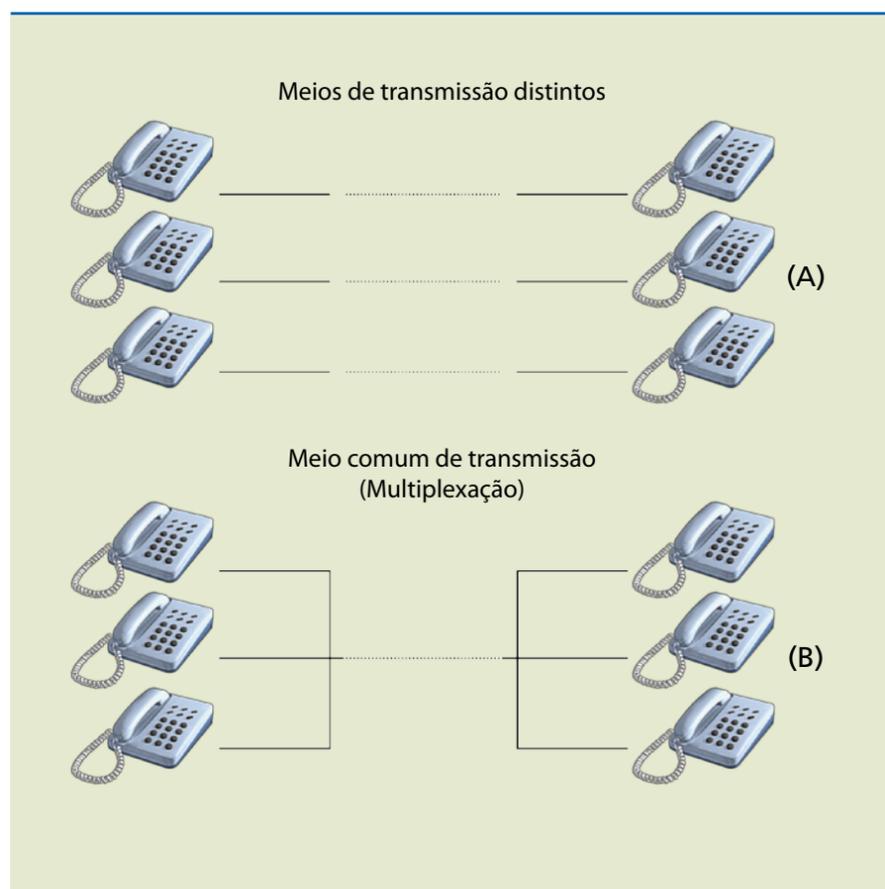


# Capítulo 9

## Multiplexação de canais

**M**ultiplexação é uma técnica de transmissão de sinal em que determinado número de sinais de voz passa a ser combinado em um sinal composto e transmitido por um único circuito de comunicação (figura 9.1).

**Figura 9.1**  
Meios de transmissão:  
(a) comum e  
(b) multiplexado.



Para que vários sinais sejam transmitidos simultaneamente por um meio comum, eles devem ser tratados de tal maneira que não haja interferência entre si, possibilitando a recuperação no terminal de recepção e estabelecendo, assim, uma multiplexação.

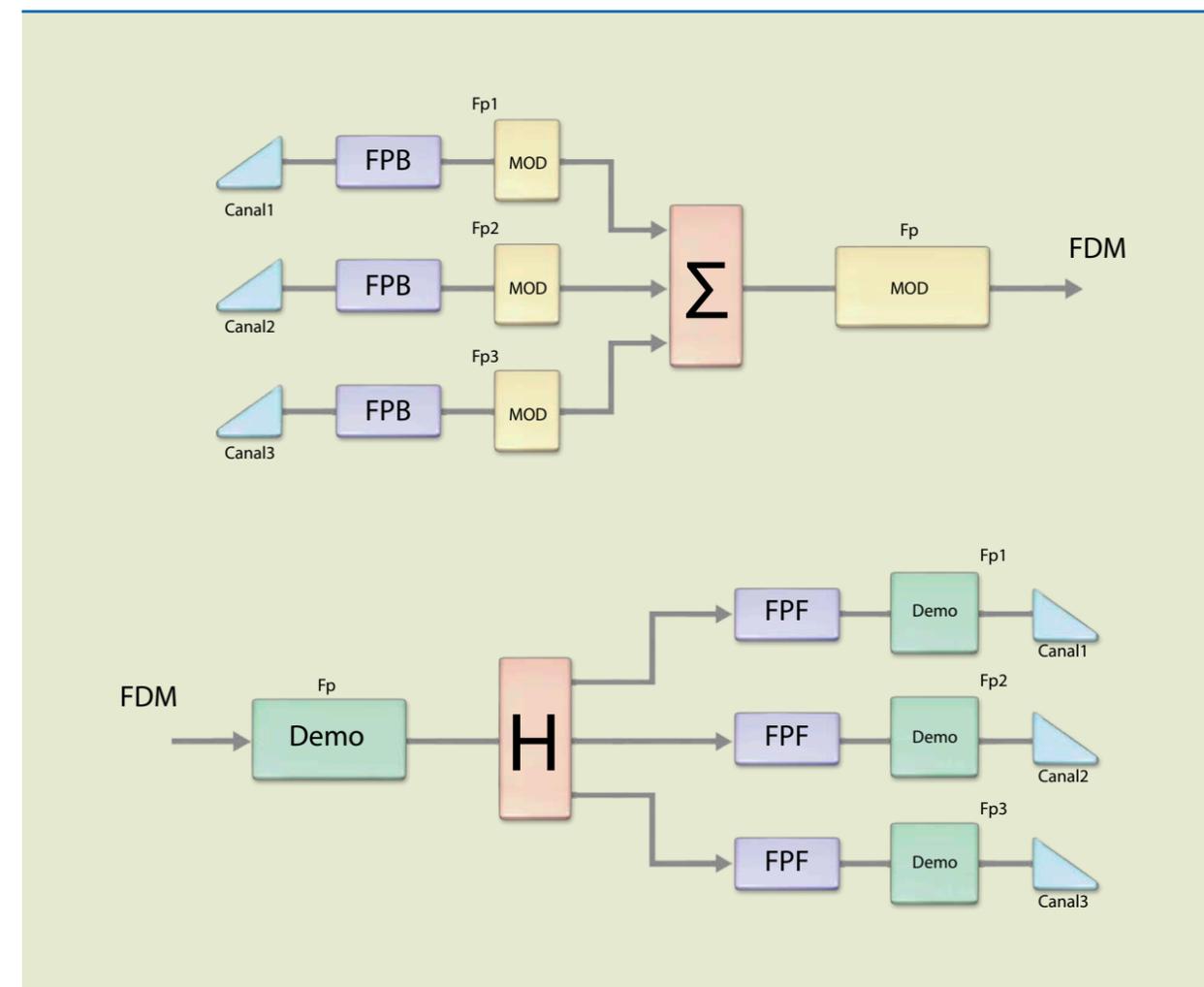
Existem basicamente dois tipos de multiplexação:

- Multiplexação por divisão em frequência (FDM).
- Multiplexação por divisão no tempo (TDM).

### 9.1 Multiplexação por divisão em frequência

Os diversos sinais devem ser transladados em frequência por processos de modulação e transmitidos simultaneamente por um único meio. Utilizado em sistemas de comunicação analógicos, esse tipo de multiplexação é limitado pelo número de portadoras disponíveis.

**Figura 9.2**  
Multiplexação por divisão em frequência.



A figura 9.2 apresenta o diagrama da multiplexação por divisão em frequência, em que:

- FPB é filtro passa-baixa;
- FPF é o filtro passa-faixa – (fixado em 300 a 3400 Hz).



- MOD é o modulador;
- Fpn, a frequência da portadora de canais;
- S, o somador;
- Fp, a frequência da portadora de transmissão;
- FDM, o sinal multiplexado por divisão em frequência;
- DEMOD, o demodulador;
- H, a híbrida;
- FPF, o filtro passa-faixa (fixado em 300 a 3 400 Hz).

## 9.2 Multiplexação por divisão no tempo

Esse sistema possibilita a transmissão de vários sinais, cada um deles controlado no tempo, ou seja, o intervalo de tempo entre duas amostras consecutivas de determinado sinal é utilizado para transmitir as amostras de outros sinais. Para transmitir sinais usando o TDM, a informação deve estar digitalizada.

Os diversos sinais de entrada delimitados por filtros passa-baixa são sequencialmente amostrados no transmissor por uma chave rotativa (comutador), que extrai uma amostra de cada sinal de entrada após uma varredura completa. Assim, na saída do comutador encontra-se uma forma de sinal modulado por amplitude de pulso, a qual contém amostras dos vários canais periodicamente entrelaçadas no tempo.

No receptor existe uma chave rotativa (distribuidor) idêntica à do transmissor, que separa as amostras e as distribui uma a uma aos filtros passa-baixa, que, por sua vez, reconstituem o sinal original.

Vários tipos de transmissão utilizam o TDM, porém serão abordados apenas dois deles:

- Modulação por amplitude de pulso (PAM).
- Modulação por código de pulso (PCM).

### 9.2.1 Modulação por amplitude de pulso (PAM)

O sinal PAM (*pulse amplitude modulation*) é formado por pulsos unipolares, cujas amplitudes são proporcionais aos valores das amostras instantâneas da mensagem. Pelo fato de a inteligibilidade do sinal ser representada pela altura dos pulsos, uma pequena parcela de ruído poderá modificar essa amplitude e, conseqüentemente, o conteúdo da mensagem. A demodulação para sinais PAM é efetuada por equalização e por filtros passa-baixa.

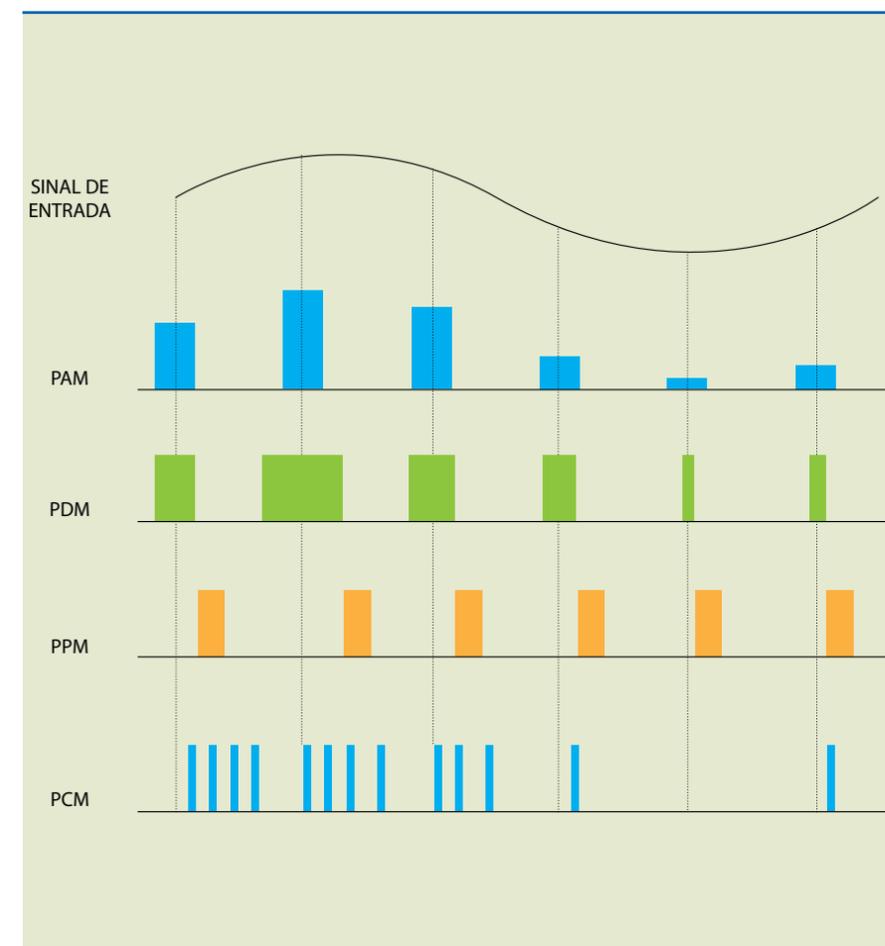
### 9.2.2 Modulação por código de pulso (PCM)

Esse é o tipo de modulação por pulsos mais utilizado hoje. Os demais aqui apresentados constituem representações analógicas, cujos parâmetros principais variam continuamente e podem assumir qualquer valor correspondente ao sinal. Qualquer superposição de ruídos indesejáveis ao sinal não mais poderá ser discernida do sinal original.

O PCM apresenta algumas vantagens em relação à qualidade do sinal. Para entendê-las, vamos analisar a seguinte situação: em uma modulação por amplitude de pulso (PAM) em que se tomam como parâmetros modulados valores predeterminados de amplitude com distanciamentos maiores comparados a ruídos, será possível no terminal de recepção detectar precisamente o valor de amplitude transmitido. Dessa maneira, os efeitos nocivos de ruído aleatório podem ser facilmente eliminados. Esse processo de utilização de amplitudes discretas em PAM possibilita o emprego de regeneradores ao longo da linha de transmissão, superando com grande vantagem outros meios de transmissão analógica.

Os valores amostrados do sinal são comparados e aproximados dos níveis discretos mencionados, denominados níveis de quantização, e em seguida introduzidos em um codificador, o que converte as amostras quantizadas (discretas no tempo e em amplitude) em uma palavra digital, isto é, em uma palavra codificada para cada amostra, gerando, assim, um sinal PCM. Apenas a presença ou a ausência de pulsos determinará a mensagem recebida e, conseqüentemente, sua qualidade. A distorção dos pulsos transmitidos não degradará a qualidade do sinal.

A figura 9.3 mostra os tipos de modulação empregados em TDM.

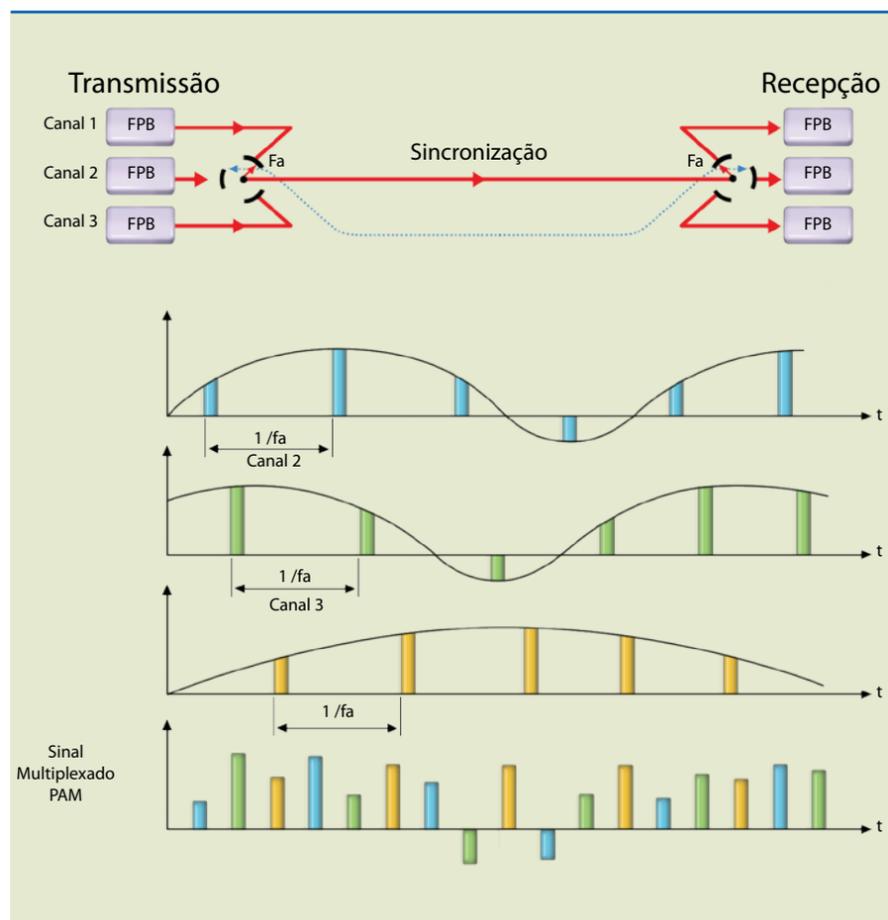


**Figura 9.3**  
Tipos de modulação TDM.



A figura 9.4 apresenta o sistema TDM com modulação PAM.

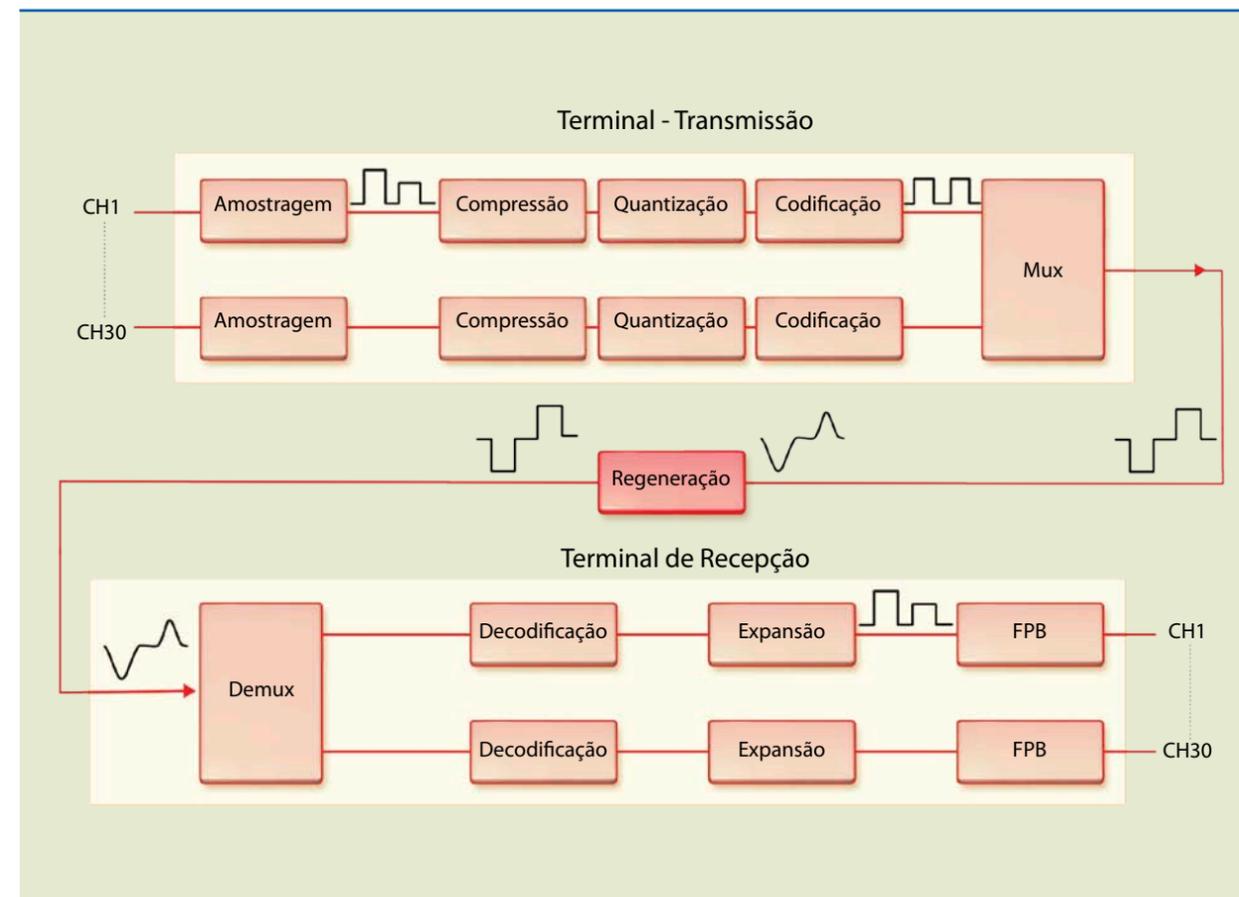
**Figura 9.4**  
Sistema TDM com modulação PAM.



As principais vantagens da técnica PCM são:

- **Relação sinal/ruído** – A relação sinal/ruído independe da distância, devido ao uso de repetidores que regeneram o sinal ao longo da linha. Essa regeneração é relativamente fácil de ser feita, pois os repetidores simplesmente têm de decidir sobre ausência ou presença de pulso. Isso assegura alta qualidade e baixa perda do sistema de transmissão.
- **Aplicações** – O sistema pode ser utilizado em transmissão de várias informações, como telefonia, imagem, dados etc.
- **Meios de transmissão** – O PCM assegura o uso de radioenlaces e/ou longas rotas de fibras ópticas. Permite, ainda, fácil expansão das rotas, sem a necessidade de modificação do meio.
- **Tecnologia** – O sistema não necessita dos diversos filtros dispendiosos usados no FDM, pois utiliza tecnologia digital, o que de imediato o torna mais econômico.

O sistema PCM é composto de várias etapas, nas quais o sinal é tratado devidamente antes de ser transmitido. Essas etapas são apresentadas no diagrama de blocos da figura 9.5.

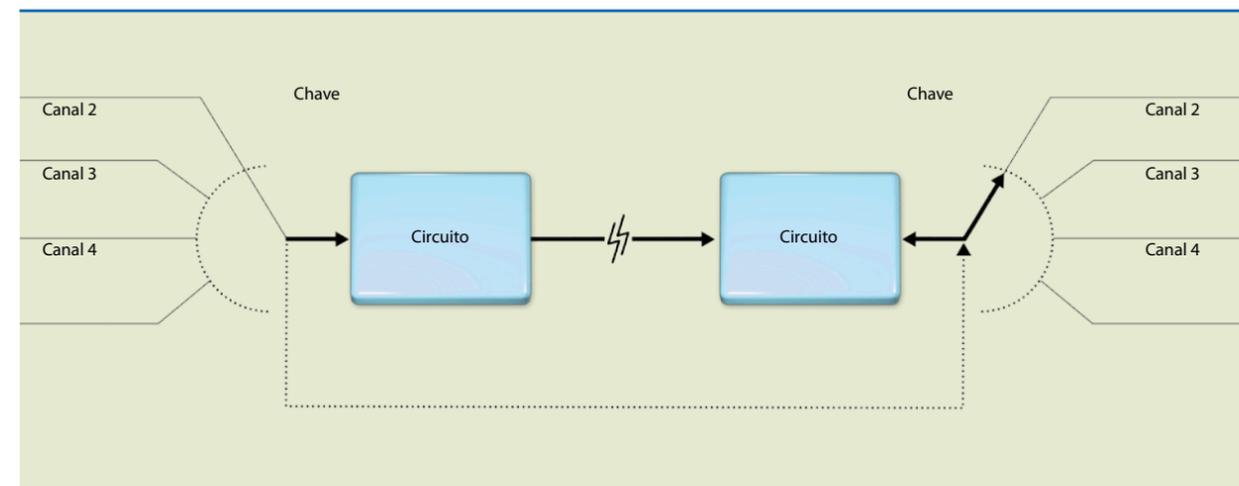


**Figura 9.5**  
Etapas da transmissão PCM.

### 9.3 Amostragem

Consiste em substituir o sinal analógico por uma sucessão de amostras de curta duração em intervalos regulares. Essa sucessão de amostras contém as informações necessárias para posterior recuperação do sinal original. A figura 9.6 ilustra um exemplo de amostragem.

**Figura 9.6**  
Amostragem.



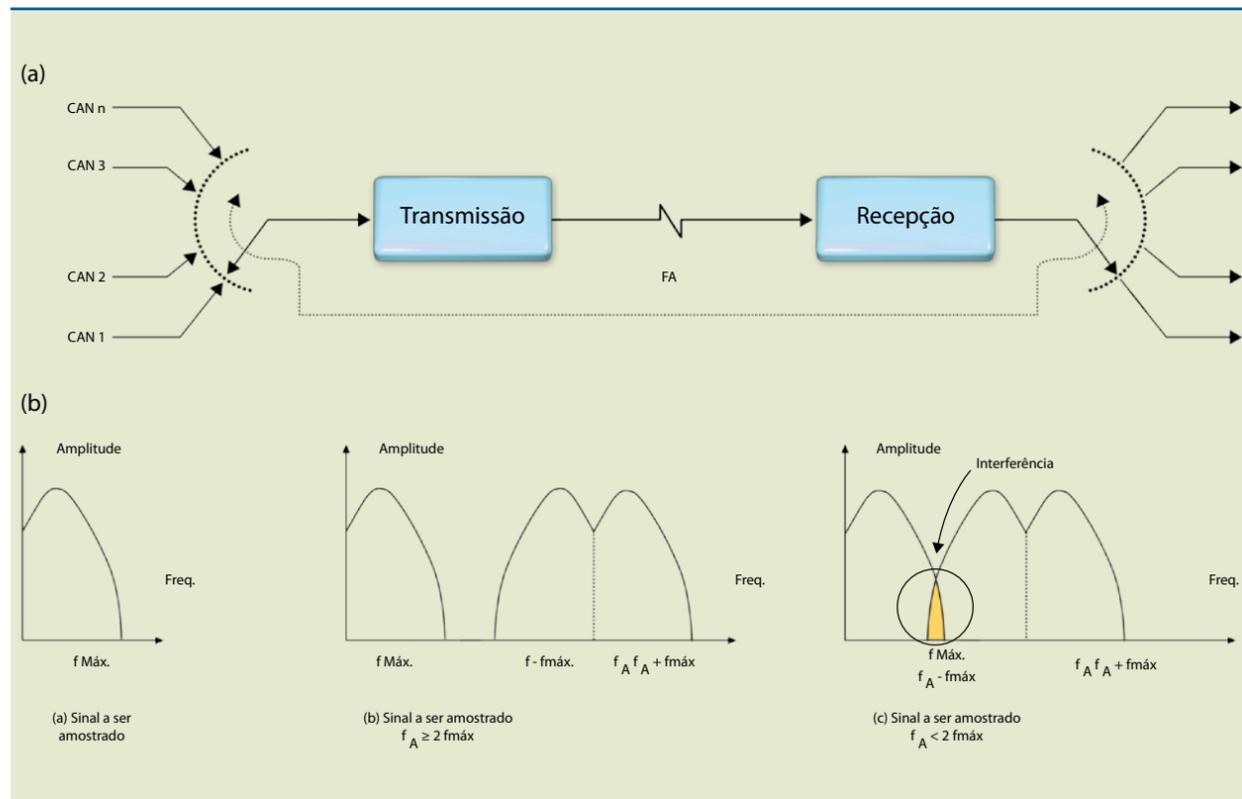
Para efetuar essa amostragem, utiliza-se uma chave eletrônica com frequência  $f_a$  (frequência de amostragem).

Analisando a figura 9.6, podemos notar que, se a frequência de amostragem for menor que duas vezes a máxima frequência a ser amostrada, o sinal não poderá ser recuperado com fidelidade. Por isso, a frequência de amostragem deve ser no mínimo duas vezes a máxima frequência do sinal a ser amostrado (teorema da amostragem), conforme demonstra a expressão:

$$f_a \geq 2f_{\max} \quad (9.1)$$

Para o PCM, a frequência de amostragem adotada é de 8 kHz, pois possibilita a utilização de um filtro de fácil execução e com faixa de guarda de 900 Hz. Essa escolha permite maior segurança e inteligibilidade da informação na amostragem do canal, levando em conta que o canal de voz ocupa 4 kHz de banda (figura 9.7).

**Figura 9.7**  
(a) Representação dos canais e  
(b) espectro de frequências PAM.



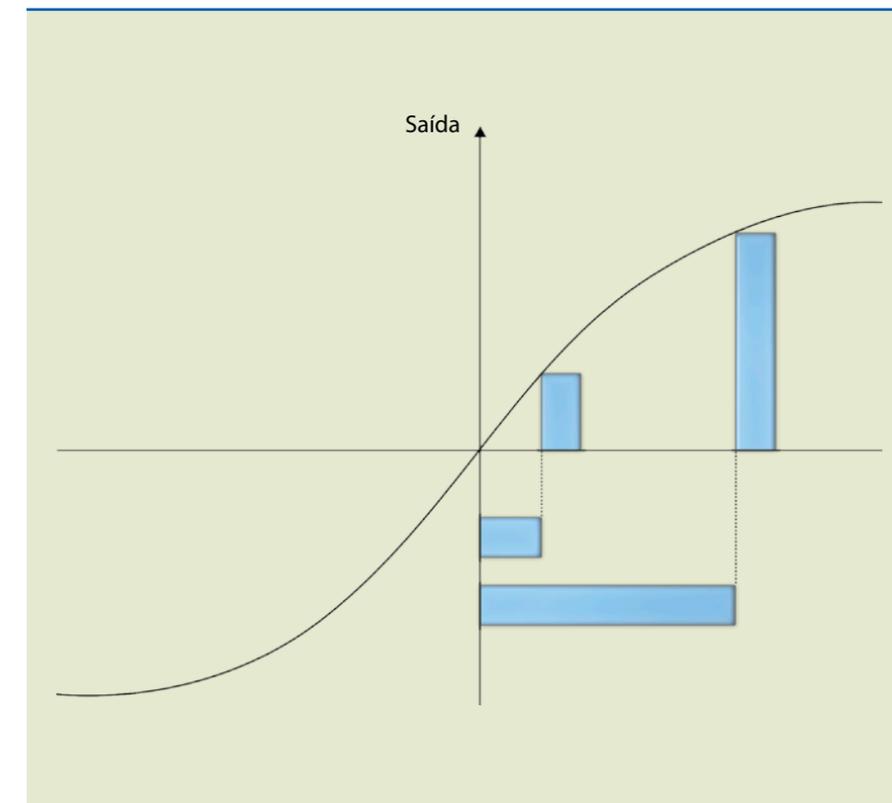
### 9.4 Compressão e expansão

Para que haja inteligibilidade superior a 98%, basta que a relação S/NQ (potência média do sinal/potência média do ruído de quantização) seja maior que 26 dB. Para isso, são necessários pelo menos 32 níveis de quantização ( $2^5$ ). Os atuais sistemas PCM utilizam 256 níveis de quantização (8 bits por unidade de informação).

Com a quantização linear, isto é, níveis discretos igualmente espaçados, o ruído de quantização passa a ser igual para cada nível. Nessas condições, a relação sinal/ruído é menor para pulsos de pequena amplitude do que para pulsos de grande amplitude. Isso significa que sinais de pequena amplitude sofrem maior interferência do ruído de quantização do que sinais de grande amplitude.

Para evitar essa interferência do ruído, mantendo os 256 níveis de quantização com intervalos igualmente espaçados, é preciso que expandir a amplitude dos pequenos pulsos e comprimir a dos grandes pulsos. Esse procedimento que serve para melhorar a relação sinal/ruído é denominado compressão.

A figura 9.8 mostra a forma geral das curvas representativas das leis logarítmicas de compressão.



**Figura 9.8**  
Características das leis de compressão.

Nos sistemas PCM normalizados atualmente existem as seguintes leis de compressão:

- **Lei  $\mu$**  – Não é utilizada no Brasil. A equação que a define é:

$$Y = \frac{\log(1 + \mu x)}{\log(1 + \mu)} \quad (9.2)$$

em que  $\mu = 255$ .



- **Lei A** – Adotada para os sistemas de 32 canais em que a curva é aproximada para 13 segmentos de reta. As equações que a definem são:

$$y = \frac{AX}{1 + \log A}, \text{ para } 0 \leq X \leq \frac{1}{A} \tag{9.3}$$

$$y = \frac{1 + \log(A \cdot X)}{1 + \log A}, \text{ para } \frac{1}{A} \leq X \leq 1$$

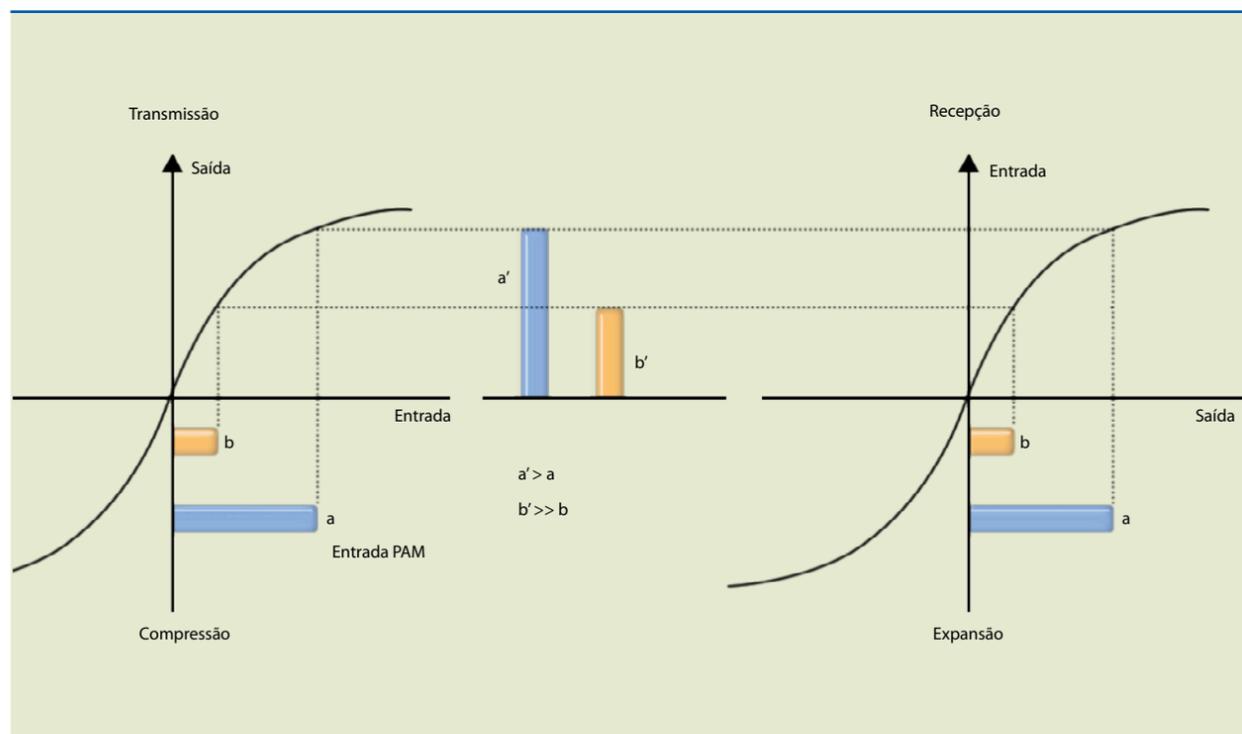
em que:

$A = 87,6$  (valor definido empiricamente para que a relação  $S/N$  seja constante);  
 $X$  é a tensão de entrada;  
 $y$ , a tensão de saída.

Para a execução prática dos equipamentos PCM, as curvas definidas pela lei de compressão são aproximadas por segmentos de reta com as seguintes características:

- Cada segmento (trecho) tem o mesmo número de níveis (16).
- Os intervalos entre níveis de um mesmo segmento são iguais. Depois de ser decodificado na recepção, o pulso precisa ser restaurado, ou seja, expandido, por meio de um processo denominado expansão, que consiste em aplicar uma lei exatamente inversa à da compressão, como pode ser visto na figura 9.9.

**Figura 9.9**  
Método de compressão/expansão.



## 9.5 Quantização

Trata-se da subdivisão da faixa dinâmica do sinal em determinado número de níveis discretos, chamados níveis de quantização ( $N$ ). Para facilitar a implementação, a codificação dos níveis é feita de acordo com o sistema binário. Consequentemente, o número de níveis de quantização é uma potência inteira de dois:

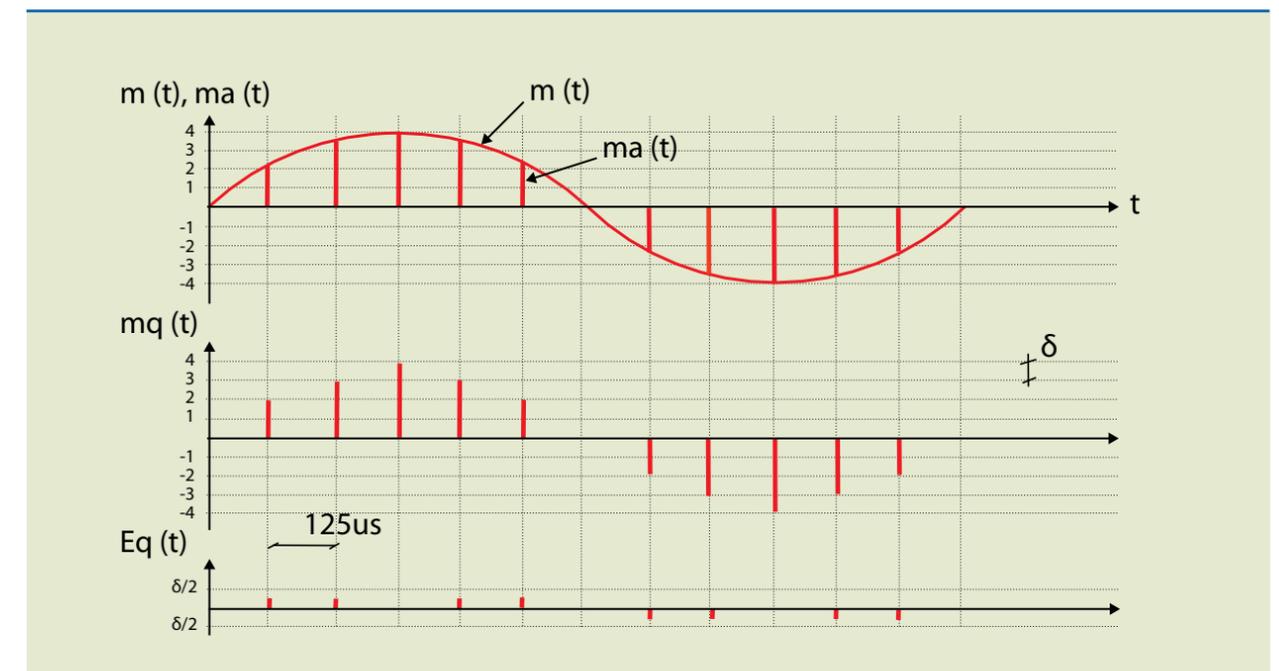
$$N = 2^n \tag{9.4}$$

em que  $n$  é o número de bits que representa cada nível.

Desse modo, em cada instante da amostragem, a amplitude do sinal é aproximada para o nível de quantização mais próximo. Essa aproximação introduz um erro, denominado ruído de quantização, que é um tipo de ruído de fundo (similar ao ruído branco). O ruído de quantização será tanto menor quanto maior for o número de níveis de quantização introduzidos.

A figura 9.10 mostra um exemplo do processo de quantização de uma senoide.

**Figura 9.10**  
Processo de quantização.

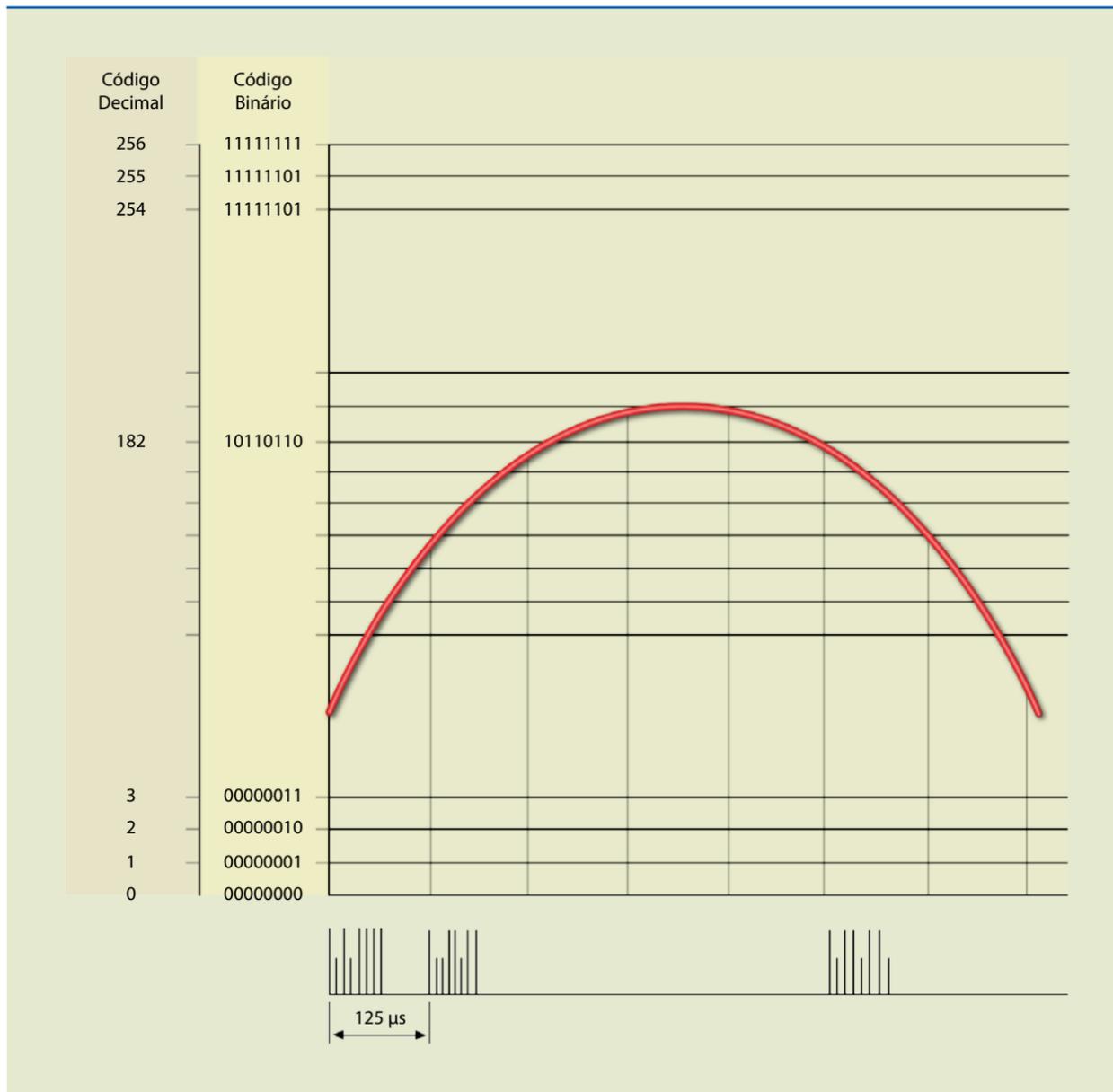


## 9.6 Codificação/decodificação

A codificação é usada após a compressão para converter a amplitude de cada pulso PAM em uma combinação de bits 0 e 1. Como existem 256 níveis de quantização, são necessários 8 bits, pois  $2^8 = 256$ .

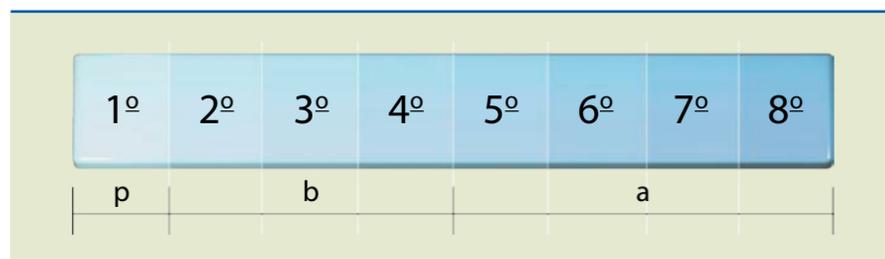
A figura 9.11 apresenta, de forma simplificada, o processo de codificação utilizando 8 bits.





**Figura 9.11**  
Processo de codificação com 8 bits.

O formato da palavra código utilizado para representar cada valor codificado na figura 9.11 está ilustrado na figura 9.12.

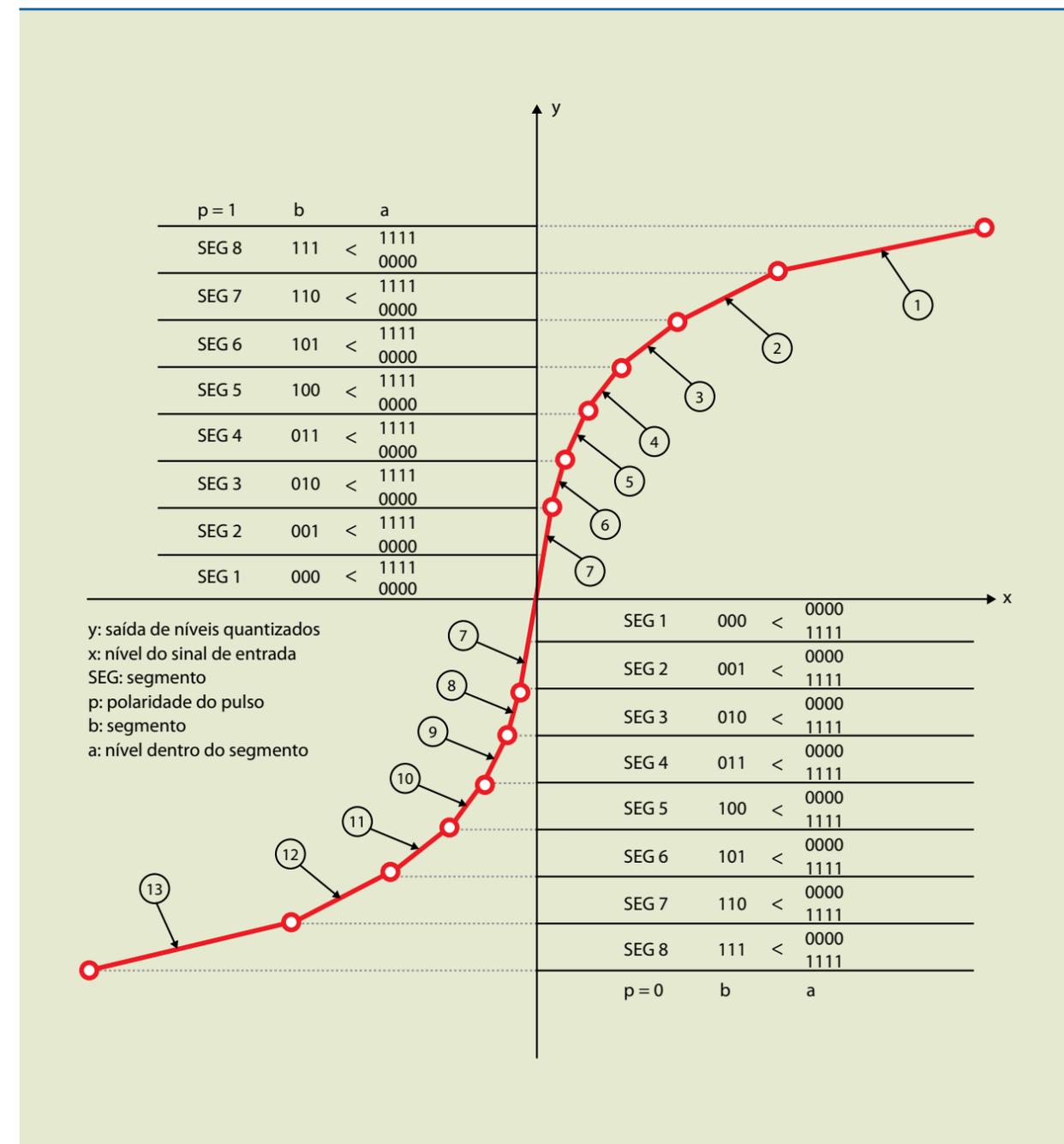


**Figura 9.12**  
Formato da palavra código de 8 bits.

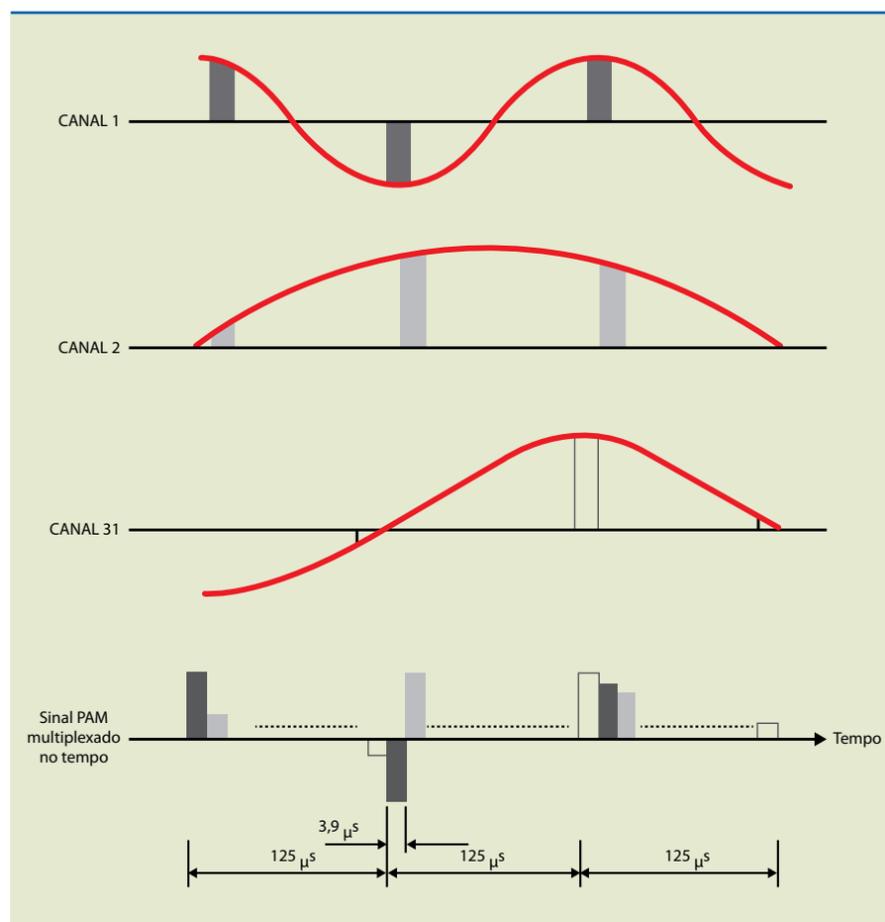
O significado de cada campo da palavra código é o seguinte:

- **p** indica a polaridade do pulso PAM, isto é, se ele se encontra na metade superior ( $p = 1$ ) ou inferior da curva de compressão ( $p = 0$ ).
- **b** indica o segmento dentro da metade definida por **p**, em que se encontra a amostra em questão (3 bits podem representar 8 segmentos). Para a característica de compressão utilizada, a curva é dividida em 13 trechos. Porém, como o trecho número 7 é subdividido em 4 segmentos, há na realidade 16 segmentos.
- **a** indica o nível dentro do segmento ou trecho do segmento (4 bits podem representar 16 níveis). A figura 9.13 ilustra a curva característica de compressão com a divisão em segmentos e trechos.

**Figura 9.13**  
Curva característica de compressão dividida em trechos e segmentos.



**Figura 9.14**  
Estrutura do sinal PAM multiplexado.



## 9.7 Estrutura do sinal na linha

O sinal a ser transmitido na linha possui uma estrutura definida. Essa estrutura permite enviar informação de voz à sinalização de linha e bits que possibilitam a monitoração do sinal quanto ao alinhamento e sincronismo na recepção.

Para essa estrutura, existem os seguintes parâmetros:

- **Pulso (bit)** – É o elemento binário. A presença de amplitude (positiva ou negativa) indica 1; a ausência, 0. Um pulso é emitido no intervalo de tempo  $t = 488 \text{ ns}$  no código NRZ (*no return to zero*) e no intervalo de tempo  $t/2 = 244 \text{ ns}$  no código RZ (*return to zero*).
- **Unidade de informação ou intervalo de tempo de canal (ITC)** – É a representação codificada da amostra do sinal de voz. Atualmente é composta de 8 bits emitidos em um intervalo de tempo  $t = 3,9 \mu\text{s}$ .
- **Quadro (Q)** – É a sequência das 32 unidades de informações retiradas sucessivamente dos 30 canais multiplexados por divisão de tempo. Um quadro é emitido no tempo  $T = 125 \mu\text{s}$ .
- **Multiquadro (MQ)** – É a sequência de 16 quadros que se completam com informações de sinalização, sincronismo, alarme etc. dos 30 canais. Um multiquadro é emitido no tempo  $T_{\mu} = 16 \cdot T = 2 \text{ ms}$ .

Definidos esses parâmetros, pode-se calcular a taxa de transmissão de bits do sinal multiplexado, utilizando a expressão:

$$f_b = n_c \cdot n_b \cdot f_a \quad (9.5)$$

em que:

- $f_b$  é a taxa de bits;
- $n_c$ , o número de canais;
- $n_b$ , o número de bits;
- $f_a$ , a frequência de amostragem.

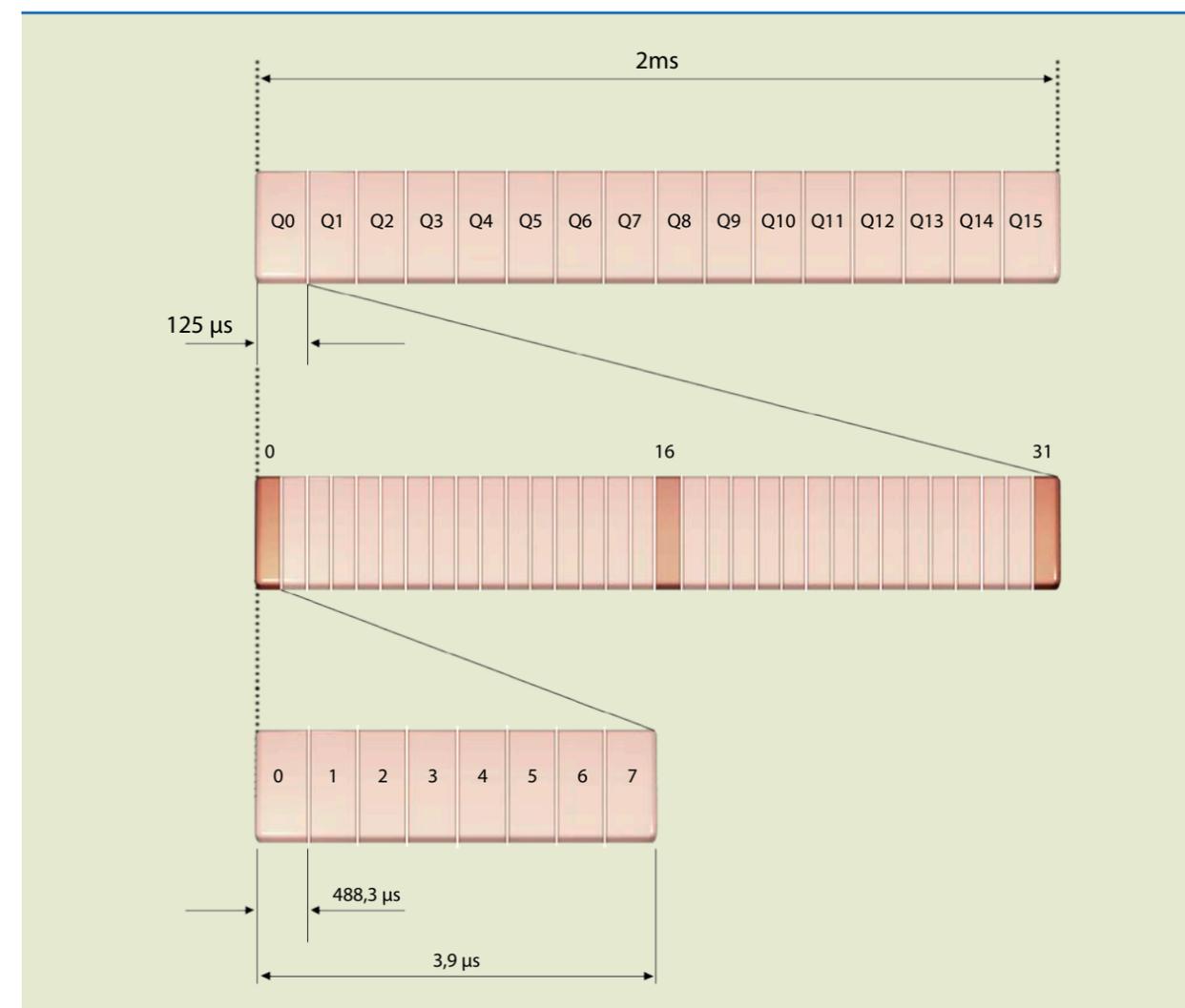
Logo:

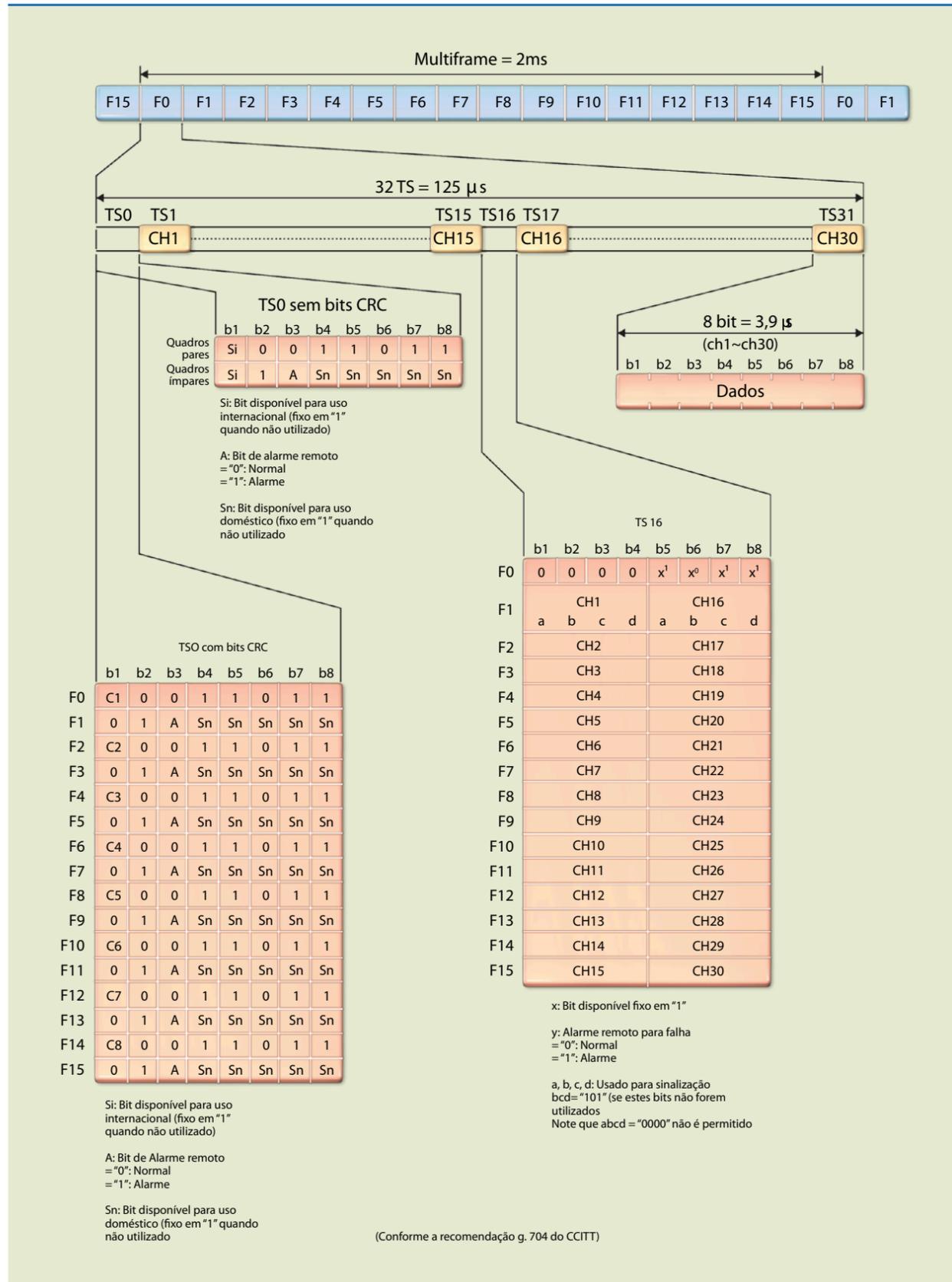
$$f_b = 32 \cdot 8 \cdot 8 \text{ kHz} = 2048 \text{ kbps}$$

A figura 9.15 ilustra o processo para a formação de quadro, multiquadro e canal para um sistema PCM de 32 canais.

**Figura 9.15**

Estrutura de quadro, multiquadro e intervalo de tempo.





A tabela 9.1 mostra um resumo dos dados técnicos do PCM de 30 canais do sistema europeu.

Largura de faixa do canal	4 kHz
Frequência de amostragem	8000 Hz
Número de bits da amostra	8
Tempo de transmissão de um quadro	125 μs
Canais de voz/quadro	30
Taxa de transmissão do quadro PCM	2,048 Mbps
Lei de codificação	Lei A
SCC nº 7 (IT 16)	64 kbps

**Tabela 9.1**

Resumo dos dados técnicos do PCM de 30 canais.

