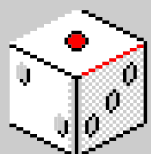
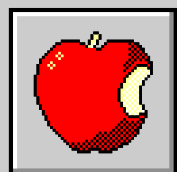


UFAM

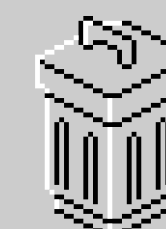
# MODULAÇÃO DELTA



partes necessárias para o  
entendimento da modulação

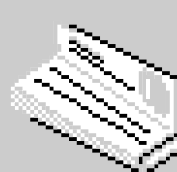
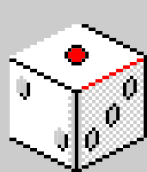
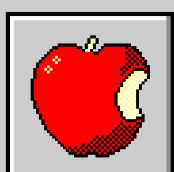
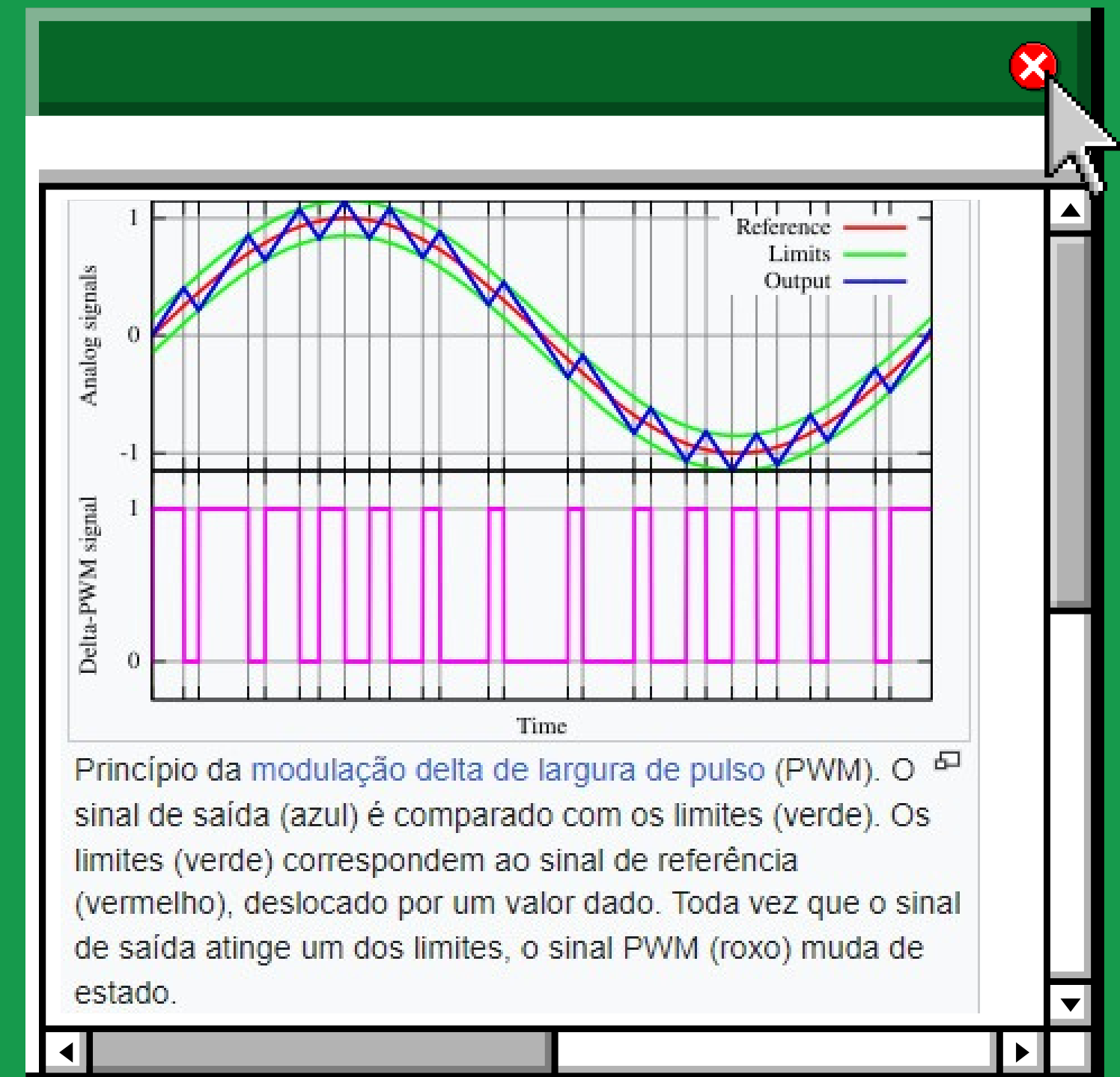


15/10/2024 - Manaus



# 1.1. Introdução

A modulação delta (DM ou modulação  $\Delta$ ) é uma técnica de modulação utilizada em sistemas de comunicação digital para conversão de sinal analógico para digital e digital para analógico, usada especialmente em aplicações de codificação de sinais de áudio e vídeo. Ela se baseia na ideia de transmitir apenas a diferença entre os valores sucessivos de um sinal, em vez de transmitir o sinal completo a cada amostra.



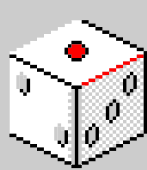
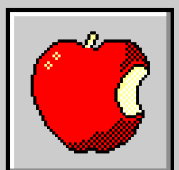
[Voltar](#)

## CARACTERÍSTICAS

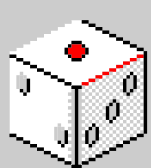
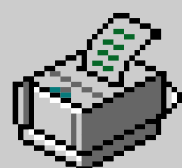
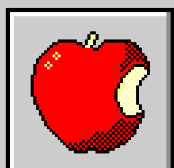
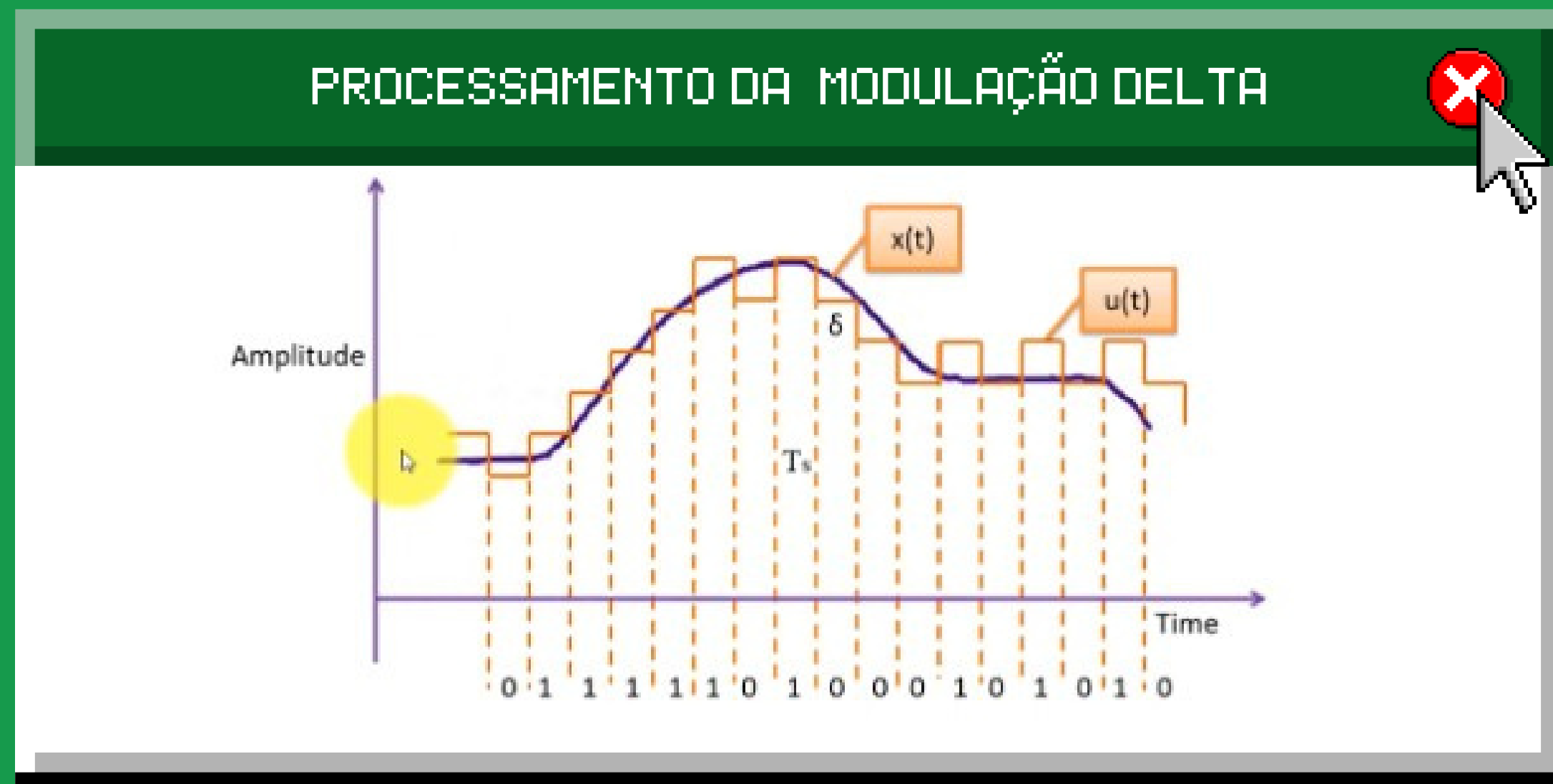


Os dados transmitidos são reduzidos a um fluxo de dados de 1 bit representando "para cima ( $\nearrow$ )" ou "para baixo ( $\searrow$ )". Suas principais características são:

- O sinal analógico é aproximado com uma série de segmentos.
- Cada segmento do sinal aproximado é comparado aos bits anteriores e os bits sucessivos são determinados por essa comparação.
- Somente a mudança de informação é enviada, ou seja, somente um aumento ou diminuição da amplitude do sinal da amostra anterior é enviado, enquanto uma condição de não mudança faz com que o sinal modulado permaneça no mesmo estado  $\nearrow$  ou  $\searrow$  da amostra anterior.



A figura mostra o processo de modulação delta, onde estamos assumindo uma quantização linear, com o seu tamanho do passo sendo delta e a duração de amostragem ou período de amostragem  $T_s$ . E esta "escada"  $u(t)$  ilustrada é usada para aproximar nosso sinal  $x(t)$ .



[Voltar](#)

## 1.2. Conceitos Básicos

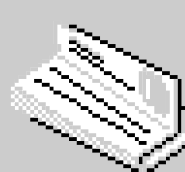
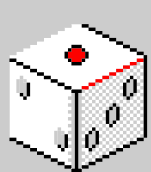
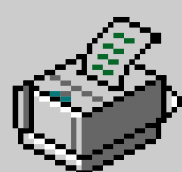


### Sinal de mensagem

- É o sinal original que contém a informação que se deseja transmitir. Pode ser um sinal analógico (como uma onda de áudio) ou um sinal digital (como um fluxo de bits).
- Compreender a natureza do sinal mensageiro é crucial, pois a modulação é uma forma de codificá-lo para transmissão.

### Portador

- É um sinal de alta frequência que transporta a informação do sinal mensageiro. A portadora é geralmente uma onda senoidal.
- A modulação envolve a variação das características da portadora (como amplitude, frequência ou fase) de acordo com o sinal mensageiro.



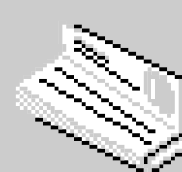
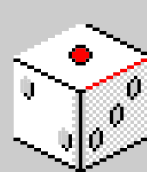
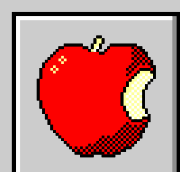
## 1.2. Conceitos Básicos

### Taxa de Amostragem

- A frequência com que o sinal mensageiro é amostrado para converter um sinal contínuo em um sinal discreto.
- A taxa de amostragem deve ser escolhida de acordo com o Teorema de Nyquist, que afirma que deve ser pelo menos o dobro da frequência máxima do sinal mensageiro para evitar a distorção.

### Quantização

- O processo de representar valores contínuos do sinal mensageiro em níveis discretos (ou quantizados).
- A quantização afeta a precisão da modulação e a qualidade do sinal transmitido, com erros de quantização podendo causar distorções.



## 1.2. Conceitos Básicos

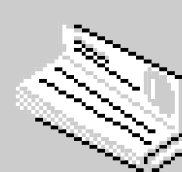
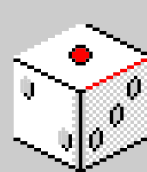
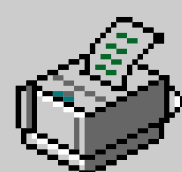
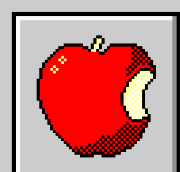
### Largura de Banda

- A largura de banda refere-se à faixa de frequências que um sinal ocupa ou que um sistema de comunicação pode transmitir. É medida em Hertz (Hz).
- A modulação delta é eficiente em termos de largura de banda porque transmite as diferenças entre amostras, o que pode reduzir a quantidade de dados necessários, economizando espaço no espectro de frequências.



### Ruído e Distúrbios

- Ruído é qualquer interferência não desejada no sinal transmitido. Pode ser causado por interferências externas, limitações do sistema ou distorções no processo de quantização.
- A modulação delta, especialmente a modulação sigma delta, é projetada para minimizar o impacto do ruído, especialmente em sinais de baixa amplitude.





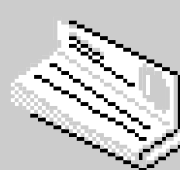
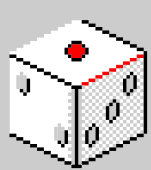
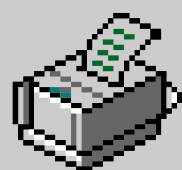
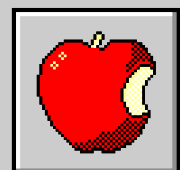
## 1.2. Conceitos Básicos

### Taxa de Dados

- A taxa de dados é a quantidade de informação transmitida por segundo, medida em bits por segundo (bps). Está diretamente relacionada à eficiência do sistema de modulação.
- Na modulação delta, a taxa de dados depende da taxa de amostragem e da complexidade do sistema de quantização. Sistemas mais eficientes de modulação podem oferecer maior qualidade sem aumentar significativamente a taxa de dados.

### Distância entre Amostras

- Refere-se ao intervalo temporal entre duas amostras sucessivas no domínio do tempo.
- A modulação delta analisa essas diferenças para codificar o sinal. Se as amostras estiverem muito distantes, há maior risco de perda de informações importantes do sinal.



## 1.2. Conceitos Básicos

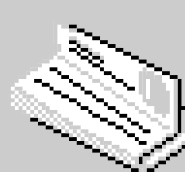
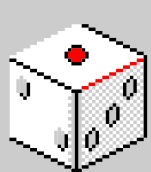
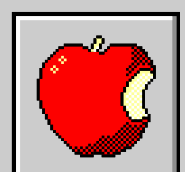
### Feedback

- Em sistemas de modulação como a modulação delta, o feedback refere-se ao uso de valores anteriores do sinal (ou de seu erro) para ajudar a modular o sinal atual.
- A modulação delta utiliza feedback para determinar as mudanças entre amostras. Esse feedback é essencial para a eficiência da modulação e para reduzir o erro de quantização.

### Sobreamostragem



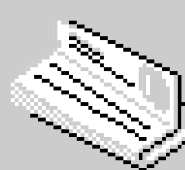
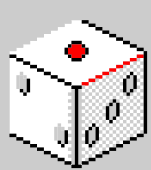
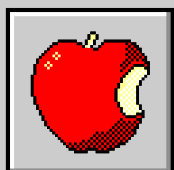
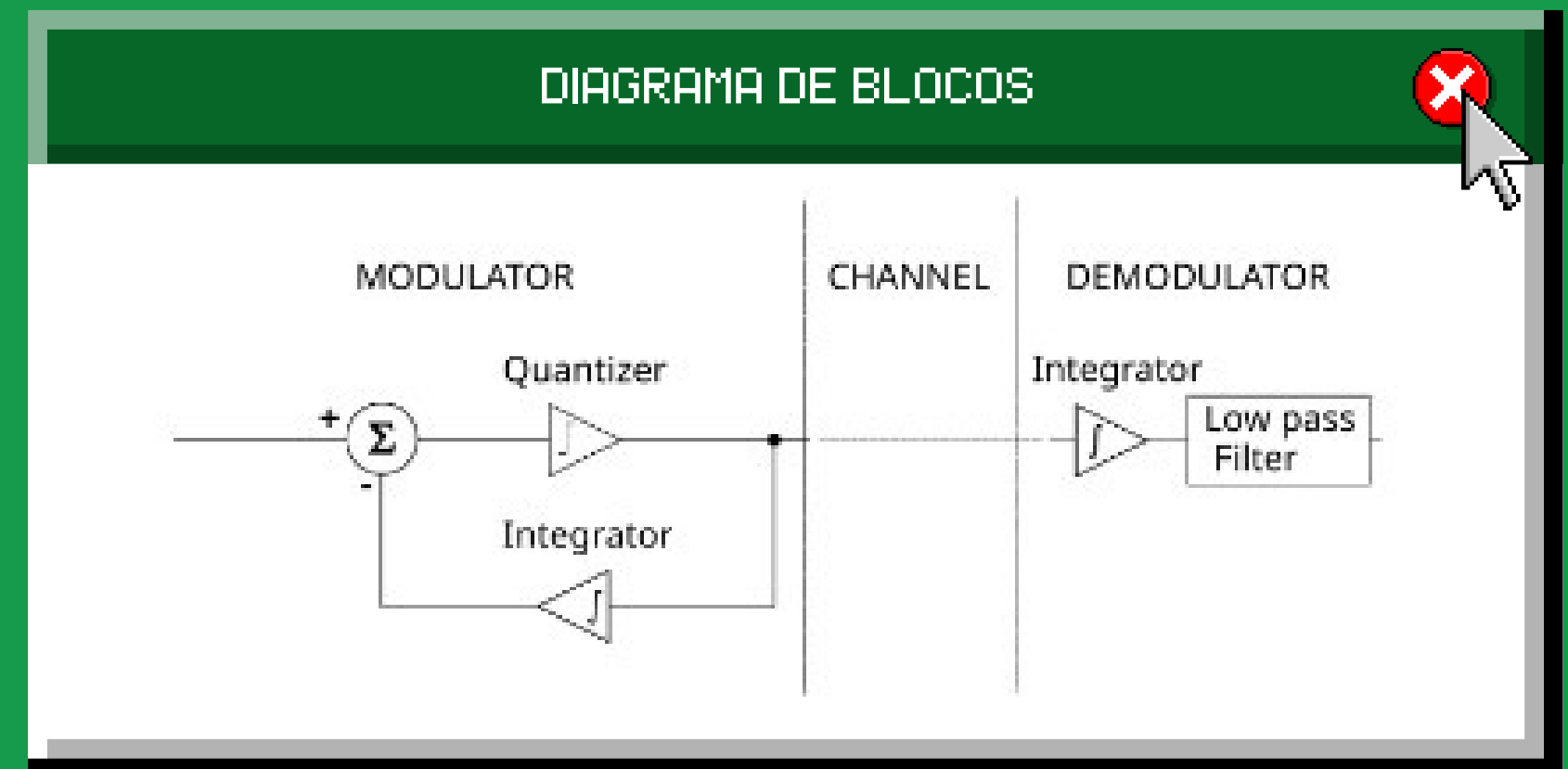
- A sobreamostragem é o processo de amostrar um sinal a uma taxa muito maior que a taxa de Nyquist, o que pode melhorar a precisão da conversão analógico-digital.
- A modulação sigma delta faz uso de sobreamostragem para melhorar a resolução e reduzir o ruído, o que é particularmente importante em aplicações de áudio de alta fidelidade.



## 1.3. Princípio de Modulação Delta

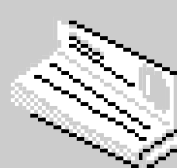
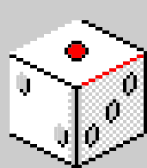
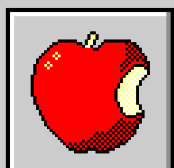
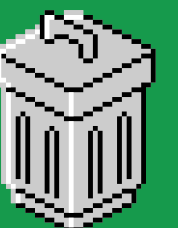
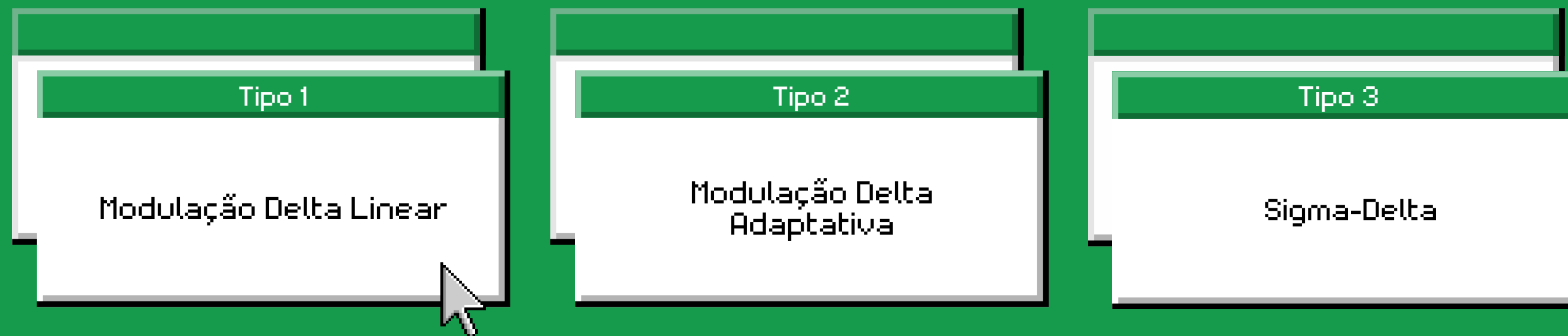
Em vez de quantizar o valor da forma de onda analógica de entrada, a modulação delta quantiza a diferença entre a etapa atual e a anterior, conforme mostrado no diagrama de blocos da figura ao lado. O modulador é feito por um quantizador que converte a diferença entre o sinal de entrada e a integral dos passos anteriores.

Basicamente, o quantizador pode ser realizado com um comparador referenciado a 0 (quantizador de dois níveis), cuja saída é 1 ou -1 se a entrada do quantizador for positiva ou negativa. O demodulador é simplesmente um integrador cuja saída sobe ou desce com cada 1 ou -1 recebido. O integrador constitui um filtro passa-baixa



## 1.4. Tipos de Modulação Delta

A modulação Delta é um dos métodos mais simples de conversão A/D, especialmente em comparação com técnicas mais complexas como a modulação sigma-delta. Na sua forma básica, ela rastreia as variações de um sinal contínuo, aproximando-se de uma função degrau unitário, onde a codificação se baseia nas diferenças entre amostras consecutivas. Existem variantes dessa técnica, citadas abaixo e exploradas a posteriori.



[Voltar](#)

## 1.4.1. Modulação Delta Linear

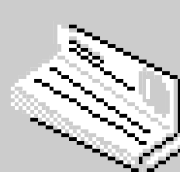
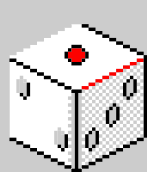
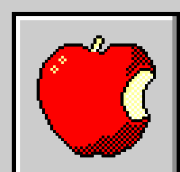
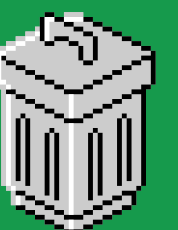
A modulação delta linear codifica as diferenças entre amostras sucessivas em vez de codificar os valores absolutos. Para isso, o sistema compara a amostra atual com a anterior e transmite um sinal que representa a direção da mudança (aumentou ou diminuiu) e a quantidade dessa diferença.

Considerando um número de amostras em cada instante de tempo  $n$ , tem-se:

- $x[0] = 0$  (a primeira amostra é 0)
- $x[1] = 0.1$
- $x[2] = 0.2$
- $x[3] = 0.15$
- $x[4] = 0.05$
- $x[5] = -0.05$

### OBSERVAÇÃO

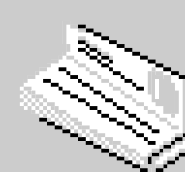
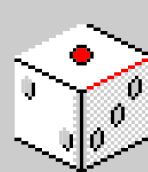
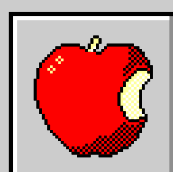
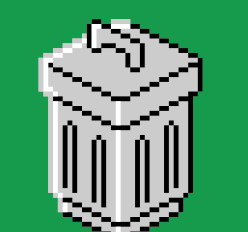
Este tipo usa uma representação linear das diferenças de amplitude entre as amostras. O sinal de saída é quantizado em níveis fixos. Na modulação delta, primeiro amostramos o sinal contínuo para convertê-lo em uma sequência de valores discretos.



[Voltar](#)

## PASSO 1

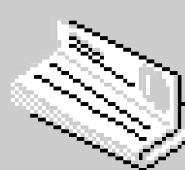
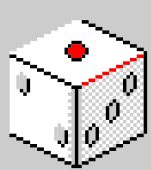
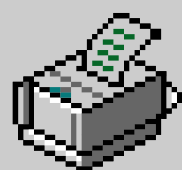
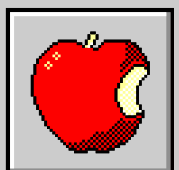
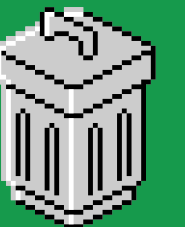
Defina um passo de quantização, que é um valor fixo que representa a mudança mínima no sinal que pode ser codificada. Vamos definir esse passo como  $\Delta = 0.1$



[Voltar](#)

## PASSO 2

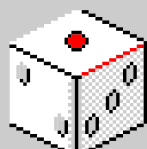
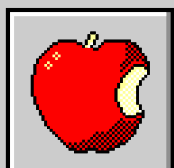
No início, o sistema começa com um valor de referência (normalmente 0), que chamaremos de amostra prevista  $y[n]$



[Voltar](#)

### PASSO 3

- A cada nova amostra  $x[n]$ , comparamos com  $y[n-1]$  (a amostra anterior prevista):
  - Se  $x[n] > y[n-1]$ , o sistema gera um bit "1" para indicar que o valor subiu, e o valor previsto é incrementado por  $\Delta$ .
  - Se  $x[n] < y[n-1]$ , o sistema gera um bit "0" para indicar que o valor desceu, e o valor previsto é decrementado por  $\Delta$ .



[Voltar](#)



## EXEMPLOS DE OPERAÇÃO

$x[0] = y[0] = 0$  (valor inicial)

$x[1] > y[0] \rightarrow$  Transmite bit 1, e  $y[1] = y[0] + \Delta = 0 + 0.1 = 0.1$

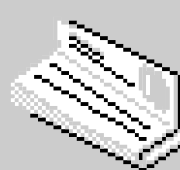
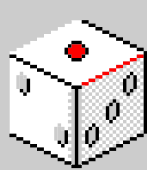
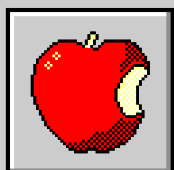
$x[2] > y[1] \rightarrow$  Transmite bit 1, e  $y[2] = y[1] + \Delta = 0.1 + 0.1 = 0.2$

$x[3] < y[2] \rightarrow$  Transmite bit 0, e  $y[3] = y[2] - \Delta = 0.2 - 0.1 = 0.1$

$x[4] < y[3] \rightarrow$  Transmite bit 0, e  $y[4] = y[3] - \Delta = 0.1 - 0.1 = 0$

$x[5] < y[4] \rightarrow$  Transmite bit 0, e  $y[5] = y[4] - \Delta = 0 - 0.1 = -0.1$

O resultado da modulação delta linear é uma sequência de bits que indica a direção de cada mudança no sinal: Sequência transmitida: 1, 1, 0, 0, 0



[Voltar](#)

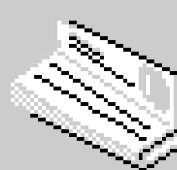
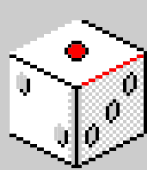
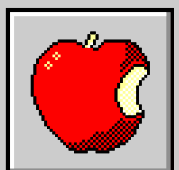
## EXEMPLOS DE OPERAÇÃO: RECEPTOR

Início com  $y'[0] = 0$ .

A partir da sequência 1, 1, 0, 0, 0:

- 1:  $y'[1] = y'[0] + 0.1 = 0 + 0.1 = 0.1$
- 1:  $y'[2] = y'[1] + 0.1 = 0.1 + 0.1 = 0.2$
- 0:  $y'[3] = y'[2] - 0.1 = 0.2 - 0.1 = 0.1$
- 0:  $y'[4] = y'[3] - 0.1 = 0.1 - 0.1 = 0$
- 0:  $y'[5] = y'[4] - 0.1 = 0 - 0.1 = -0.1$

No receptor, o processo inverso é realizado para reconstruir o sinal a partir da sequência de bits. Essa sequência reconstruída corresponde aproximadamente ao sinal original amostrado.

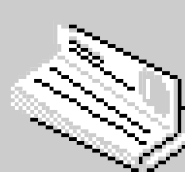
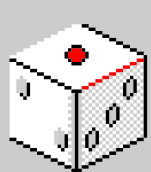
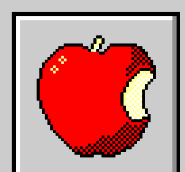


[Voltar](#)

## 1.4.2. Modulação Delta Adaptativa

A modulação delta adaptativa ajusta dinamicamente o tamanho do passo de quantização com base nas variações do sinal de entrada. Em vez de manter um passo fixo, como na modulação delta linear, o ADM aumenta ou diminui o tamanho do passo para acompanhar melhor as mudanças rápidas ou lentas do sinal. Isso melhora a qualidade da modulação ao reduzir distorções como a sobrecarga ou distorção granular.

Vamos explorar um exemplo de modulação delta adaptativa a seguir, que é uma melhoria em relação à modulação delta linear. A principal diferença está no fato de que o passo de quantização  $\Delta$  é ajustado dinamicamente de acordo com as variações do sinal. Isso permite uma codificação mais eficiente em sinais que variam rapidamente ou de forma mais estável ao longo do tempo.



[Voltar](#)

# Exemplo de Modulação Delta Adaptativa

Você tem um sinal analógico com variações rápidas e lentas. Queremos codificá-lo usando modulação delta adaptativa para ajustar automaticamente o tamanho do passo de quantização conforme o sinal varia.

Vamos considerar um sinal simples onde as amostras  $x[n]$  são:

$$x[0] = 0$$

$$x[1] = 0.05$$

$$x[2] = 0.2 \text{ (mudança rápida)}$$

$$x[3] = 0.5 \text{ (mudança rápida)}$$

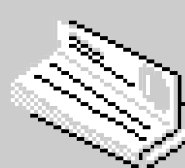
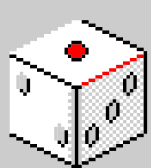
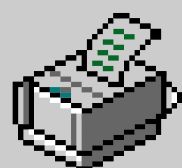
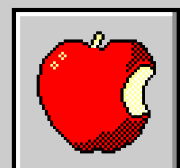
$$x[4] = 0.7$$

$$x[5] = 0.6$$

$$x[6] = 0.55 \text{ (mudança lenta)}$$

$$x[7] = 0.52$$

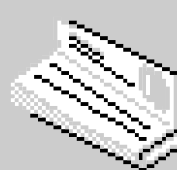
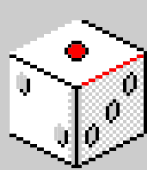
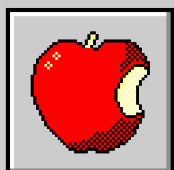
$$x[8] = 0.51$$



[Voltar](#)

## PASSO 1 - Amostragem Inicial e Condição de Partida

Iniciamos com  $y[0] = 0$  como nossa amostra prevista inicial (igual ao valor do sinal). Definimos um passo de quantização inicial  $\Delta = 0.1$ , que será adaptado conforme as mudanças no sinal.



[Voltar](#)

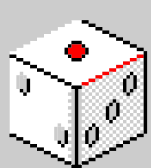
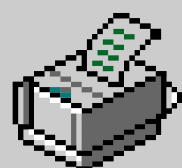
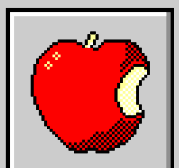
## PASSO 2 - Quantização Adaptativa



A cada nova amostra, o sistema ajusta o passo  $\Delta$  de acordo com a magnitude da diferença entre a amostra atual e a amostra anterior:

Se a diferença for grande, o passo  $\Delta$  aumenta para capturar grandes variações no sinal.

Se a diferença for pequena, o passo  $\Delta$  diminui para aumentar a precisão em variações menores.



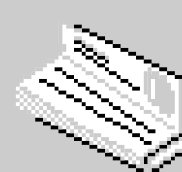
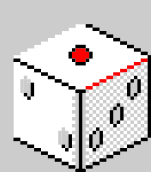
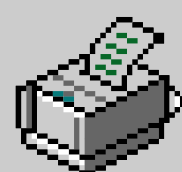
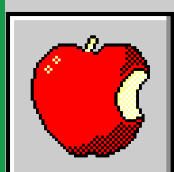
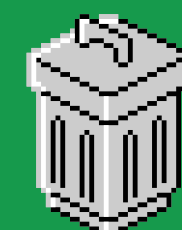
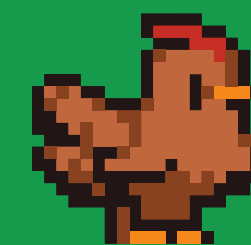
[Voltar](#)

## 1.4.3. Modulação Sigma-Delta

Uma forma avançada de modulação delta é a que utiliza um modulador sigma-delta, onde a diferença entre a amostra e o sinal quantizado é integrada ao longo do tempo. Este tipo é frequentemente usado em conversores analógico-digital (ADCs). Vamos ver um exemplo simplificado e os passos necessários para sua implementação.

Sinal de Entrada: Imagine um sinal de entrada  $x[n]$  que você deseja converter para uma forma digital e então vamos definir os nossos passos:

- $x[0] = 0.1$
- $x[1] = 0.2$
- $x[2] = 0.15$
- $x[3] = 0.3$
- $x[4] = 0.25$
- $x[5] = 0.35$



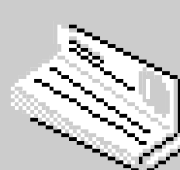
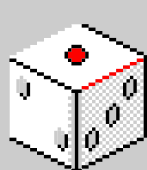
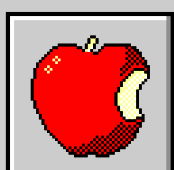
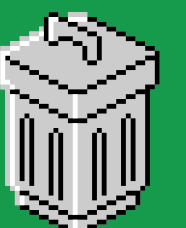
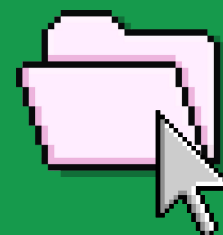
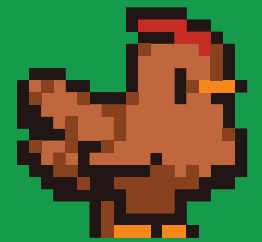
[Voltar](#)

## PASSO 1: SOBREAMOSTRAGEM



O primeiro passo é sobreamostrar o sinal de entrada a uma taxa muito maior do que a necessária. Suponha que a frequência de Nyquist nos diz que deveríamos amostrar a 1 kHz, mas, usando modulação sigma-delta, podemos amostrar a 16 kHz, por exemplo. Isso gera muito mais amostras por ciclo do sinal original, ajudando a capturar detalhes sutis.

Por simplicidade, vamos manter o número de amostras limitado neste exemplo, mas tenha em mente que a sobreamostragem real geraria várias amostras extras.



[Voltar](#)



## PASSO 2: FILTRO INTEGRADOR



O filtro integrador calcula a soma acumulada das amostras para suavizar o sinal:

$$I[0] = 0 + x[0] = 0.1$$

$$I[1] = I[0] + x[1] = 0.1 + 0.2 = 0.3$$

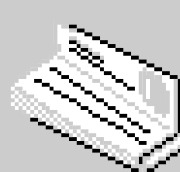
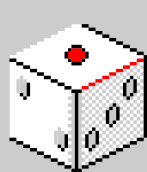
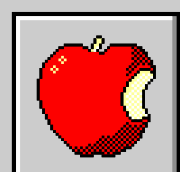
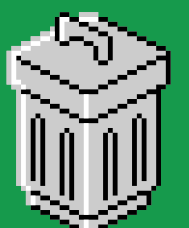
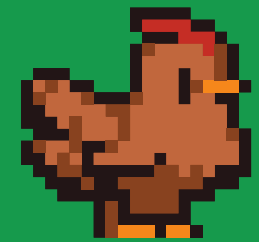
$$I[2] = I[1] + x[2] = 0.3 + 0.15 = 0.45$$

$$I[3] = I[2] + x[3] = 0.45 + 0.3 = 0.75$$

$$I[4] = I[3] + x[4] = 0.75 + 0.25 = 1.0$$

$$I[5] = I[4] + x[5] = 1.0 + 0.35 = 1.35$$

Esse filtro está "acumulando" o valor do sinal ao longo do tempo, resultando em uma saída suavizada que é menos propensa a variações rápidas.



[Voltar](#)

## PASSO 3: QUANTIZAÇÃO

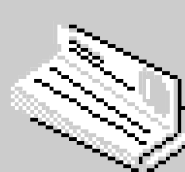
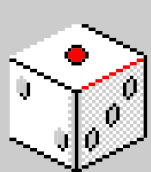
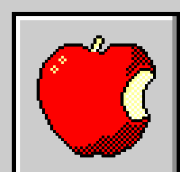
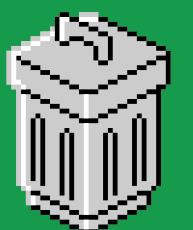
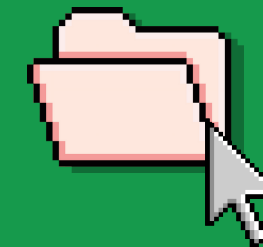
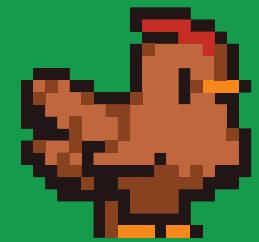


Agora, a saída do integrador  $I[n]$  é quantizada em 1 bit:

Se  $I[n] > 0$ , transmitimos um 1.

Se  $I[n] < 0$ , transmitimos um 0.

Neste caso, todas as saídas do integrador são positivas, então transmitimos 1 para todas as amostras: 1, 1, 1, 1, 1, 1



[Voltar](#)

## PASSO 4: REALIMENTAÇÃO (FEEDBACK)

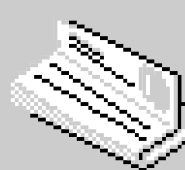
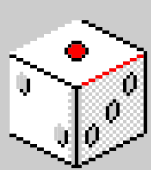
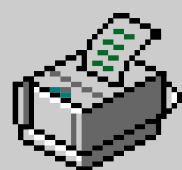
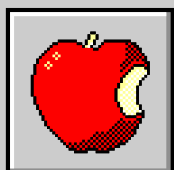
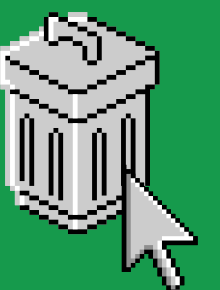
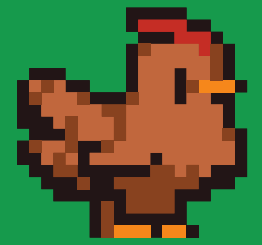


Agora, a modulação sigma-delta calcula o erro de quantização e o realimenta para o integrador. O erro de quantização é a diferença entre o valor quantizado e o valor real do integrador.

Se considerarmos que estamos usando uma quantização de 1 bit, a saída pode ser 1 ou 0. Por exemplo, se o integrador gerar um valor de 0.75 e for quantizado como 1, o erro será:

$$\text{Erro} = 1 - 0.75 = 0.25$$

Esse erro é realimentado ao integrador para corrigir o próximo valor, ajudando a distribuir o erro ao longo das amostras subsequentes. O integrador corrige continuamente esse erro, resultando em uma melhor representação do sinal original ao longo do tempo.



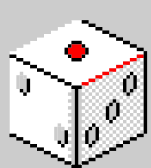
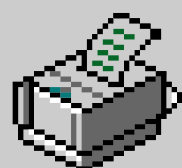
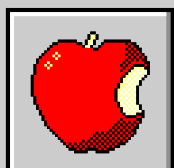
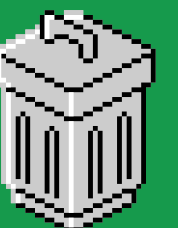
[Voltar](#)

# 1.5. Vantagens e Desvantagens

## VANTAGENS

Lista de Vantagens sobre Modulação Delta:

- Simplicidade de Implementação
- Baixa Taxa de Transmissão de Dados
- Sobreamostragem Simplificada
- Correção Automática de Pequenos Erros



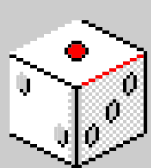
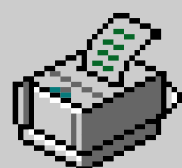
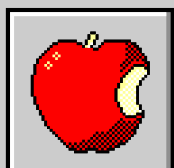
[Voltar](#)

# 1.5. Vantagens e Desvantagens

## DESVANTAGENS

Lista de Desvantagens sobre Modulação Delta:

- Suscetível a Sobrecarga (Slope Overload)
- Ruído de Quantização em Sinais Estacionários
- Ineficiência em Sinais de Alta Frequência
- Problemas de Quantização em Ambientes Ruidosos
- Baixa Eficiência Energética

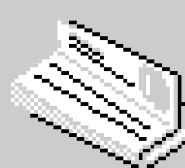
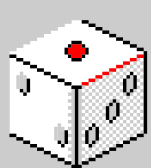
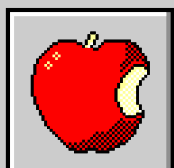
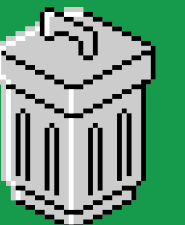


[Voltar](#)

# 1.6. Aplicações

## APLICAÇÕES DA MODULAÇÃO DELTA

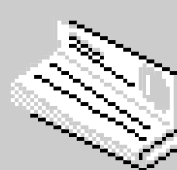
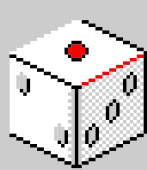
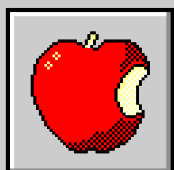
- Codificação de Voz (Sistemas de Comunicação Digital)
- Conversores Analógico-Digital (ADC)
- Sistemas de Áudio Digital (Sigma-Delta ADC)
- Compressão de Dados
- Radar e Sonar
- Transmissão de Dados via Satélite



[Voltar](#)

## 1.7. Conclusão

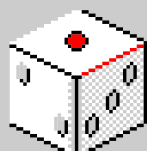
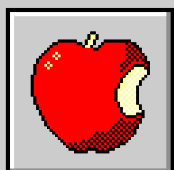
- A modulação delta, em suas diferentes variações, oferece soluções eficazes para diversas aplicações de comunicação e processamento de sinais. Cada técnica tem suas vantagens específicas e pode ser escolhida com base nos requisitos de precisão, largura de banda e variação do sinal, tornando-a uma ferramenta essencial em sistemas de comunicação digital e conversão de sinais.
- A modulação delta codifica as diferenças entre amostras sucessivas, economizando largura de banda, mas enfrenta dificuldades com sinais de rápida variação, resultando em erros como o slope overload. A modulação delta adaptativa resolve isso ajustando dinamicamente o passo de quantização, capturando variações de sinal mais eficientemente. Já a modulação sigma-delta, com sobreamostragem e feedback, oferece alta precisão e baixa distorção, ideal para sistemas de áudio de alta definição.



[Voltar](#)

## REFERÊNCIAS

- Delta Modulation - <https://youtu.be/i8c4t9ck0cs>
- [https://en.wikipedia.org/wiki/Delta\\_modulation](https://en.wikipedia.org/wiki/Delta_modulation)
- <https://edisciplinas.usp.br/mod/resource/view.php?id=4934456>



[Voltar](#)