

5 A TÉCNICA PCM

5.1 O SISTEMA PCM

Na **Modulação por Código de Pulso**, ou modulação PCM (do inglês, “**Pulse-Code Modulation**”), a informação analógica é submetida a várias operações diferentes a fim de ser convertida para informação digital. As operações básicas realizadas para a **conversão analógico-digital** de um sistema PCM são: *amostragem*, *quantização* e *codificação* (ver Figura 1).

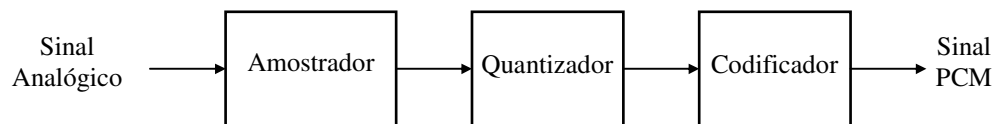


Figura 1- Conversão analógico-digital

A Figura 2 mostra a forma de onda dos sinais nas três etapas da modulação PCM, utilizando um codificador com 3 bits para cada amostra do sinal de entrada.

Ao longo do canal de transmissão de um sistema PCM são usados **repetidores regenerativos** para reconstruir (regenerar) a seqüência transmitida de pulsos codificados (ver Figura 3). A utilização destes repetidores visa combater os efeitos acumulativos das distorções manifestadas no sinal devido a influência de ruídos.

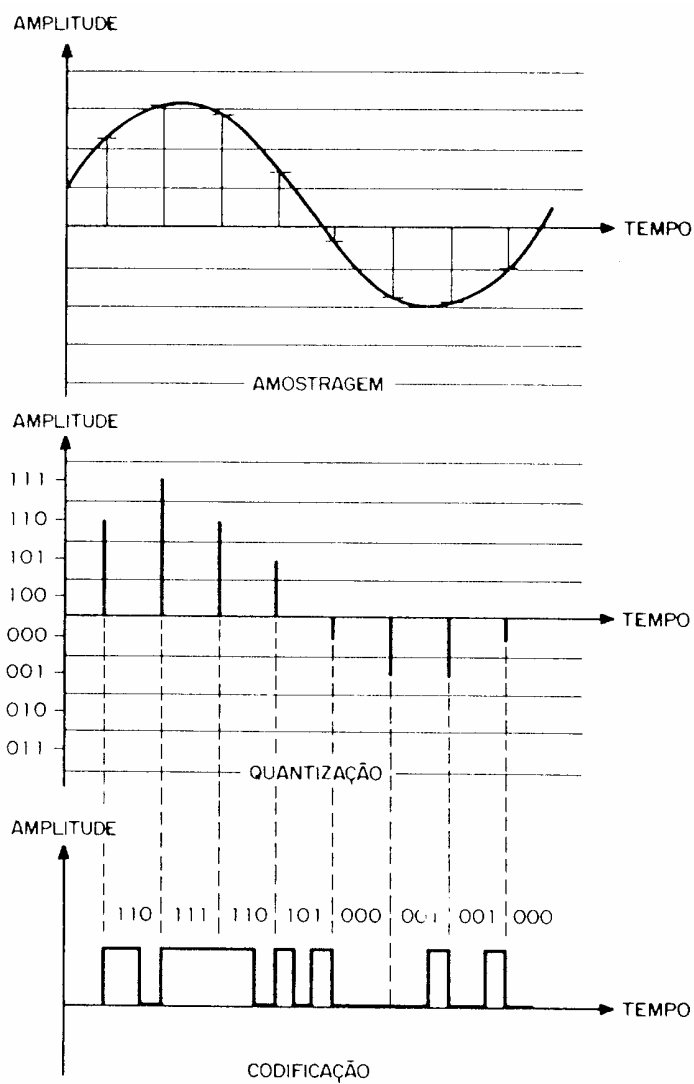


Figura 2 - Etapas da modulação PCM

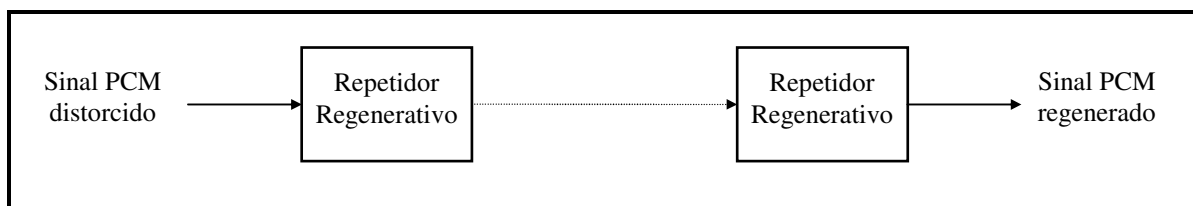


Figura 3 - Canal de transmissão de um sistema PCM.

5.2 CONVERSÃO ANALÓGICO-DIGITAL

5.2.1 AMOSTRAGEM

A amostragem é o ponto de partida para conversão de sinais analógicos para sinais digitais. Sua finalidade é produzir uma sequência de amostras discretas a partir de um dado sinal analógico.

Na figura 4, vê-se representado o espectro de um dado sinal analógico cujo formato lembra um triângulo. O sinal amostrado produzido a partir de um sinal analógico de espectro triangular irá possuir um espectro periódico composto de várias formas triangulares (idênticas ao espectro do sinal original) reproduzidos nas frequências múltiplas da frequência de amostragem.

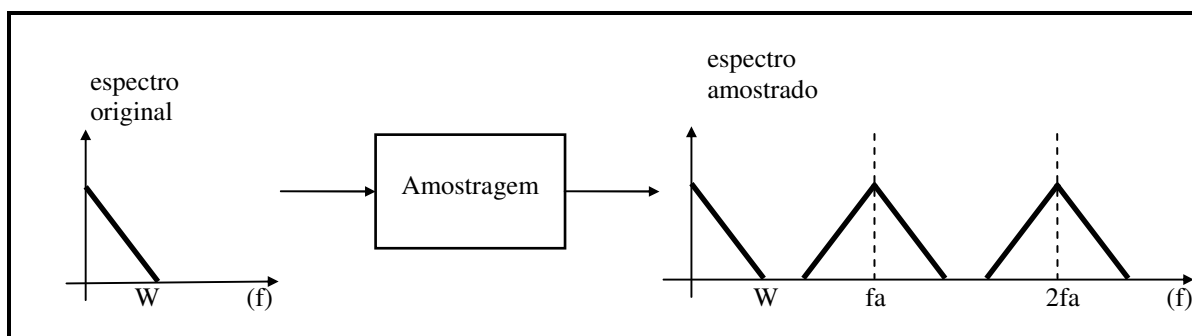


Figura 4: Espectro de frequência de um sinal amostrado.

Segundo o **Teorema de Nyquist**, para que o sinal de voz possa ser reconstituído a partir do sinal amostrado, é necessário que a frequência de amostragem seja maior ou igual a duas vezes a maior frequência contida no sinal analógico. Para um sinal limitado em faixa W , a frequência de amostragem será:

$$f_a \geq 2.W$$

Se a frequência de amostragem for menor que duas vezes a maior componente de frequência do sinal analógico ($f_a < 2.W$), ocorrerá um fenômeno de sobreposição e distorção do espectro do sinal amostrado chamado de *aliasing*.

Represente a seguir o espectro do sinal amostrado com aliasing.



Figura 5 : Espectro do sinal amostrado com **aliasing** ($f_a < 2W$).

Para a faixa de frequência de 300 a 3400 Hz, usada na telefonia, foi fixada a frequência de amostragem de 8000 Hz. O intervalo de amostragem (T_a) entre duas amostras sucessivas de um mesmo sinal telefônico será:

$$T_a = 1 / 8000 \text{ Hz} = 125 \mu\text{s}$$

A Figura 6 mostra como o sinal telefônico chega a uma chave eletrônica através de um filtro passa-baixas, que limita a faixa de frequências a ser transmitida. Ele suprime as frequências maiores que a metade da frequência de amostragem. A chave eletrônica, comandada com a frequência de amostragem de 8000 Hz, retira do sinal telefônico uma amostra a cada 125 μs . Desta forma obtém-se um sinal PAM (Modulação por Amplitude de Pulso).

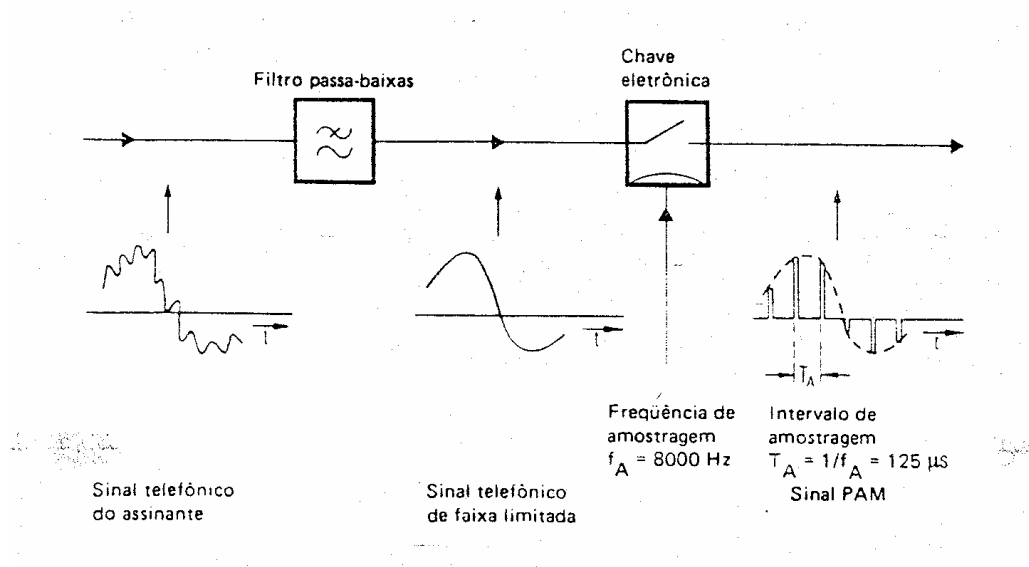


Figura 6 - Formação de um sinal PAM

5.2.2 QUANTIZAÇÃO

O sinal PAM ainda é uma forma analógica do sinal telefônico. As amostras são porém transmitidas e processadas mais facilmente na forma digital, e o primeiro passo para a conversão A/D é a quantização. Neste processo, o sinal original (com amplitude contínua) pode ser aproximado por um sinal com níveis de amplitude discretos (finitos) selecionados a partir de critérios para minimização de erro. A existência de um número finito de amplitudes é uma condição básica para a modulação PCM. Portanto, o espectro dos valores possíveis do sinal é subdividido em intervalos de quantização, por exemplo, para os sistemas de transmissão PCM-30, em 256 intervalos. A Figura 7 ilustra, como demonstrativo do princípio de quantização, só 16 intervalos de mesma largura. Estes intervalos são numerados de +1 a +8 na faixa positiva e de -1 a -8 na faixa negativa do sinal telefônico. Cada amostra é alocada ao intervalo que a ela corresponde.

Os intervalos de quantização são delimitados entre si por valores de decisão. A amostra que ultrapassar a um valor de decisão é enquadrada no intervalo imediatamente superior e aquela que ficar abaixo, no intervalo imediatamente inferior. Portanto, no lado da transmissão, diferentes valores analógicos são reunidos em um intervalo de quantização. No lado da recepção, para cada intervalo é recuperado um valor de sinal, que corresponde ao valor médio de um intervalo de quantização. Daí resultam, no lado da transmissão, pequenos desvios em relação à amostra original do sinal telefônico. O desvio (erro de quantização) corresponde, no máximo, a meio intervalo para cada amostra. O erro de quantização daí resultante pode transformar-se em ruído no lado da recepção, sobreposto ao sinal útil. O erro de quantização é tanto menor quanto maior for o número de intervalos de quantização. Uma adequada graduação destes intervalos reduz este erro a um valor desprezível e o ruído a um nível imperceptível.

Quando os intervalos de quantização são igualmente distribuídos dentro da faixa de amplitude temos a denominada quantização linear (ver Figura 7). Neste caso, teremos erros de quantização relativamente grandes para sinais de pequeno valor. Estes erros poderiam ser de mesma grandeza que o próprio sinal de entrada e a relação sinal/ruído não seria suficientemente grande. Por este motivo usam-se intervalos de quantização de larguras diferentes, caracterizando a quantização não-linear (ver Figura 8).

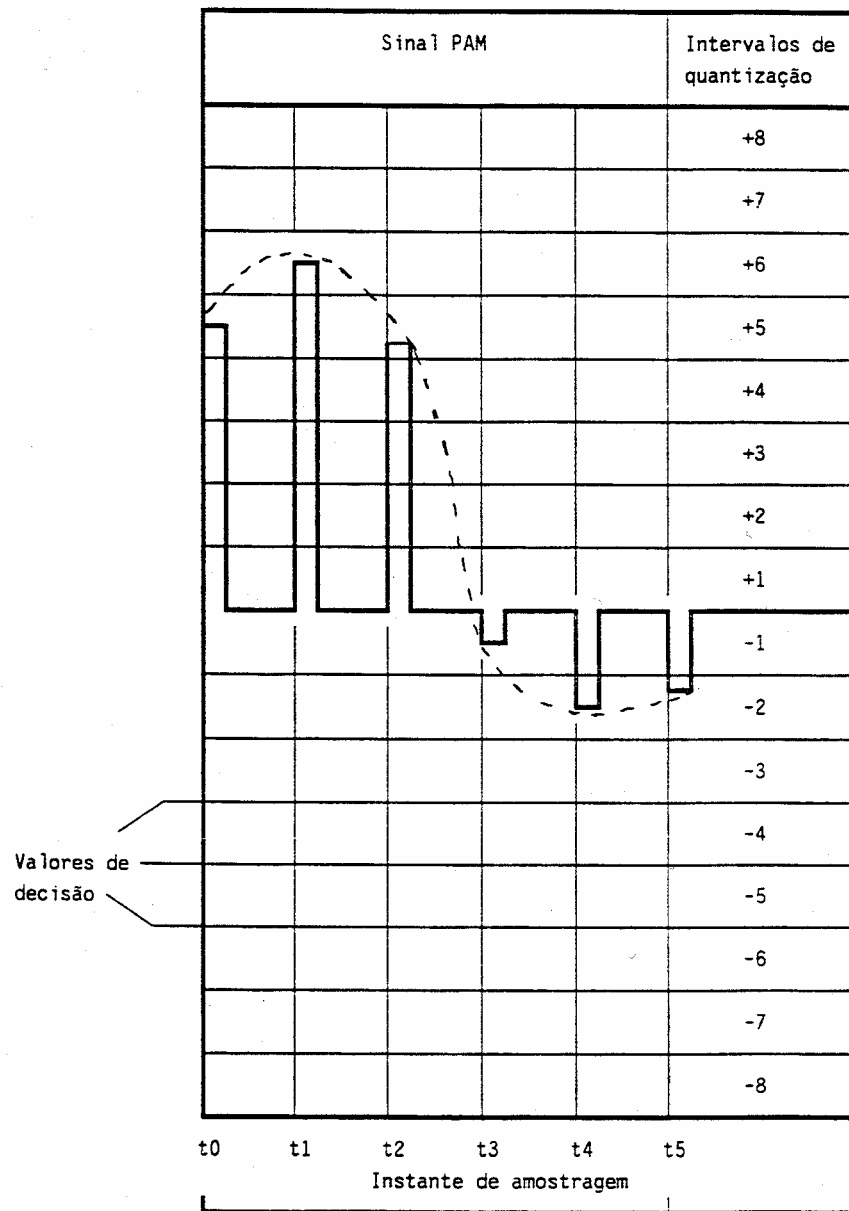


Figura 7 - Quantização linear

Neste caso teremos pequenos intervalos de quantização para sinais de pequeno valor e intervalos maiores para sinais de maior valor. Desta forma a relação entre o sinal de entrada e o erro de quantização é aproximadamente igual para toda a faixa de amplitude do sinal de entrada.

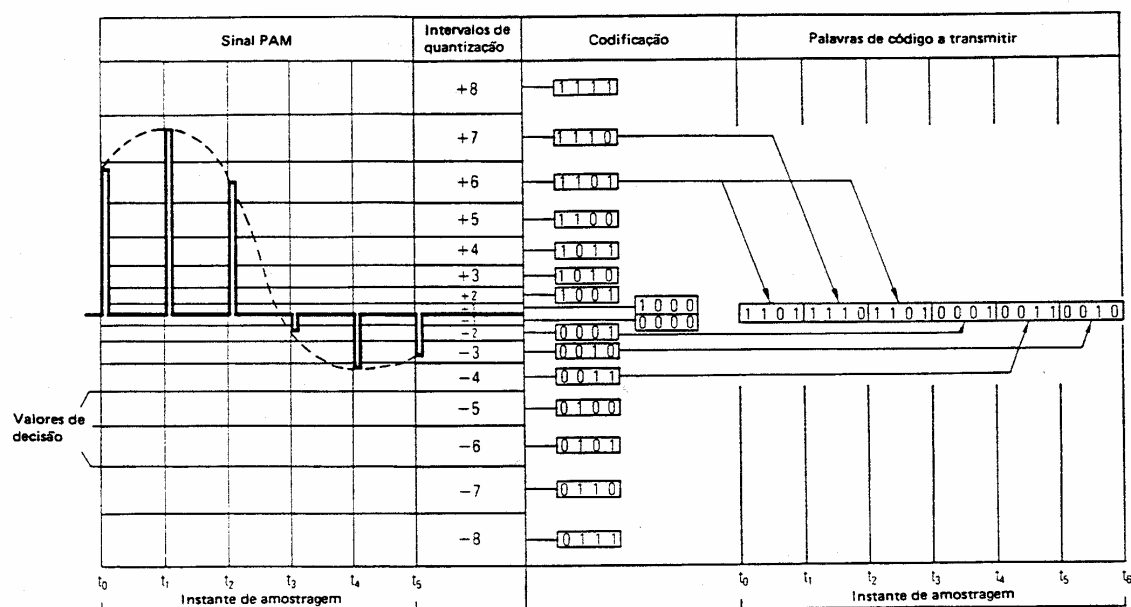


Figura 8 - Quantização não-linear

Os detalhes de quantização não-linear são fixados pela curva característica definida pelo ITU-T:

- A curva de 13 segmentos (padrão G711, lei A, para o sistema PCM-30);
- A curva de 15 segmentos (padrão G711, lei μ , para o sistema PCM-24).

A Figura 9 mostra a curva de 13 segmentos. Ela é composta de 7 segmentos de reta na faixa positiva e 7 segmentos de reta na faixa negativa. O segmento acima e o segmento abaixo do ponto zero formam juntos um segmento de reta, totalizando assim 13 segmentos.

A Figura 9 mostra, de forma ampliada, a parte positiva da curva de 13 segmentos. A abscissa tem o comprimento 1, correspondente ao maior valor de amplitude de um sinal. Na ordenada estão representados os intervalos de quantização (1 a 128) para os valores positivos do sinal. A correspondência dos intervalos de quantização relativa aos valores dos sinais U_{ent} mostra claramente que os valores grandes dos sinais são quantizados com uma escala expandida e os valores menores, com uma escala mais comprimida (compressão e expansão).

5.2.3 CODIFICAÇÃO

O sinal PCM a ser transmitido é obtido pela codificação dos números dos intervalos de quantização. O codificador atribui a cada amostra uma palavra de código de 8 bits em correspondência ao intervalo de quantização fixado conforme mostrado na Figura 9.

Os 128 intervalos positivos e os 128 intervalos negativos de quantização (256 intervalos) são representados nos sistemas PCM através de um código binário de 8 bits; as palavras de código têm, conseqüentemente 8 bits.

O significado dos 8 bits que compõem a palavra de código é mostrado nas tabelas abaixo.

bits →

1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°
Polaridade	Segmento			Nível			

Tabela 1 - Palavra de código

O 1° bit indica a polaridade do sinal amostrado: 0 para polaridade negativa e 1 para polaridade positiva.

Os bits de segmento identificam um dos 7 segmentos da curva (lei A). Os 4 últimos bits identificam o nível ou posição do sinal dentro do segmento.

Código			Segmento	Níveis
0	0	0	1	1-16
0	0	1	1	17-32
0	1	0	2	33-48
0	1	1	3	49-64
1	0	0	4	65-80
1	0	1	5	81-96
1	1	0	6	97-112
1	1	1	7	113-128

Tabela 2 - Código dos segmentos

Código				Níveis
0	0	0	0	1 ^o
0	0	0	1	2 ^o
0	0	1	0	3 ^o
0	0	1	1	4 ^o
0	1	0	0	5 ^o
0	1	0	1	6 ^o
0	1	1	0	7 ^o
0	1	1	1	8 ^o
1	0	0	0	9 ^o
1	0	0	1	10 ^o
1	0	1	0	11 ^o
1	0	1	1	12 ^o
1	1	0	0	13 ^o
1	1	0	1	14 ^o
1	1	1	0	15 ^o
1	1	1	1	16 ^o

Tabela 3 - Código dos níveis

5.3 CONVERSÃO DIGITAL-ANALÓGICA

As operações básicas realizadas para a conversão digital-analógica de um sistema PCM são: a regeneração do sinal, decodificação e demodulação das amostras quantizadas, conforme figura 10.

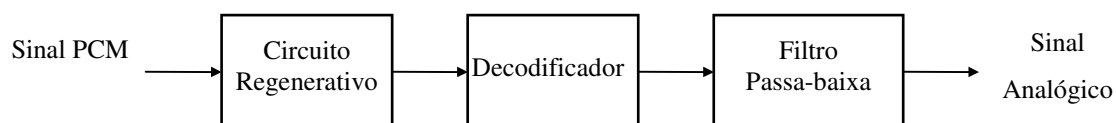


Figura 10 - Conversão digital-analógico

5.3.1 DECODIFICAÇÃO

A cada palavra de código de 8 bits é atribuído um valor de tensão de saída na recepção, e que corresponde ao valor médio do correspondente intervalo de quantização. A curva de decodificação é a mesma da codificação não-linear na emissão.

Os valores dos sinais de tensão de saída ($U_{saída}$) estão representados na parte superior da Figura 9. As palavras de código são decodificadas na sequência da chegada e convertidas em sinais PAM.

5.3.2 DEMODULAÇÃO

O sinal PAM é levado a um filtro passa-baixas, que a partir dele reconstitui o sinal telefônico original.