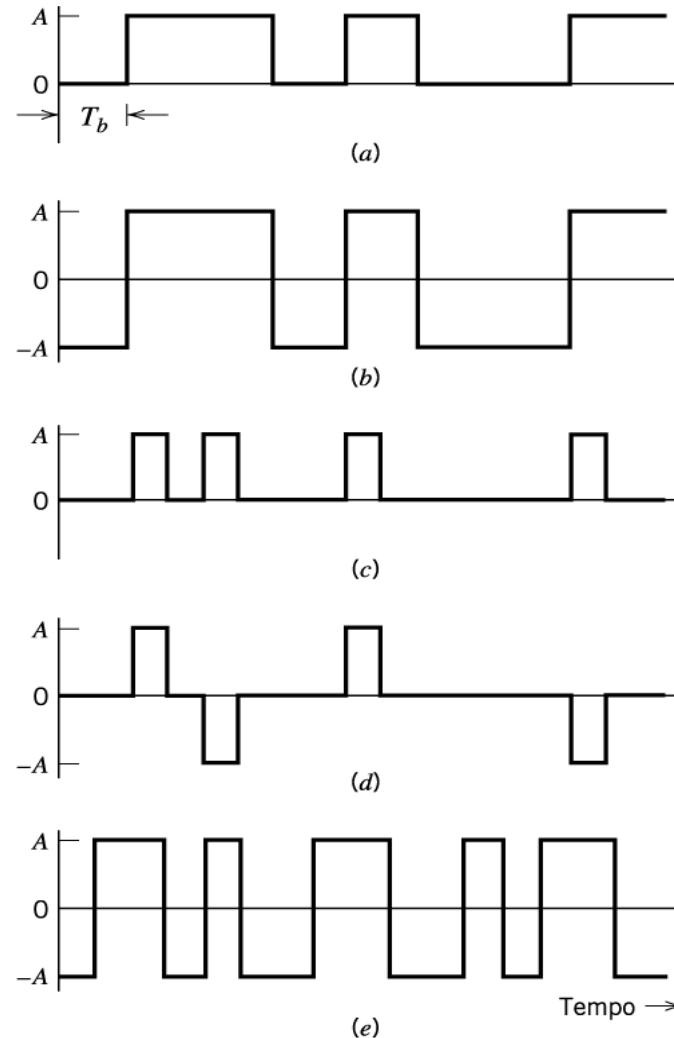


Figura 7.25 Códigos de linha para as representações elétricas de dados binários. (a) Sinalização unipolar NRZ. (b) Sinalização polar NRZ. (c) Sinalização unipolar RZ. (d) Sinalização bipolar RZ. (e) Fase dividida (*split-phase*) ou código Manchester.



Espectro de potência de códigos de linhas

(a) NRZ unipolar (b) NRZ polar (c) RZ unipolar (d) RZ bipolar (e) Código Manchester

A frequência é normalizada em relação à taxa de bits $1/T_b$, e a potência média é normalizada para a unidade.

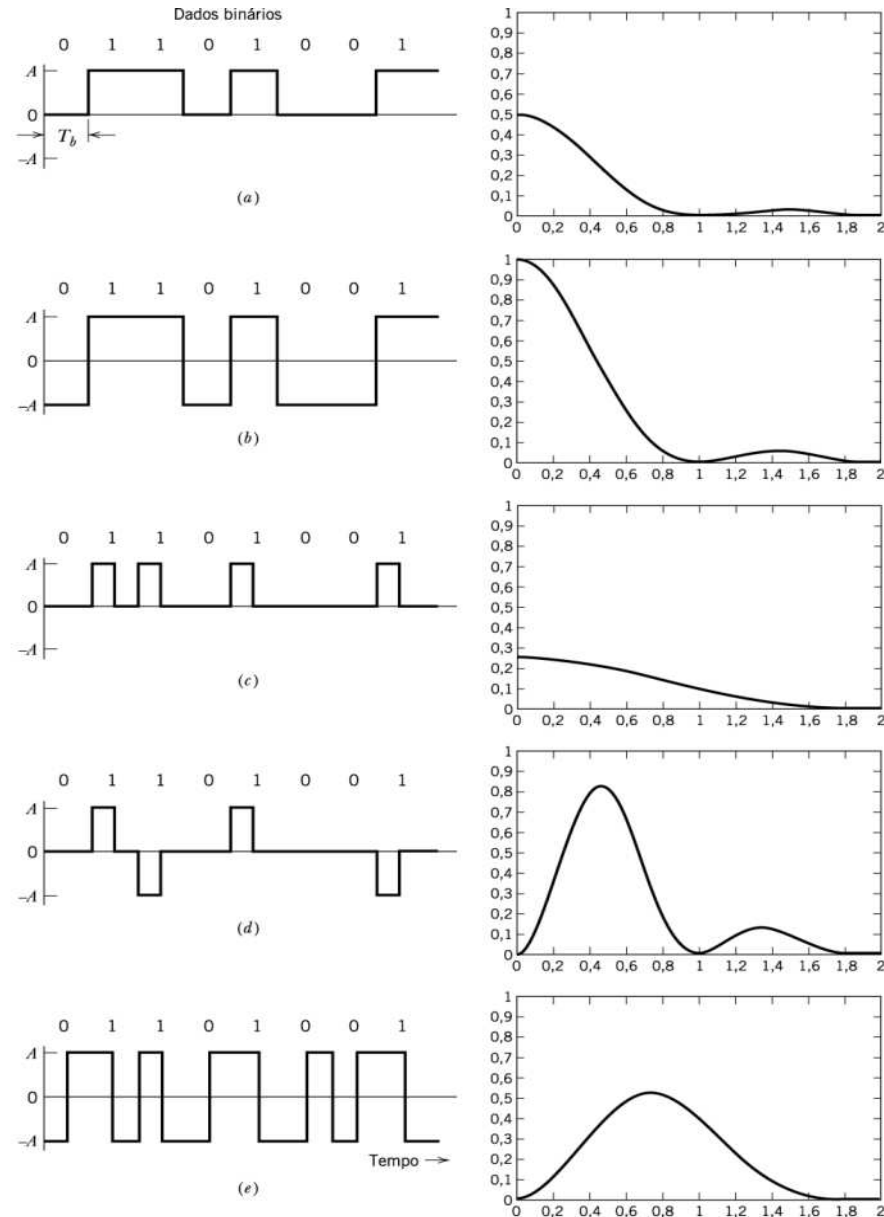


Figura 8.1 (a) Código de linha unipolar NRZ e seu espectro de magnitude. (b) Código de linha polar NRZ e seu espectro de magnitude. (c) Código de linha unipolar RZ e seu espectro de magnitude. (d) Código de linha bipolar RZ e seu espectro de magnitude. (e) Código de linha Manchester e seu espectro de magnitude.



Codificação diferencial

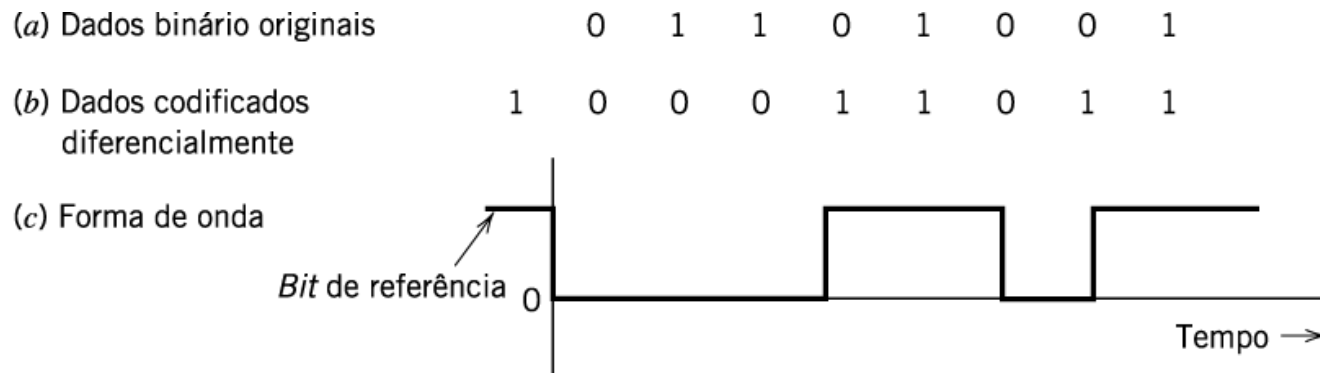


Figura 7.26 (a) Dados binários originais. (b) Dados codificados diferencialmente, supondo-se *bit* de referência 1. (c) Forma de onda de dados codificados diferencialmente utilizando-se sinalização unipolar NRZ.

Regeneração

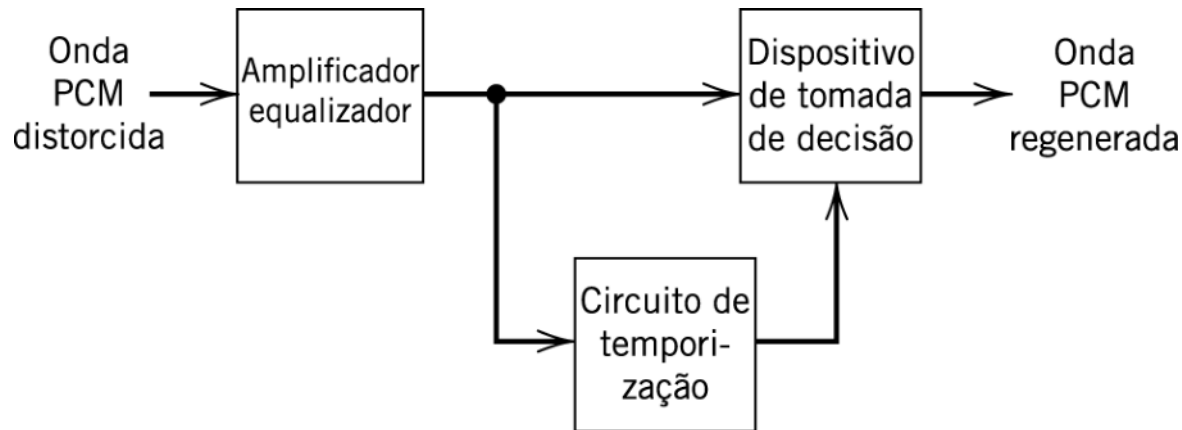


Figura 7.27 Diagrama de blocos de um repetidor regenerativo.

Equalizador - modela os pulsos recebidos fim de compensar os efeitos de distorções produzido por características de transmissão não-ideais do canal.

Temporizador - amostra os pulsos equalizados.

Tomada de decisão – decide se o símbolo é 0 ou 1 pela comparação de cada amostra com um limiar pré-determinado

TDM – Multiplexação por divisão de tempo

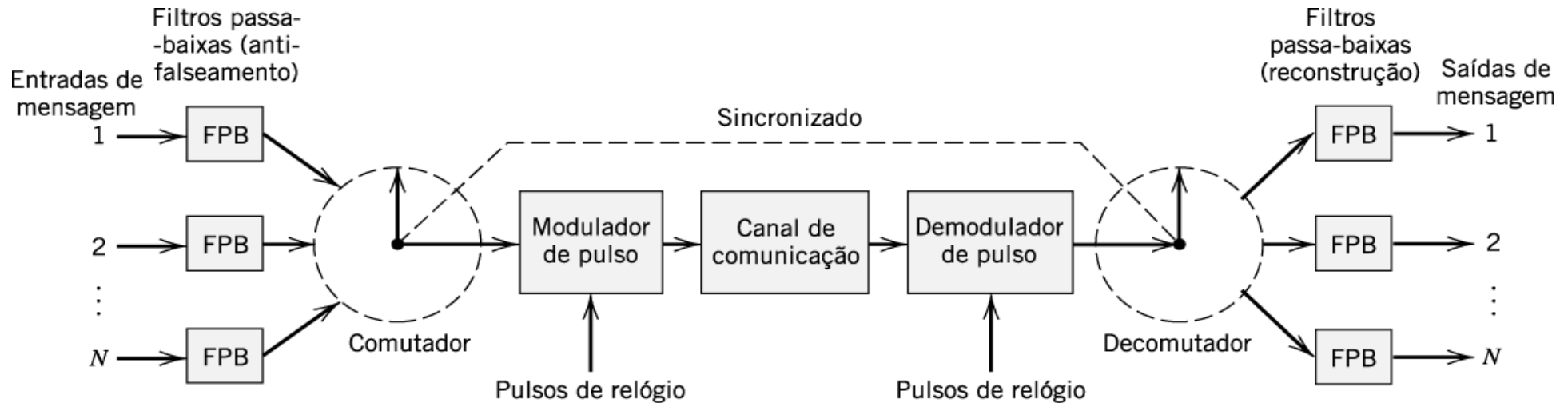
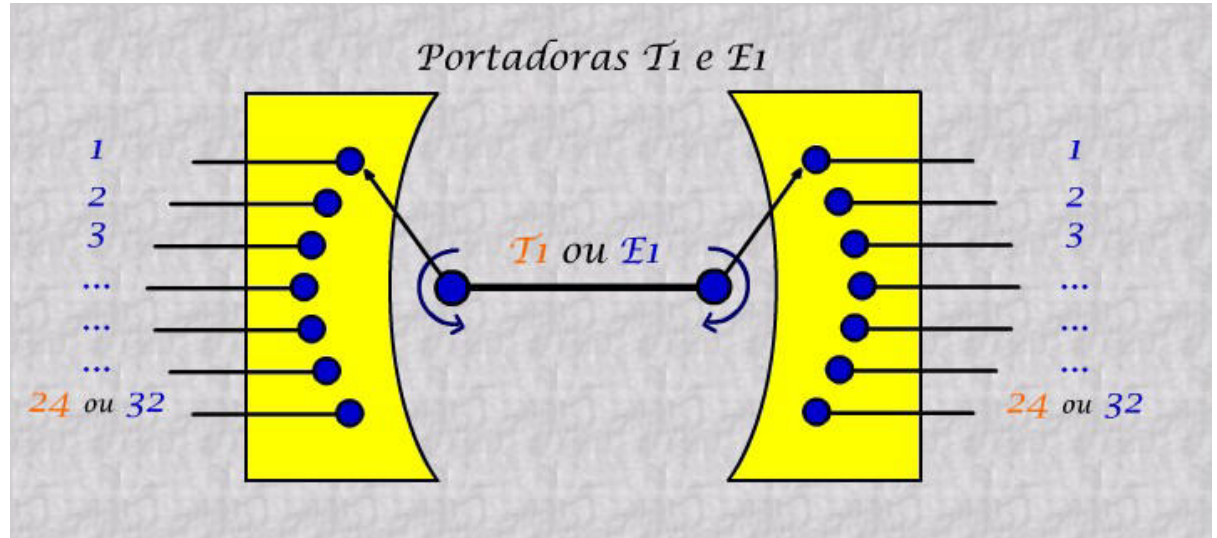


Figura 7.9 Diagrama de blocos do sistema TDM.

EX: TDM – Multiplexação por divisão de tempo



❑ Sistema de portadora T1:

- EUA, Canadá e Japão;
- 24 canais de voz;
- Sinal de voz passa por um filtro com frequência de corte em 3,1kHz;
- Amostrado a 8kHz.
- Compressão/expansão (*companding*) – 15 segmentos lineares para aproximar a lei $\mu=255$.



TDM – Multiplexação por divisão de tempo, PCM e o sistema T1

❑ Sistema de portadora T1:

- São 255 níveis de representações de amplitude, ou seja, 8 bits;
- TDM - 24 palavras de 8 bits + 1 bit único para sincronização - $(24 \times 8) + 1 = 193$ bits.
- Quadro básico tem duração de $125 \mu\text{s}$.
- Duração de cada bit = $125 \mu\text{s} / 193 = 0,647 \mu\text{s}$
- Taxa de transmissão resultante será: $1,544 \text{ Mb/s}$

❑ REDE OPTICA SÌNCRONA (SONET)

O padrão SONET permite a multiplexação de tráfego de alta velocidade em fibras ópticas.

- Multiplexação por divisão no tempo digital;
- Tamanho de quadro básico de $125 \mu\text{s}$;
- O quadro básico contém 6.480 bits;
- Taxa SONET será $51,84 \text{ Mb/s}$



SONET é a sigla de Synchronous Optical Network. O padrão SONET permite a multiplexação de tráfego de alta velocidade em fibras ópticas.

Exemplo:

- OC-1 – transporta 52 Mbps (672 canais de 64 kbps);

- OC-3 – transporta 155 Mbps (2.016 canais de 64 kbps) ;

.

É interessante ressaltar que o padrão SONET foi desenvolvido para transportar fluxos de informação do tipo DS-1 e DS-3, que são padrões utilizados nos EUA, Canadá, Coréia do Sul, Taiwan etc. O padrão SONET é semelhante ao **SDH** que foi desenvolvido para atender o transporte de informações nos padrões E1, E2, E3 e E4 utilizados na Europa, Brasil etc.

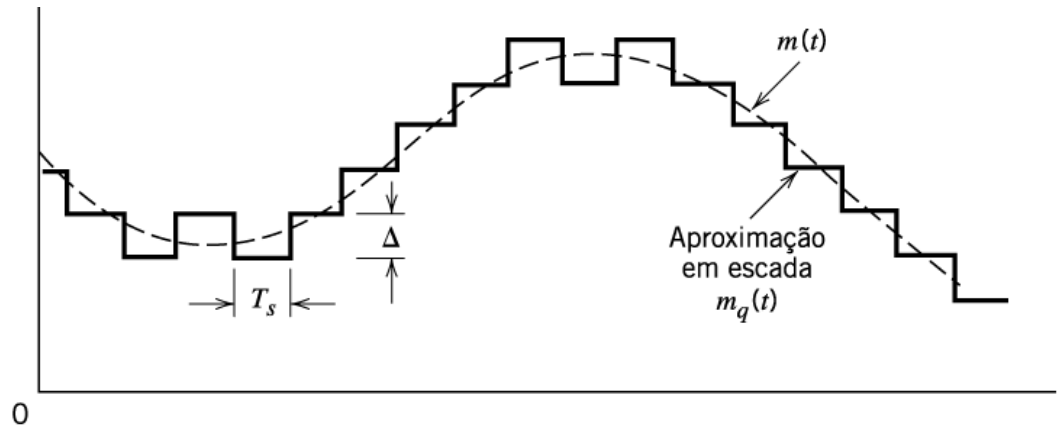
SDH é a sigla para Synvchronous Digital Hierarchy. O padrão SDH permite a multiplexação de tráfego de alta velocidade em fibras ópticas.

Exemplos:

- STM-0 – transporta 52 Mbps;

- STM-1 – transporta 155 Mbps;

Modulação Delta



(a)

$$e[n] = m[n] - m_q[n-1]$$

$$e_q = \Delta \operatorname{sgn}(e[n])$$

Sequência
binária na
saída do
modulador

0 0 1 0 1 1 1 1 1 0 1 0 0 0 0 0 0

(b)

$$m_q[n] = m_q[n-1] + e_q[n]$$

28 Ilustração da modulação delta.

A diferença entre o sinal de entrada e a aproximação resulta em um acréscimo ou decréscimo de Δ .

Na modulação delta o sinal de mensagem é superamostrado para aumentar a correlação entre amostras adjacentes do sinal.

Modulação delta – Transmissor e receptor

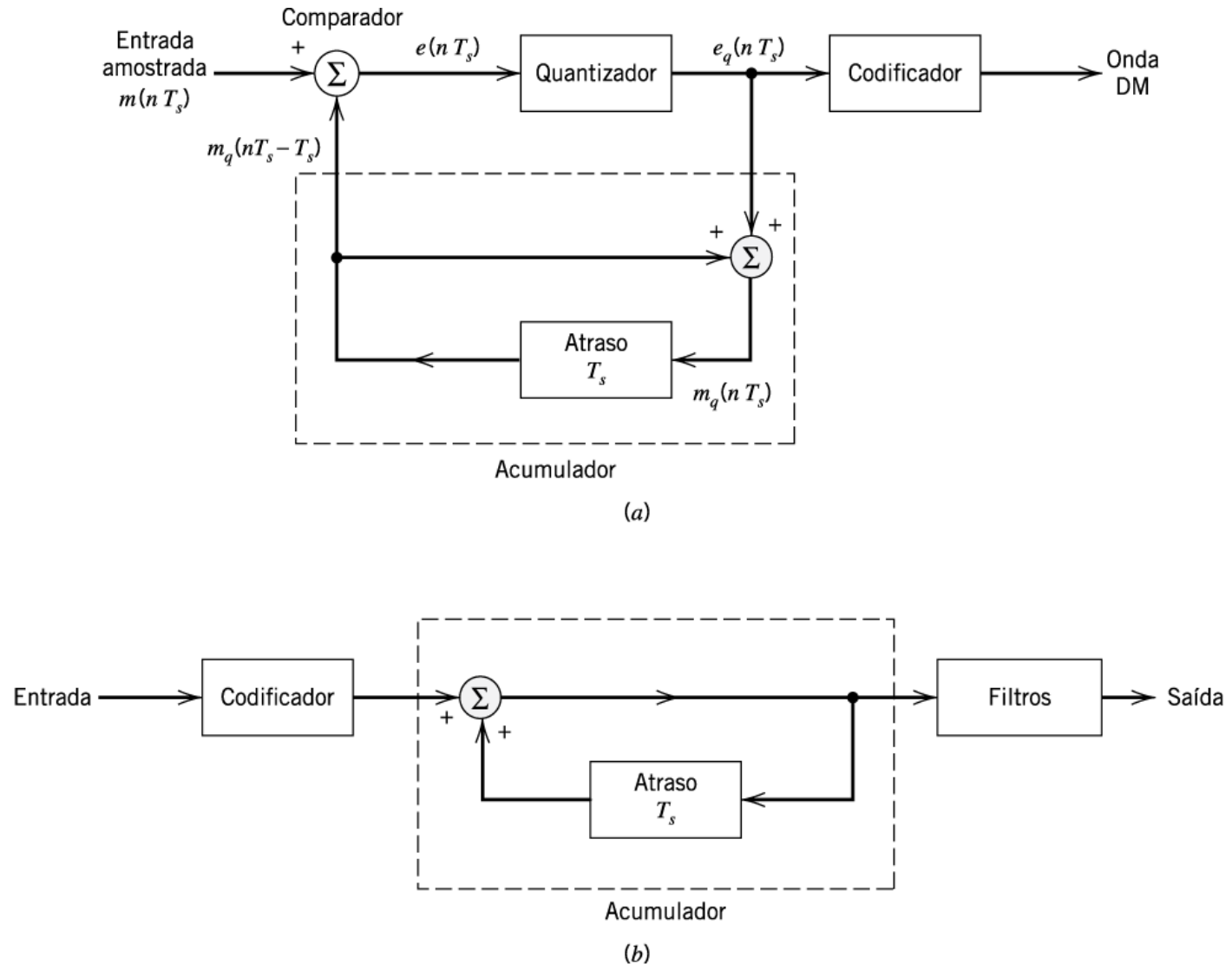


Figura 7.29 Sistema de modulação delta. (a) Codificador analógico-digital. (b) Decodificador digital-analógico.

Modulação delta

Distorção por sobrecarga de inclinação – ocorre quando utiliza-se um modulador delta linear (valor fixo de Δ).

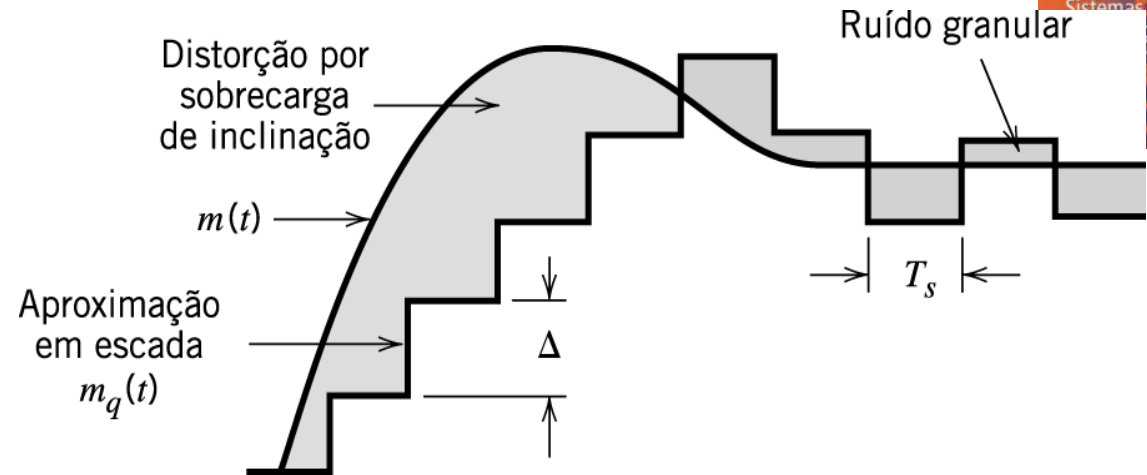


Figura 7.30 Ilustração do erro de quantização na modulação delta.

Para que a sequência de amostra $m_q[n]$ se eleve tão rápido quanto a sequência de amostra da entrada $m[n]$ em uma região de inclinação máxima $m(t)$, tem-se a condição:

$$\frac{\Delta}{T_s} \geq \max \left| \frac{dm(t)}{dt} \right|$$

A entrada do quantizador é uma aproximação à derivada do sinal de mensagem de entrada.



Modulação Delta-Sigma

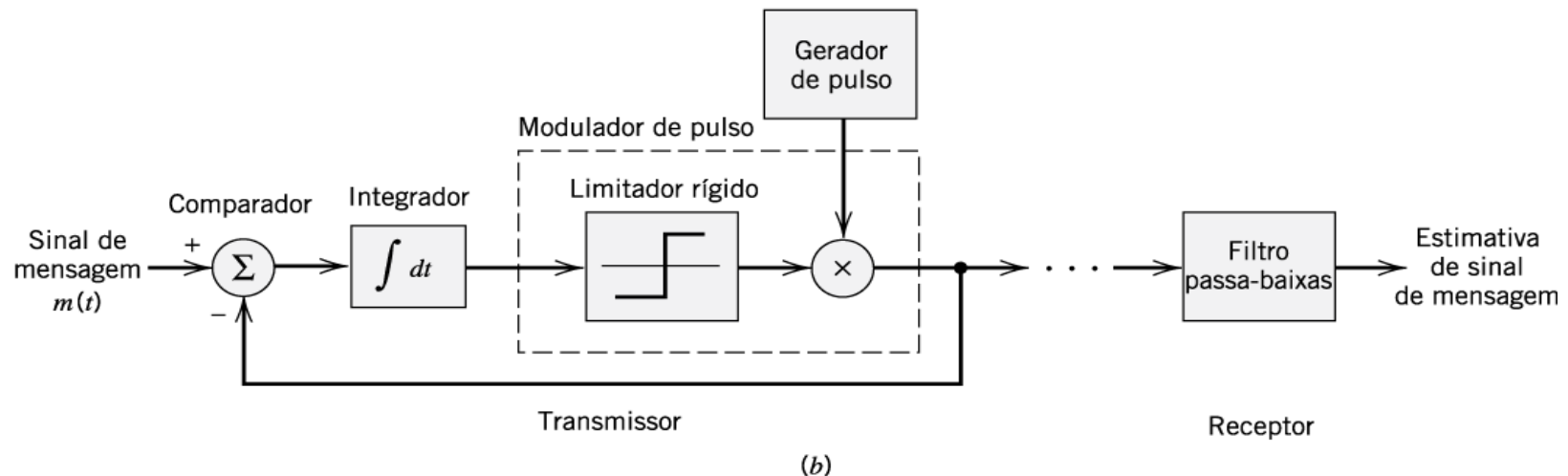
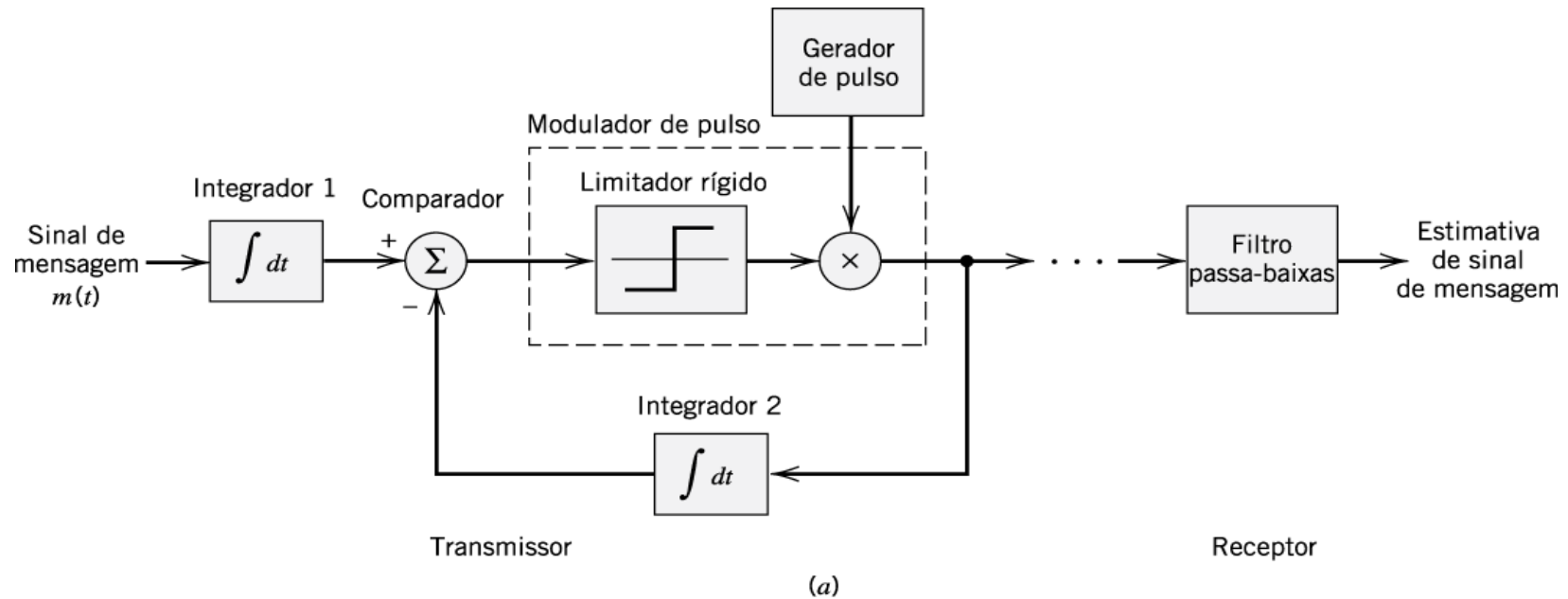
A entrada do quantizador é uma aproximação à derivada do sinal de mensagem de entrada.

Desvantagem: Perturbação na transmissão (ruídos) acarretam erro cumulativo no sinal demodulado.

Usa-se integrar a mensagem antes da modulação para os seguintes benefícios:

- ☐ O conteúdo de baixa frequência é pré-enfatizado.
- ☐ A correlação entre amostras adjacentes da entrada do modulador delta é aumentada, o que tende a reduzir a variância do sinal de erro.
- ☐ O receptor é simplificado.

Modulação Delta-Sigma



Modulação do Código de pulso Diferencial (DPCM)

PCM diferencial (DPCM): trata-se de codificar não o valor absoluto do sinal mas apenas a sua variação em relação à amostra anterior.

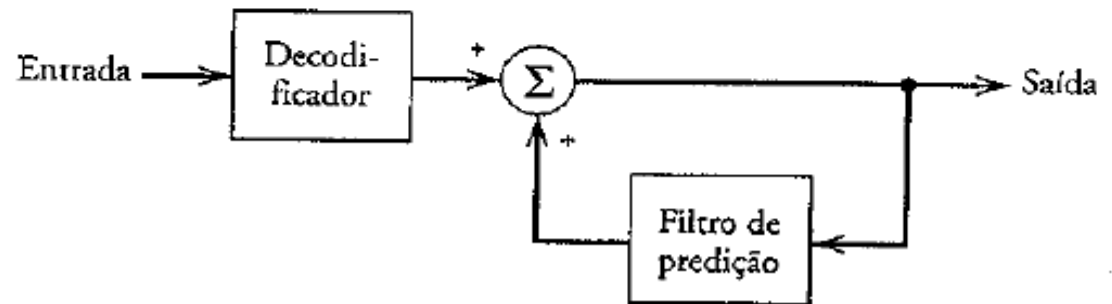
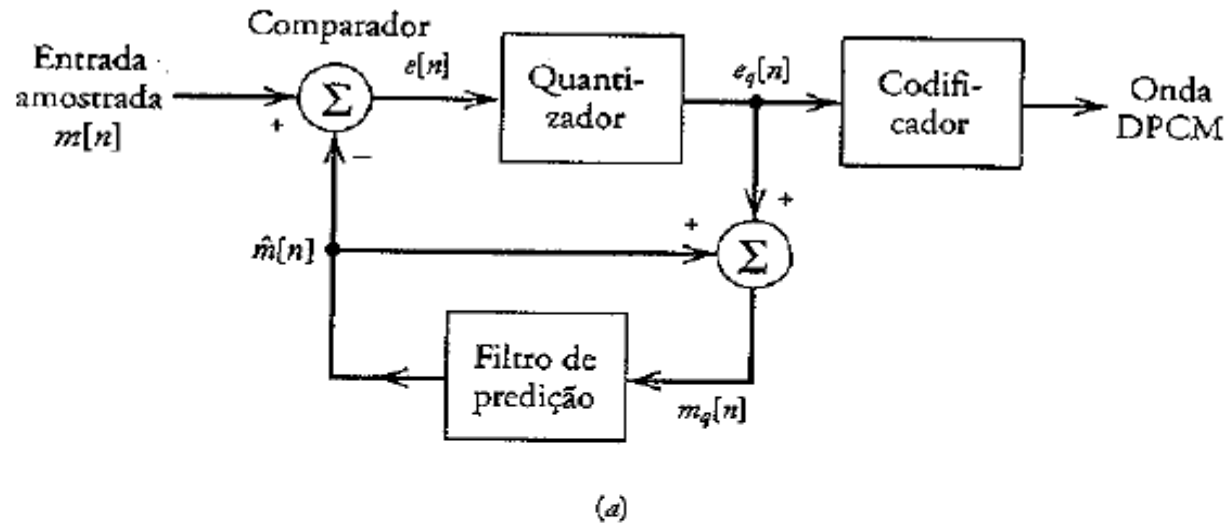
$$e[n] = m[n] - \hat{m}[n]$$

$$e_q[n] = e[n] + q[n]$$

$$m_q[n] = \hat{m}[n] + e_q[n]$$

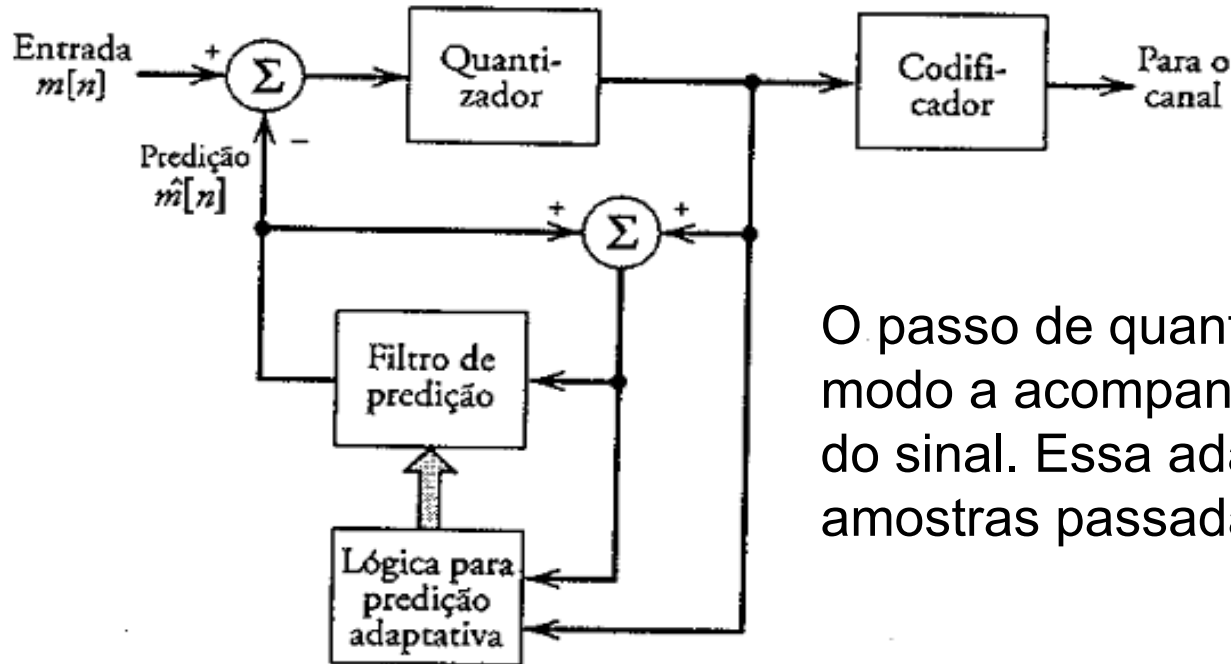
$$m_q[n] = \hat{m}[n] + e[n] + q[n]$$

$$m_q[n] = m[n] + q[n]$$



Analisa somente a diferença entre as amostra sucessivas implicando um número menor de níveis de quantização. (Quantização diferencial)

Modulação do Código de Impulso Diferencial Adaptativa (ADPCM)



O passo de quantização varia com o tempo, de modo a acompanhar as variações de amplitude do sinal. Essa adaptação é baseada nas amostras passadas do sinal.

O modelo ADPCM analisa as diferenças (DPCM): se a diferença entre sinais é pequena, o ADPCM aumenta o tamanho dos níveis de quantização e se a diferença é grande o ADPCM diminui os níveis de quantização.

Digitalização de vídeo e MPEG 1

O sinal de vídeo do sistema analógico é formado da seguinte forma:

- Luminância (1) e Crominância (2);
- Codificação do primeiro quadro – modo de codificação intraquadros (imagem I)
- Codificação dos quadros subsequentes – modo de codificação predição interquadros (imagem P)

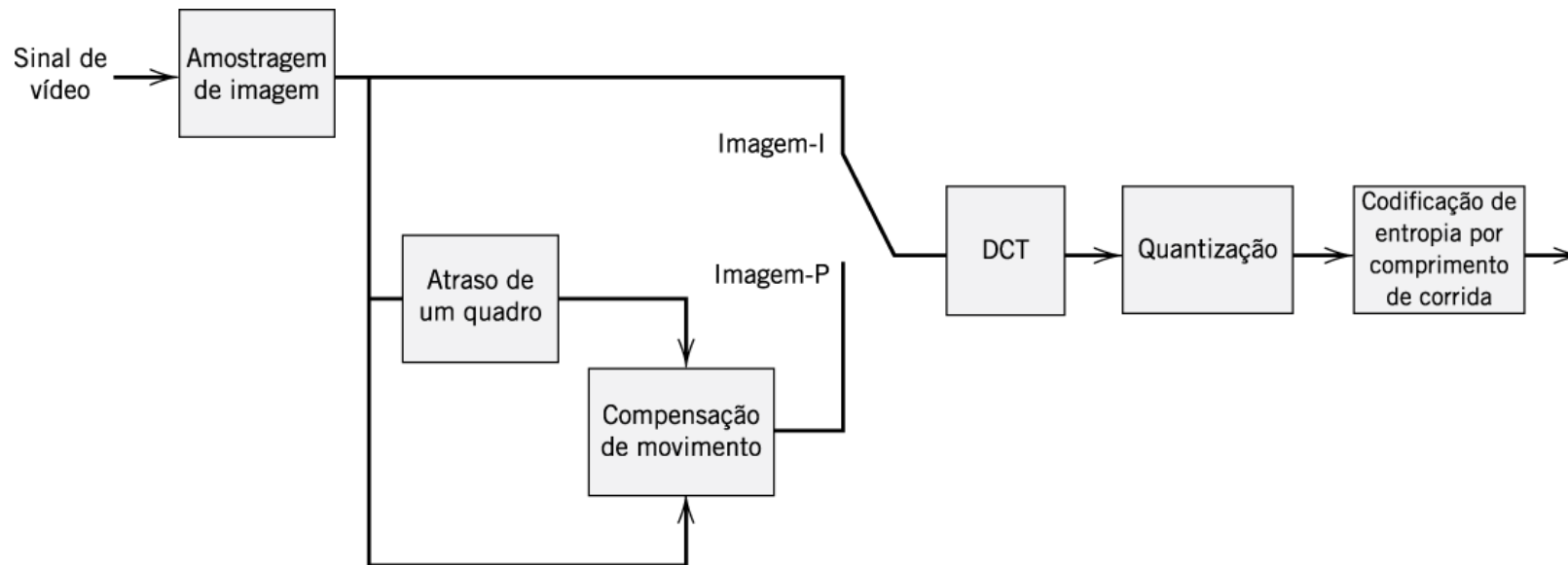


Figura 7.32 Diagrama de blocos simplificado do processamento de sinal de vídeo.

- A transformada de cosseno discreta (DCT) é aplicada a cada quadro 8X8 resultando em apenas um número pequeno de coeficientes da DCT significativo;

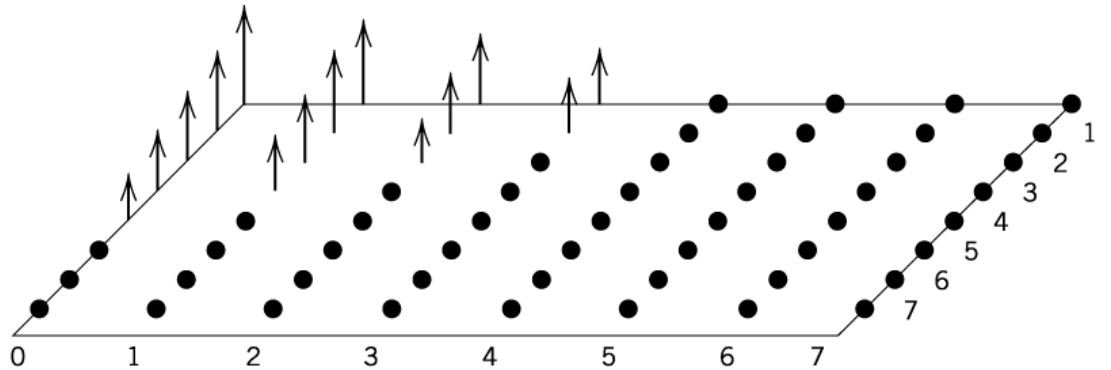


Figura 7.33 Exemplo de transformada de cosseno discreta 8×8.

- Os coeficientes são quantizados e os não nulos são enviados com as posições.
- Codificação de imagens P – o quadro anterior é armazenado;
- Identifica-se a correlação no domínio do tempo correspondendo ao movimento de um bloco na mesma direção. Um vetor de movimento é identificado para cada macroblocos 16X16.
- Um erro de predição de compensação de movimento é calculado (subtrai cada vetor do macrobloco pelo macrobloco deslocado do quadro anterior) e processado como na primeira imagem (DCT para blocos 8X8 seguido da quantização).
- Para imagem P apenas os vetores de movimento para cada macrobloco e o número pequeno de coeficientes da DCT não nulos são transmitidos.