

Conversão

Digital / Analógico e Analógico / Digital

(DAC e ADC)

SICO5A – Sistemas Digitais

Professor: Layhon Santos
layhonsantos@utfpr.edu.br

Contextualização

O que veremos na disciplina?

Armazenamento de dados

(Dispositivos de memória)

Operações Lógicas e Matemáticas

(ALU – CPU – FPGA)

Comunicação de dados

(Conversores A/D e D/A)

Conversores A/D e D/A

Processamento de áudio



Gravação de áudio



Som automotivo

Smartphone

Qualcomm® Artificial Intelligence Engine

CPU

- Qualcomm® Kryo™ 460 CPU

DSP

- Qualcomm® Hexagon™ 685 DSP

GPU

- Qualcomm® Adreno™ 612 GPU



Controle em automação industrial

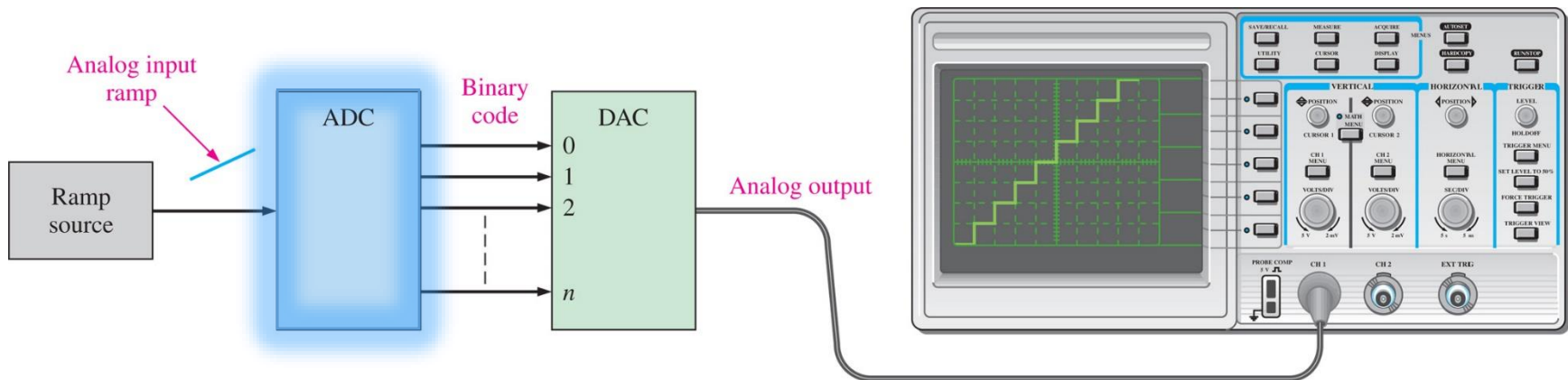


Conversores A/D e D/A

- **Aplicação Genérica e Definições:**

Conversor Analógico/Digital:

Circuito que realiza a conversão de um sinal analógico em código binário é um **conversor analógico-digital (ADC – analog-to-digital converter)**.

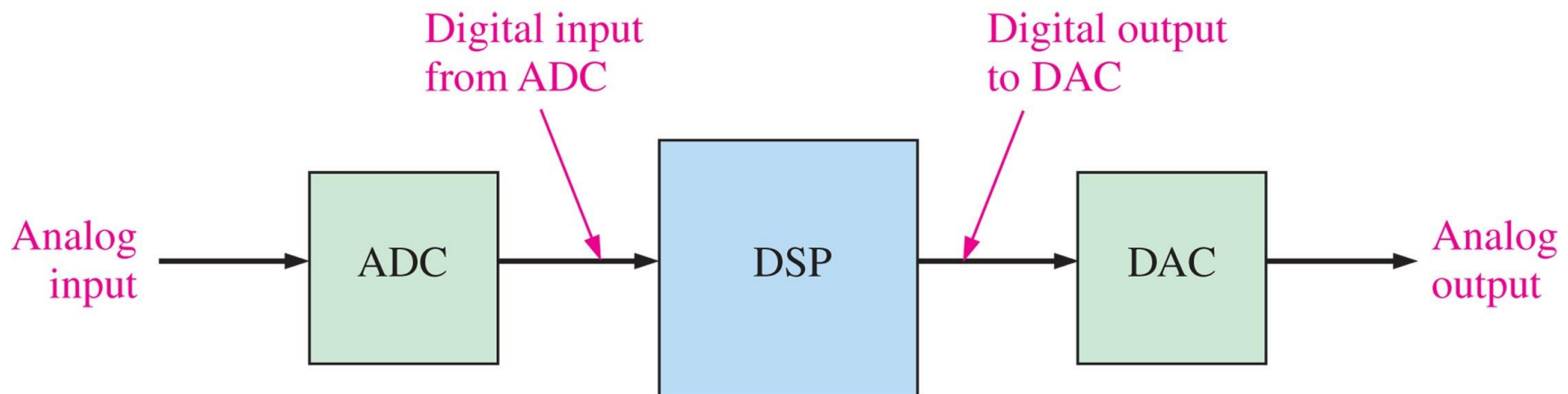


Conversores A/D e D/A

- **Aplicação Genérica e Definições:**

Processamento Digital de Sinais:

O processamento de sinais digitais converte sinais que estejam originalmente na forma analógica tais como som, vídeo e informações de sensores, para a forma digital e usa técnicas digitais para melhorar e modificar os dados do sinal analógico em diversas aplicações utilizando um DSP (*Digital Signal Processor*).

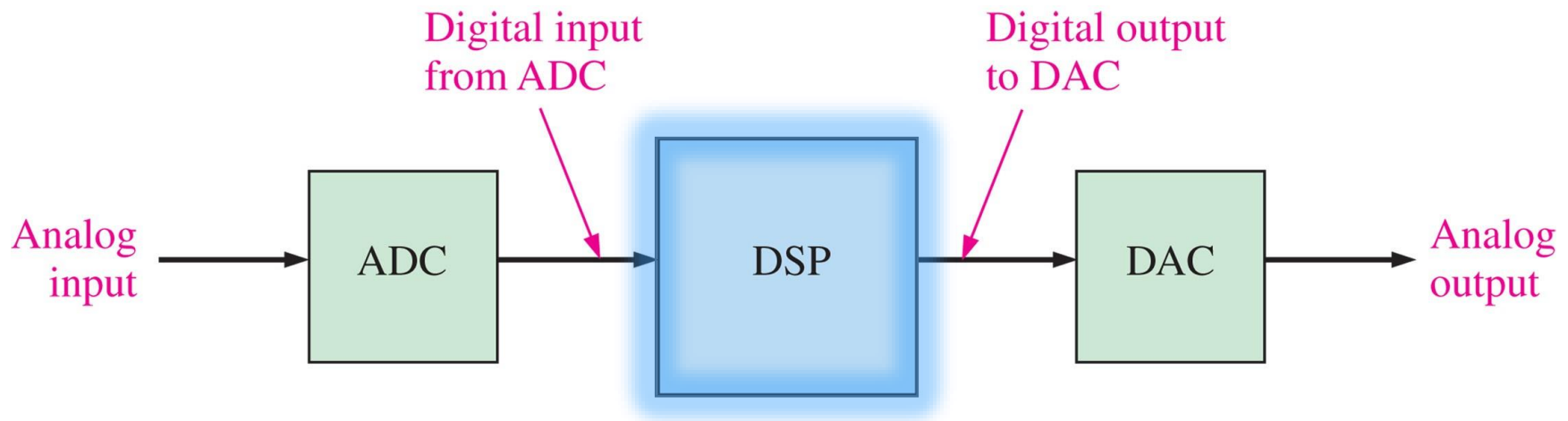


Conversores A/D e D/A

- **Aplicação Genérica e Definições:**

Processador Digital de Sinais (DSP – *Digital Signal Processor*):

O DSP pode realizar diversas operações nos dados recebidos, tais como remoção de interferências indesejadas, aumento da amplitude de algumas frequências e redução de outras, codificação de dados para transmissões seguras (sigilo) e detecção e correção de erros em códigos transmitidos.

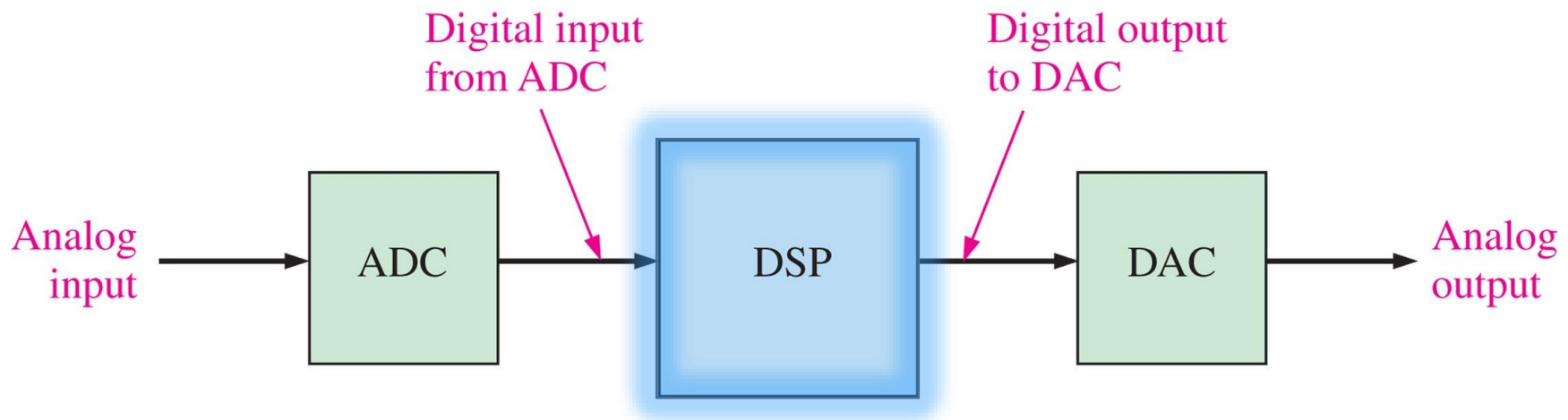


Conversores A/D e D/A

- **Aplicação Genérica e Definições:**

Processador Digital de Sinais (DSP – *Digital Signal Processor*):

Os DSPs são capazes de, entre outras coisas, “limpar” sons ao serem gravados, remover ecos de linhas de comunicações, melhorar as imagens em equipamentos de tomografia computadorizados para um melhor diagnóstico médico e embaralhar (criptografar) a conversação telefônica celular para fins de privacidade.



Conversores A/D e D/A

- **Aplicação Genérica e Definições:**

Processador Digital de Sinais (DSP – *Digital Signal Processor*):

- **Arquitetura Básica:** DSP é basicamente um microprocessador especializado e otimizado em termos de velocidade para processar dados em tempo real. Muitos DSPs são baseados no que ficou conhecido como *arquitetura Harvard*, a qual consiste de uma unidade central de processamento (CPU) e duas memórias, uma para dados e outra para programa.

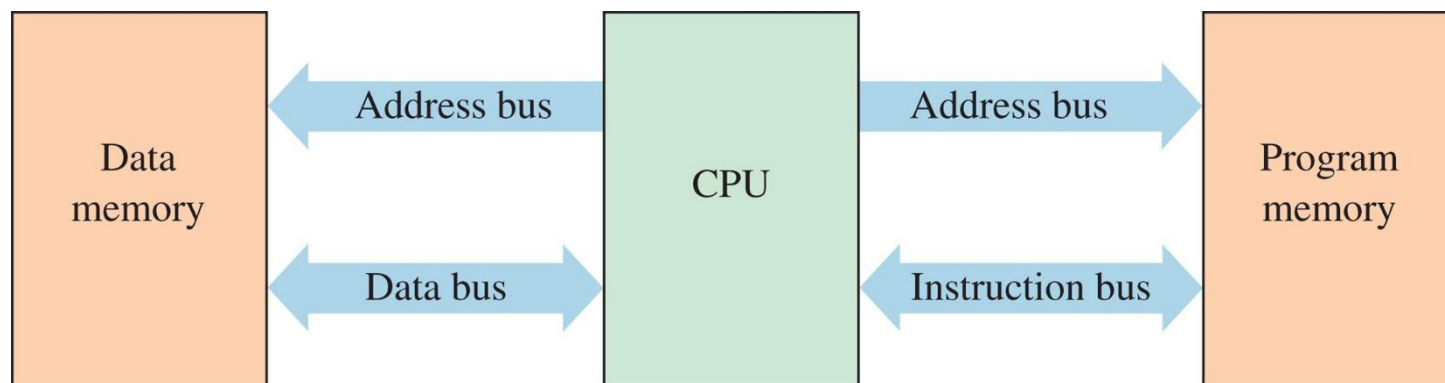


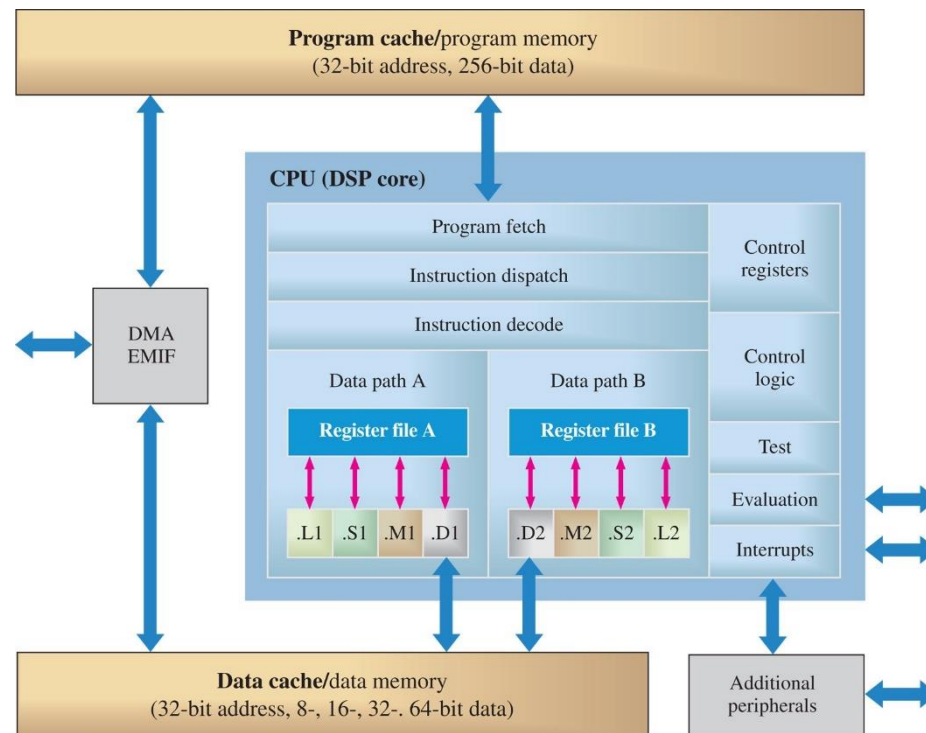
Diagrama em bloco geral do DSP de arquitetura *Harvard*

Conversores A/D e D/A

- **Aplicação Genérica e Definições:**

Processador Digital de Sinais (DSP – *Digital Signal Processor*):

- **Exemplo:** Cada DSP da série C6000 do fabricante Texas Instruments tem oito unidades funcionais que contêm dois multiplicadores de 16 bits e seis unidades lógicas e aritméticas (ALUs) e processam em até **4800 MIPS** (*Mega Instructions per Second*).

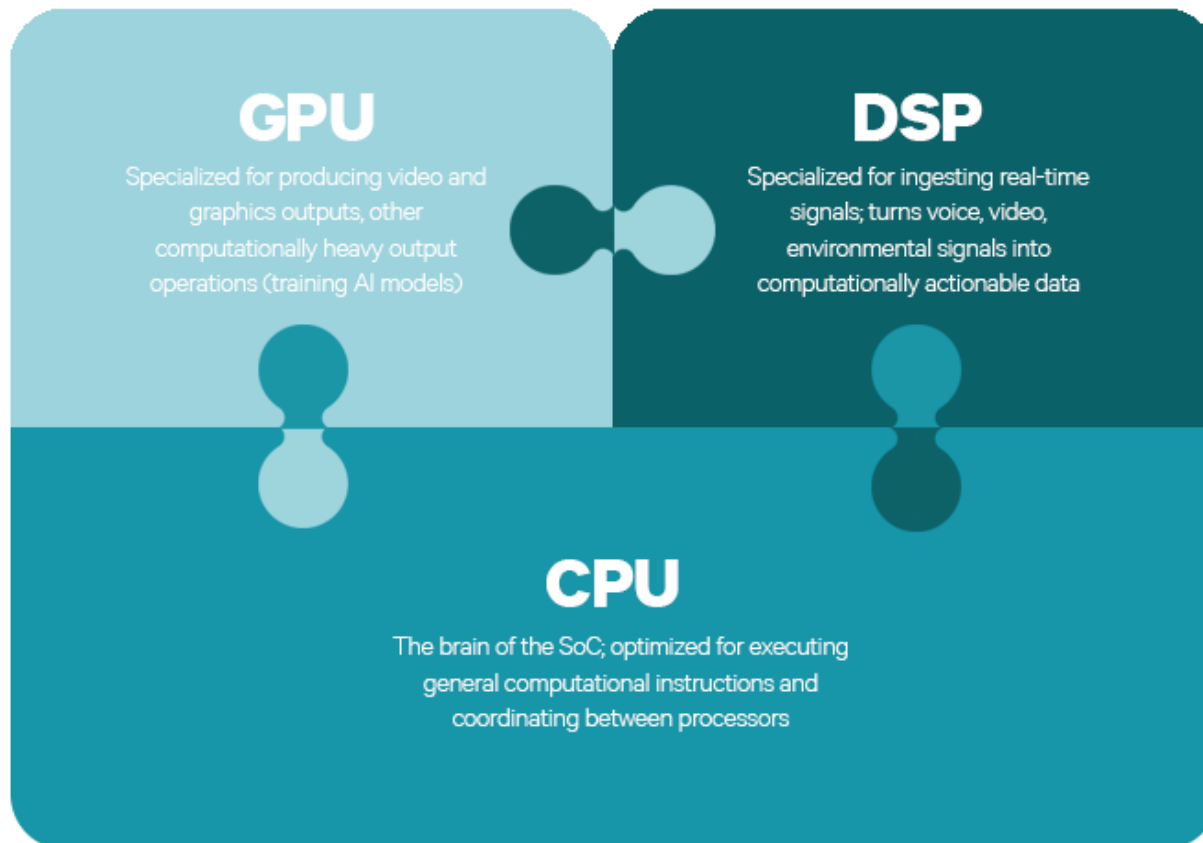


Conversores A/D e D/A

- **Aplicação Genérica e Definições:**

Processador Digital de Sinais (DSP – *Digital Signal Processor*):

- **Exemplo:** Parallel-Program with the **Snapdragon** Heterogeneous Compute (Smartphone)

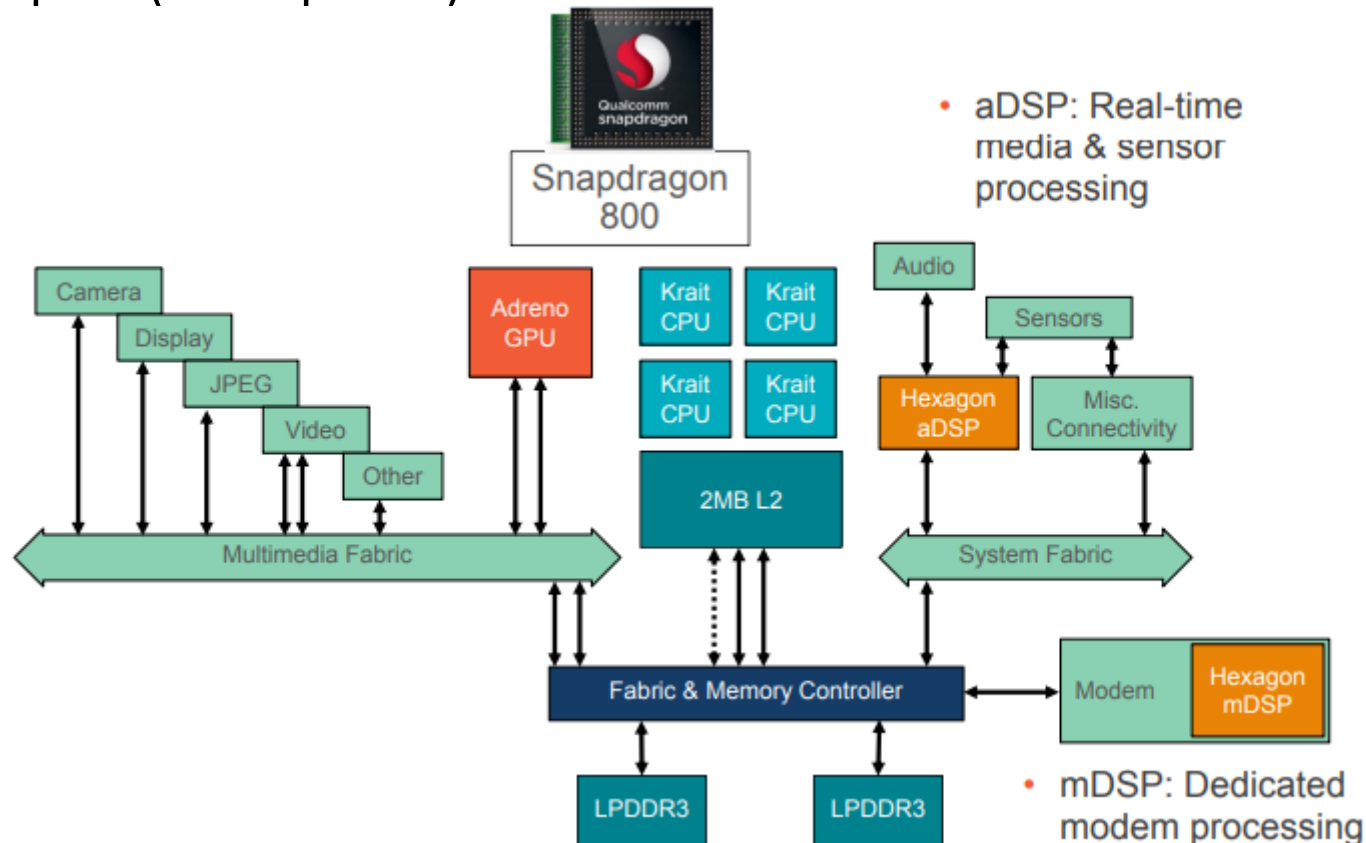


Conversores A/D e D/A

- **Aplicação Genérica e Definições:**

Processador Digital de Sinais (DSP – *Digital Signal Processor*):

- **Exemplo:** Parallel-Program with the Snapdragon Heterogeneous Compute (Smartphone)

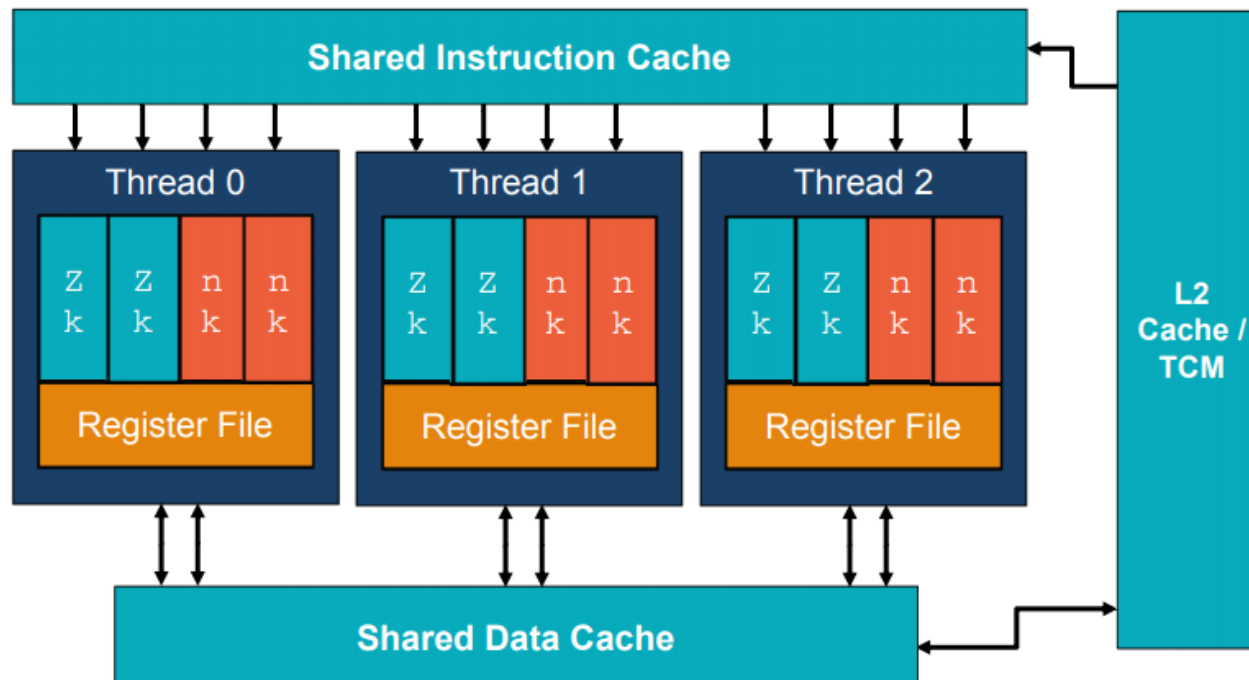


Conversores A/D e D/A

- **Aplicação Genérica e Definições:**

Processador Digital de Sinais (DSP – *Digital Signal Processor*):

- **Exemplo:** Parallel-Program with the Snapdragon Heterogeneous Compute (Smartphone)

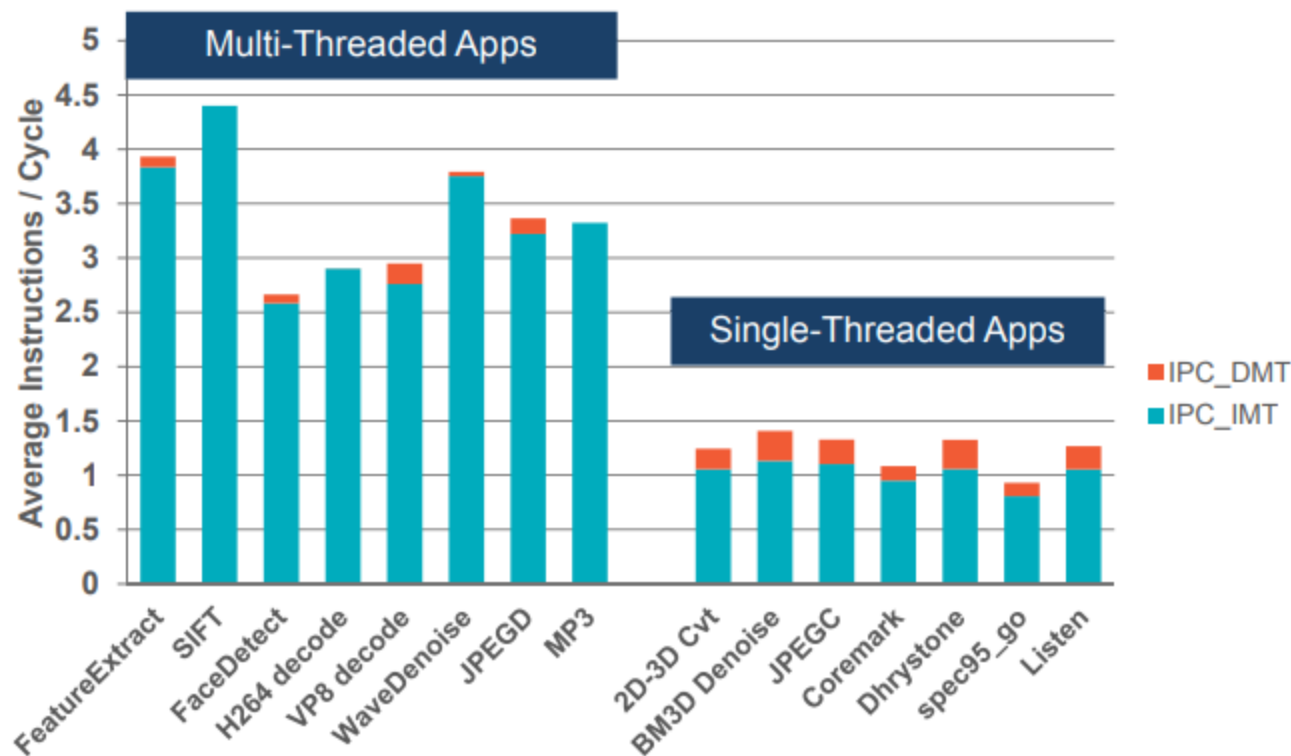


Conversores A/D e D/A

- Aplicação Genérica e Definições:

Processador Digital de Sinais (DSP – *Digital Signal Processor*):

- **Exemplo:** Parallel-Program with the Snapdragon Heterogeneous Compute (Smartphone) – antigem ate **5440-12660** MIPS.

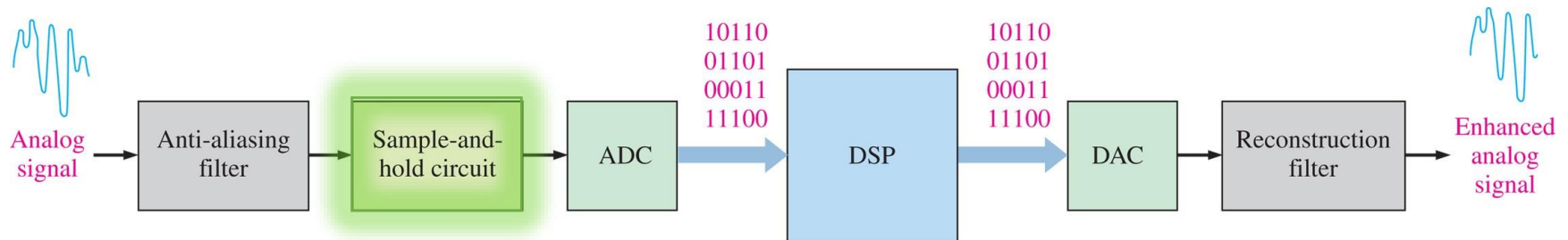


Conversores A/D e D/A

- **Aplicação Genérica e Definições:**

Processador Digital de Sinais (DSP – *Digital Signal Processor*):

Diagrama completo de uma aplicação de processamento de sinais:

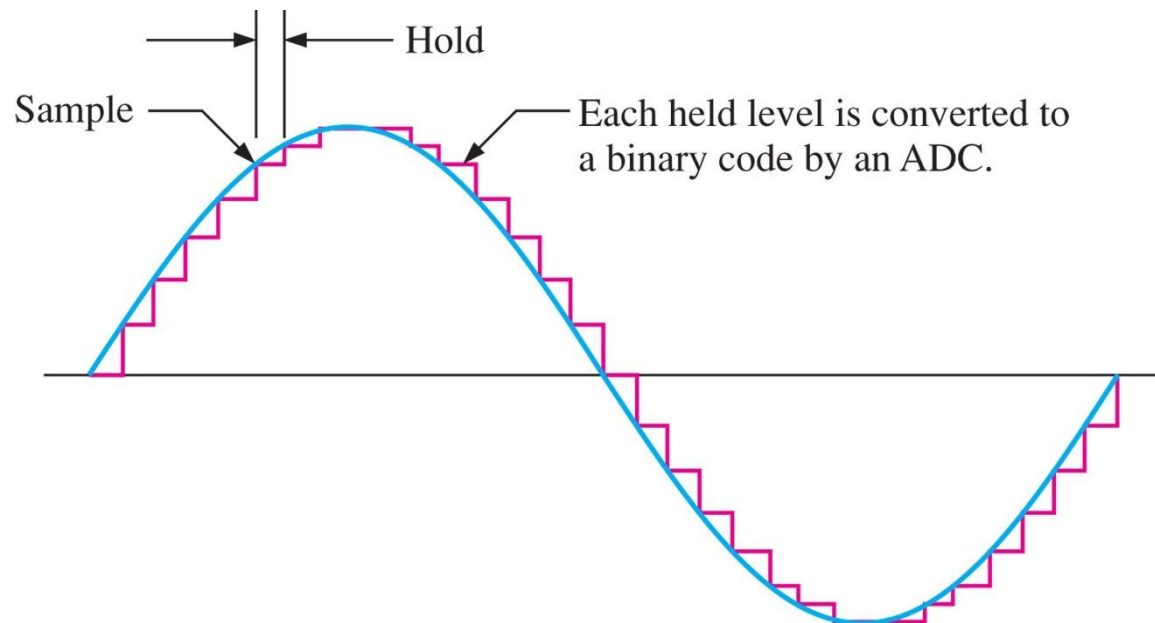


Conversores A/D e D/A

- **Aplicação Genérica e Definições:**

Processo de amostragem e retenção:

Um sistema de processamento de sinais digitais traduz primeiro um sinal analógico que varia continuamente em uma série de níveis discretos. Essa série de níveis segue a variação do sinal analógico lembrando o formato de uma escada, conforme ilustrado para o caso de uma onda senoidal

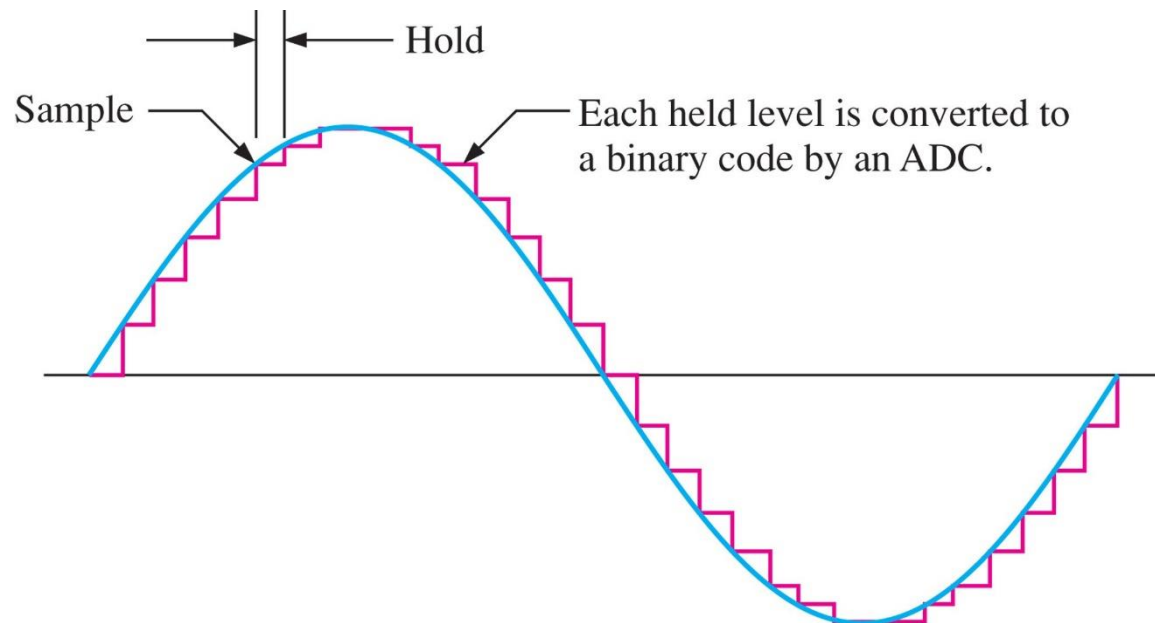


Conversores A/D e D/A

- **Aplicação Genérica e Definições:**

Processo de amostragem e retenção:

O processo de transformação do sinal analógico original para a aproximação de uma “escada” é realizado por um circuito de amostragem e retenção (**S/H – *sample and hold***).

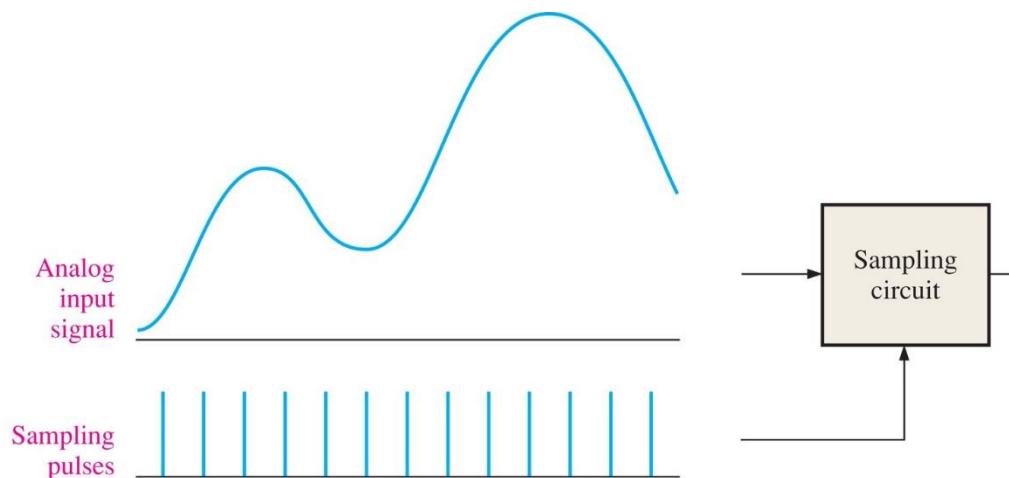


Conversores A/D e D/A

• Aplicação Genérica e Definições:

Processo de amostragem e retenção:

- A **amostragem** é o processo de aquisição de um número suficiente de valores discretos em pontos da forma de onda que definem o formato da onda. Quanto mais amostras são obtidas, com mais precisão a forma de onda pode ser definida.
- A amostragem converte um sinal analógico em uma **série de impulsos**, cada um representando a amplitude do sinal num dado instante do tempo.



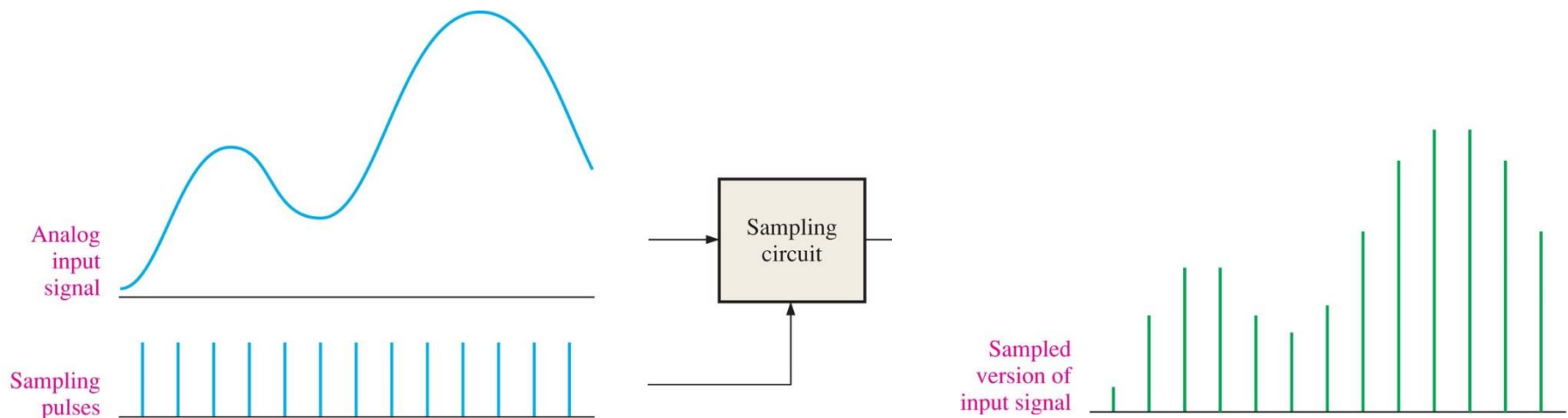
Desenhe o sinal ao lado amostrado

Conversores A/D e D/A

- **Aplicação Genérica e Definições:**

Processo de amostragem e retenção:

- A **amostragem** é o processo de aquisição de um número suficiente de valores discretos em pontos da forma de onda que definem o formato da onda. Quanto mais amostras são obtidas, com mais precisão a forma de onda pode ser definida.
- A amostragem converte um sinal analógico em uma **série de impulsos**, cada um representando a amplitude do sinal num dado instante do tempo.



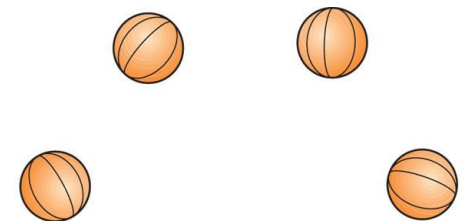
Conversores A/D e D/A

- **Aplicação Genérica e Definições:**

Processo de amostragem e retenção:

- O **teorema da amostragem** diz que, para representar um sinal analógico, a frequência de amostragem, $f(\text{amostragem})$, tem que ser pelo menos duas vezes a componente de maior frequência, $f_a(\text{máx})$, do sinal analógico.

$$f_{\text{amostragem}} \geq 2f_{a(\text{máx})}$$



(a) One sample of a ball during a single bounce

(b) Two samples of a ball during a single bounce. This is the absolute minimum required to tell anything about its movement, but generally insufficient to describe its path.

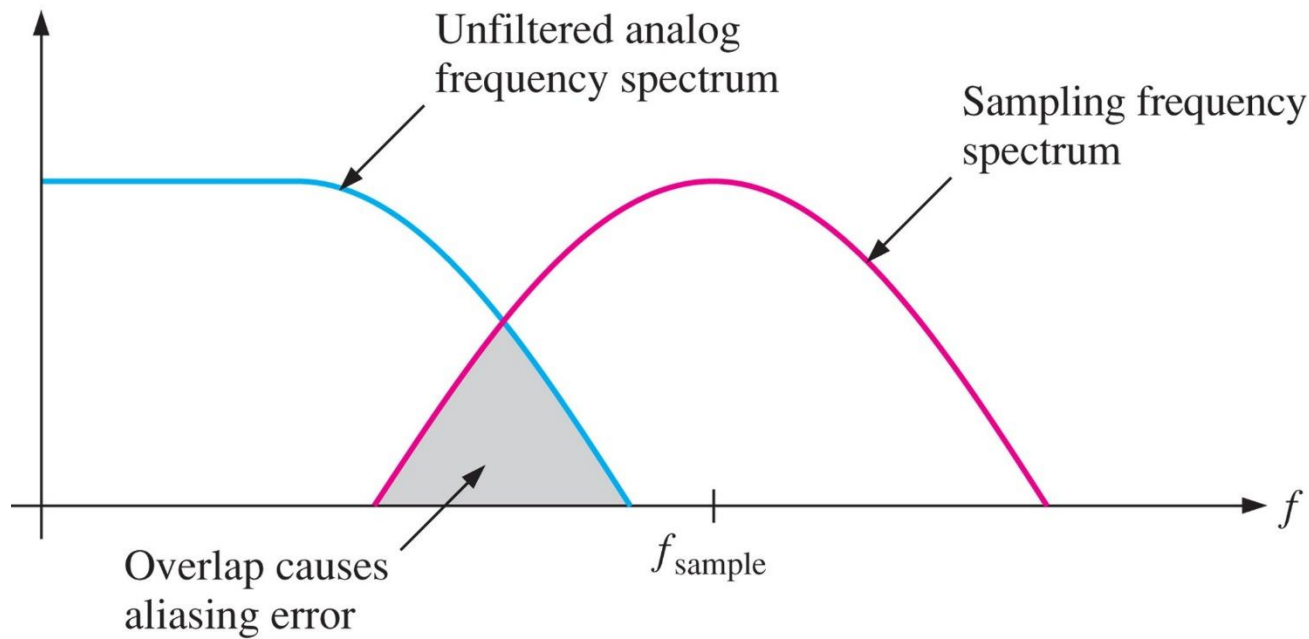
(c) Four samples of a ball during a single bounce form a rough picture of the path of the ball.

Conversores A/D e D/A

- **Aplicação Genérica e Definições:**

Processo de amostragem e retenção:

- Se um sinal analógico contém frequências acima da frequência de Nyquist, essas frequências se sobrepõem ao espectro da forma de onda amostrada conforme visto na figura, ocorrendo uma interferência resultando em um **erro de aliasing** (falseamento ou sobreposição).

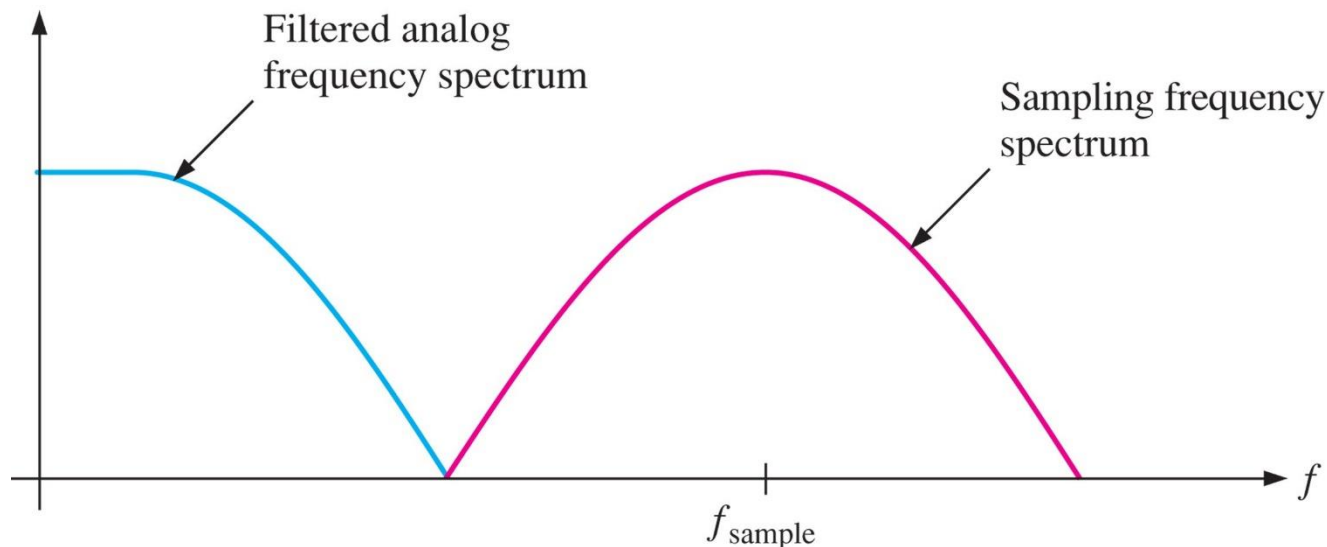


Conversores A/D e D/A

- **Aplicação Genérica e Definições:**

Processo de amostragem e retenção:

- Um **filtro passa-baixas *anti-aliasing*** tem que ser usado para limitar o espectro de frequência do sinal analógico para uma dada frequência de amostragem. Para evitar um erro de *aliasing*, o filtro tem que pelo menos eliminar todas as frequências analógicas acima da frequência mínima no espectro de amostragem.

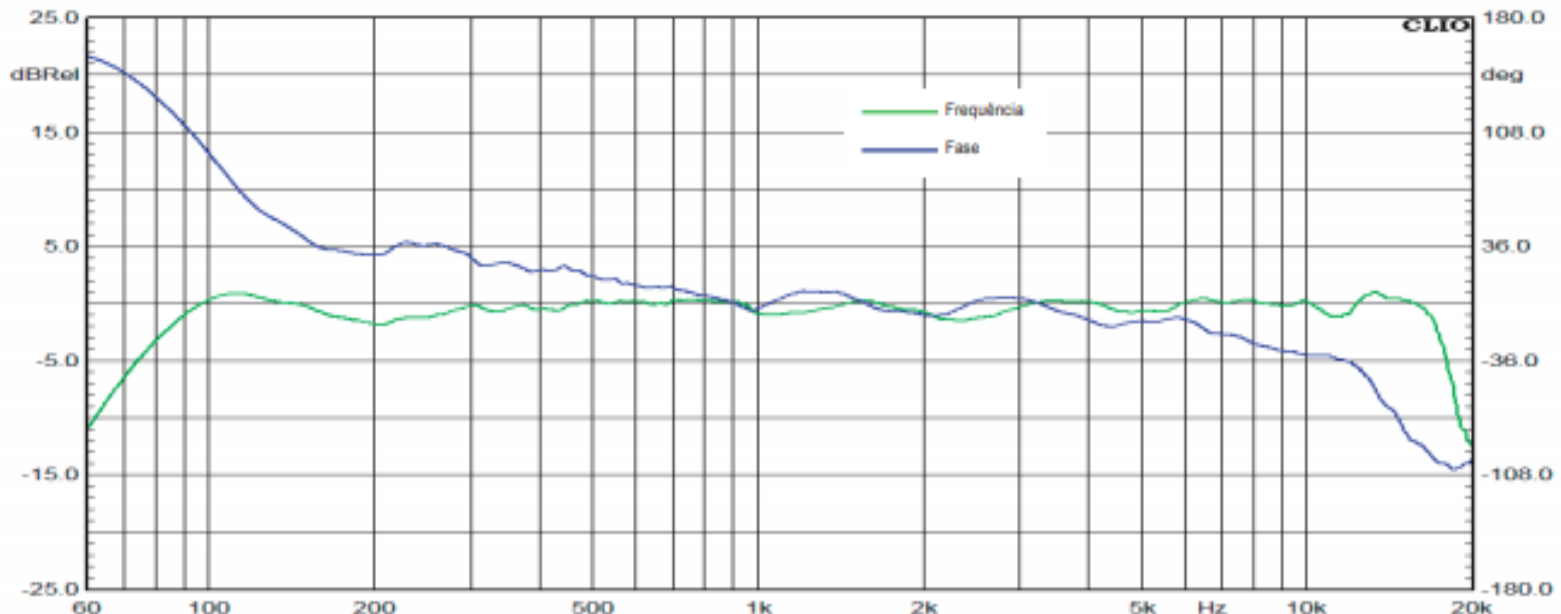


Conversores A/D e D/A

- **Aplicação Genérica e Definições:**

Processo de amostragem e retenção:

- **Exemplo:** As taxas de amostragens usadas para CDs de áudio é de 44,1 kHz. De acordo com a taxa de Nyquist, a frequência de amostragem tem que ser pelo menos duas vezes a frequência do sinal de áudio. Portanto, a taxa de amostragem de 44,1 kHz para um CD captura as frequências de até aproximadamente 22 kHz, o que excede à especificação de 20 kHz que é comum para a maioria dos equipamentos de áudio.



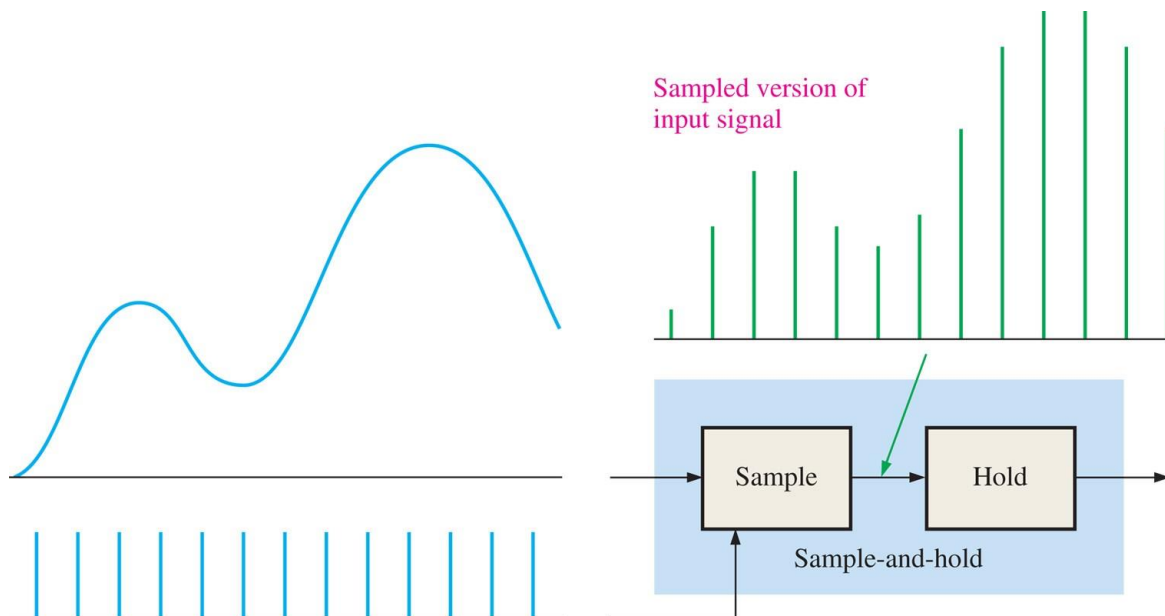
Resposta em frequência de uma caixa de som comercial Modelo M112D – Attack Audio System

Conversores A/D e D/A

• Aplicação Genérica e Definições:

Processo de amostragem e retenção:

- A operação de **retenção** é parte do bloco de amostragem e retenção mostrado na Figura. Após a filtragem e amostragem, o nível amostrado tem que ser mantido constante até que aconteça a próxima amostra. Isso é necessário para o ADC ter tempo de processar o valor amostrado.



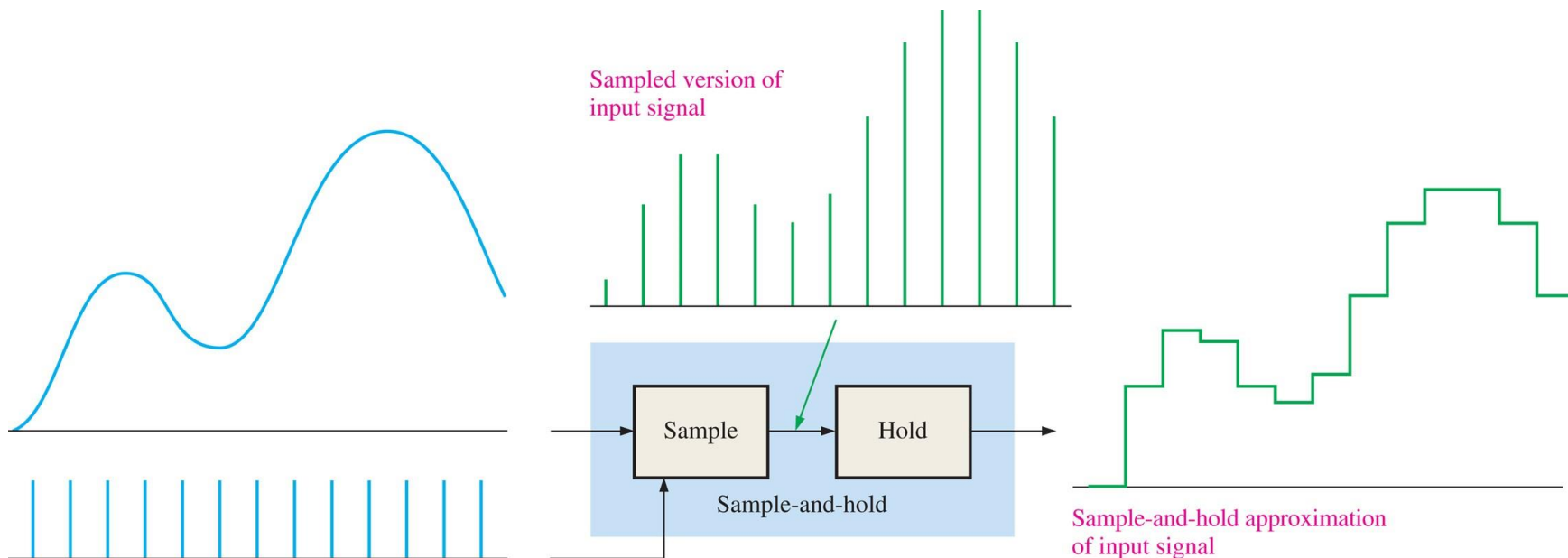
Desenhe o sinal após o S/H

Conversores A/D e D/A

- **Aplicação Genérica e Definições:**

Processo de amostragem e retenção:

- A operação de **retenção** é parte do bloco de amostragem e retenção mostrado na Figura. Após a filtragem e amostragem, o nível amostrado tem que ser mantido constante até que aconteça a próxima amostra. Isso é necessário para o ADC ter tempo de processar o valor amostrado.

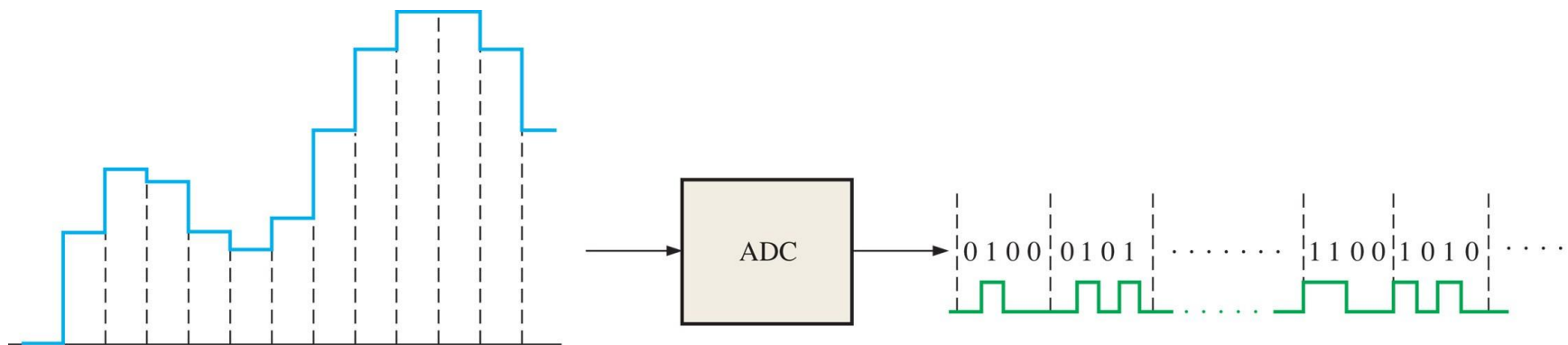


Conversores A/D e D/A

- **Aplicação Genérica e Definições:**

Conversão A/D:

- O processo de amostragem e retenção mantém a amplitude do sinal de entrada analógico constante entre os pulsos de amostragem portanto, a conversão analógico-digital pode ser feita usando um valor constante em vez de um sinal analógico que varia durante o intervalo de conversão, o qual corresponde ao tempo entre os pulsos de amostragem.

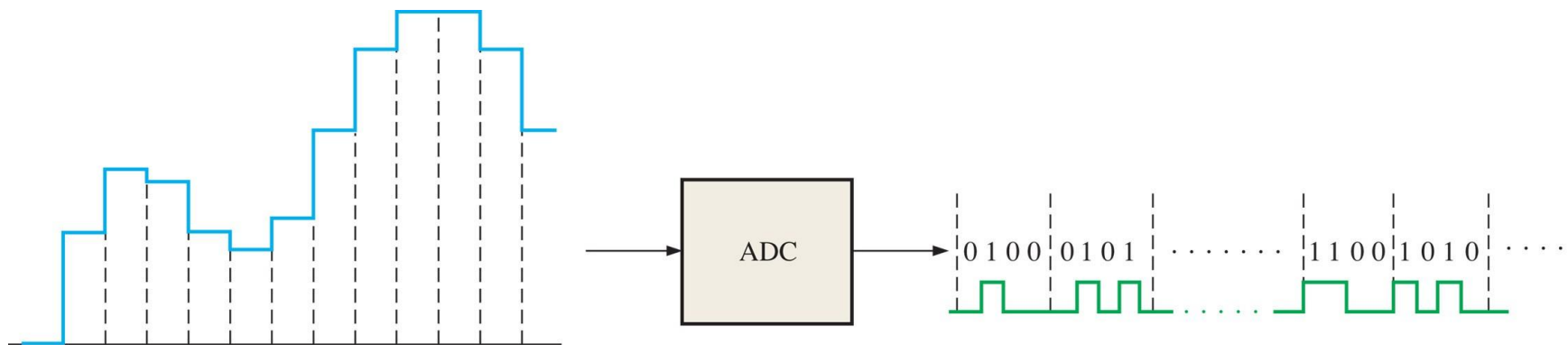


Conversores A/D e D/A

- **Aplicação Genérica e Definições:**

Conversão A/D:

- O processo de conversão de um valor analógico para um código é denominado de **quantização**. Durante o processo de quantização, o ADC converte cada valor amostrado do sinal analógico em código binário. **Quanto mais bits forem usados para representar um valor amostrado, mais precisa será a representação.**

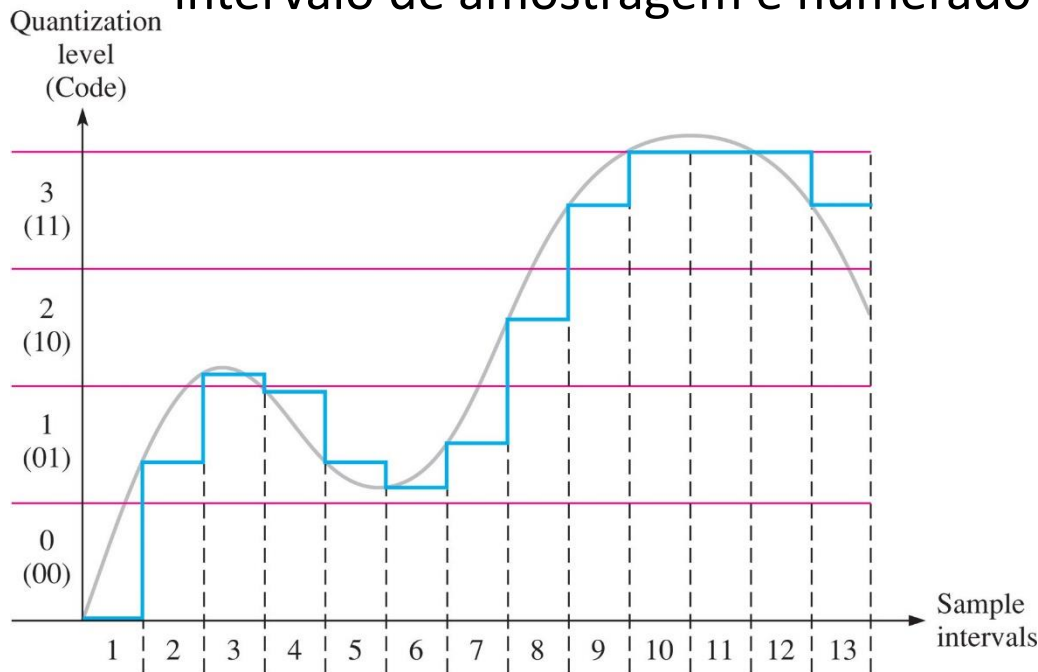


Conversores A/D e D/A

• Aplicação Genérica e Definições:

Conversão A/D:

- Para ilustrar, vamos quantizar uma produção da forma de onda analógica em quatro níveis (0–3). Conforme mostra a Figura, são necessários dois bits. Observe que cada nível de quantização é representado por um código de **2 bits** no eixo vertical e cada intervalo de amostragem é numerado ao longo do eixo horizontal.



Determine o resultado da conversão A/D utilizando 2bits para cada intervalo de amostragem

Conversores A/D e D/A

• Aplicação Genérica e Definições:

Conversão A/D:

- Para ilustrar, vamos quantizar uma produção da forma de onda analógica em quatro níveis (0–3). Conforme mostra a Figura, são necessários dois bits. Observe que cada nível de quantização é representado por um código de **2 bits** no eixo vertical e cada intervalo de amostragem é numerado ao longo do eixo horizontal.

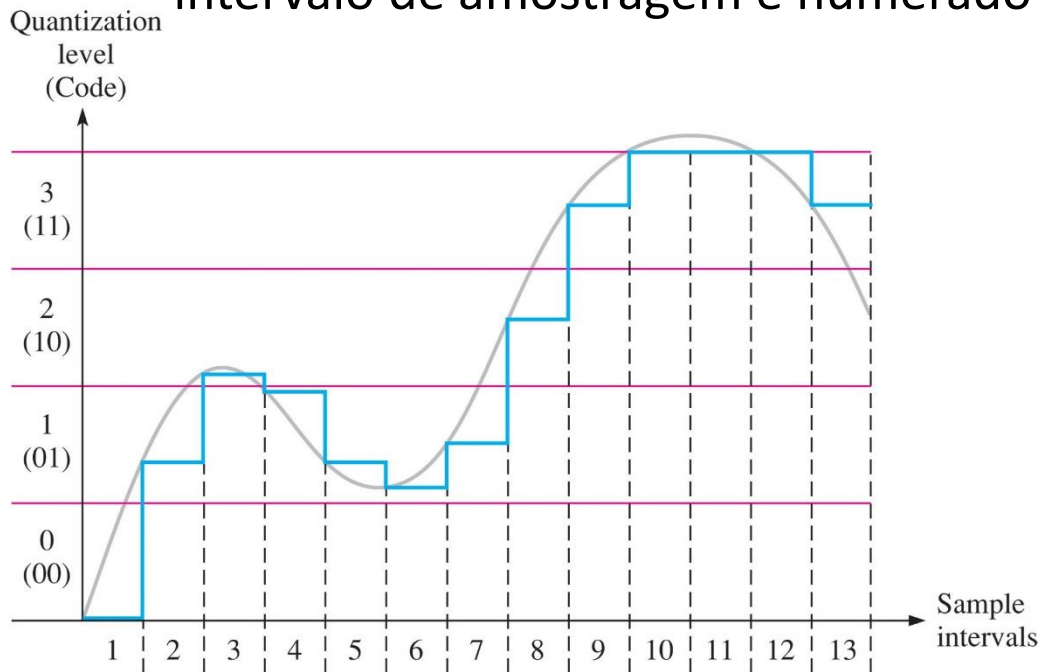


TABLE 12-1

Two-bit quantization for the waveform in Figure 12-7.

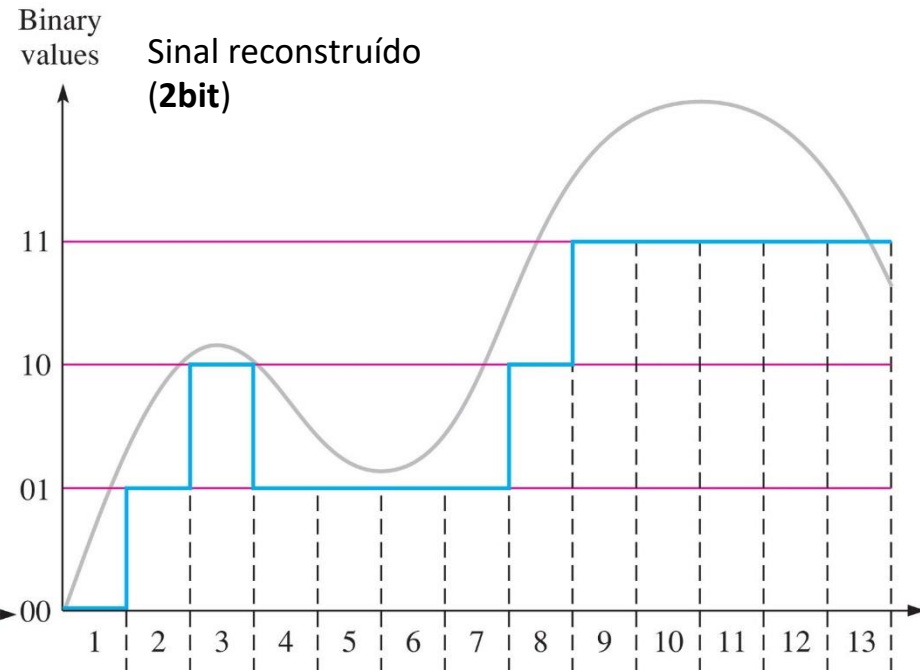
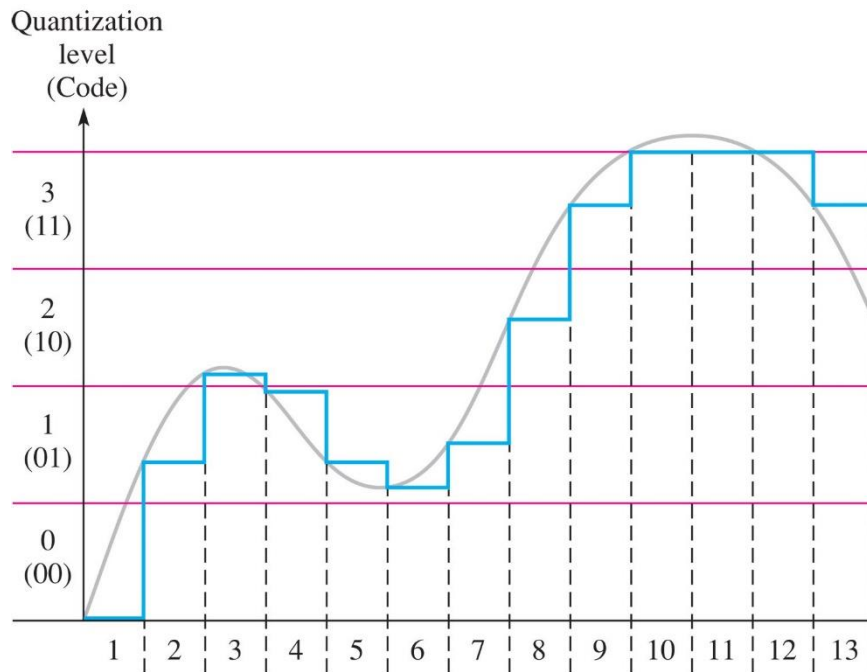
Sample Interval	Quantization Level	Code
1	0	00
2	1	01
3	2	10
4	1	01
5	1	01
6	1	01
7	1	01
8	2	10
9	3	11
10	3	11
11	3	11
12	3	11
13	3	11

Conversores A/D e D/A

• Aplicação Genérica e Definições:

Conversão D/A:

- Se os códigos digitais de 2 bits resultantes forem usados para reconstruir a forma de onda original, o que é feito pelos conversores digital-analógico (DACs), obteremos a forma de onda mostrada na Figura.

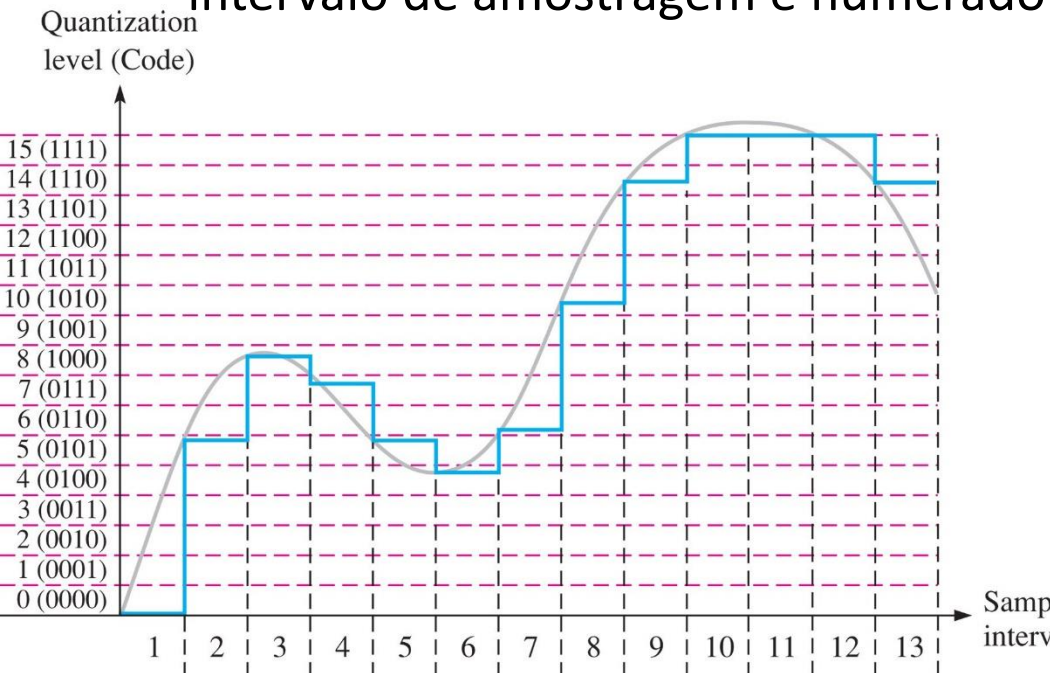


Conversores A/D e D/A

• Aplicação Genérica e Definições:

Conversão A/D:

- Vamos agora quantizar uma produção da forma de onda analógica em quatro níveis (0–15). Conforme mostra a Figura, são necessários dois bits. Observe que cada nível de quantização é agora representado por um código de **4 bits** no eixo vertical e cada intervalo de amostragem é numerado ao longo do eixo horizontal.



Determine o resultado da conversão A/D utilizando 4bits para cada intervalo de amostragem

Conversores A/D e D/A

• Aplicação Genérica e Definições:

Conversão A/D:

- Vamos agora quantizar uma produção da forma de onda analógica em quatro níveis (0–15). Conforme mostra a Figura, são necessários dois bits. Observe que cada nível de quantização é agora representado por um código de **4 bits** no eixo vertical e cada intervalo de amostragem é numerado ao longo do eixo horizontal.

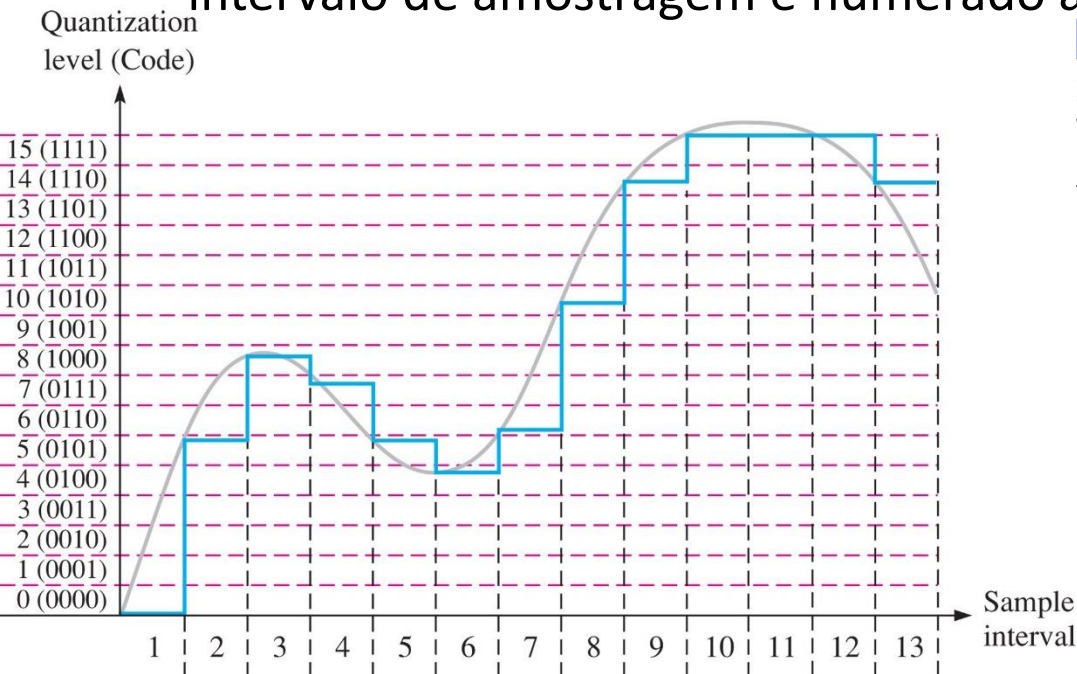


TABLE 12-2

Four-bit quantization for the waveform in Figure 12-9.

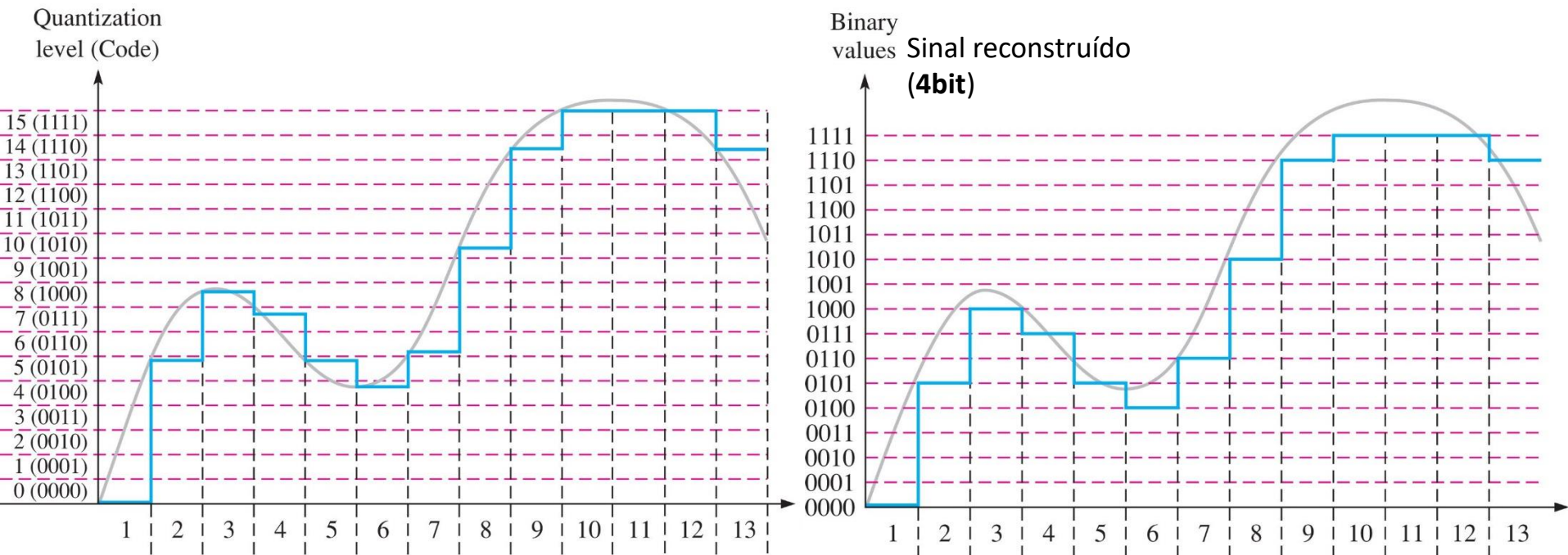
Sample Interval	Quantization Level	Code
1	0	0000
2	5	0101
3	8	1000
4	7	0111
5	5	0101
6	4	0100
7	6	0110
8	10	1010
9	14	1110
10	15	1111
11	15	1111
12	15	1111
13	14	1110

Conversores A/D e D/A

• Aplicação Genérica e Definições:

Conversão D/A:

- Se os códigos digitais de 4 bits resultantes forem usados para reconstruir a forma de onda original, o que é feito pelos conversores digital-analógico (DACs), obteremos a forma de onda mostrada na Figura.

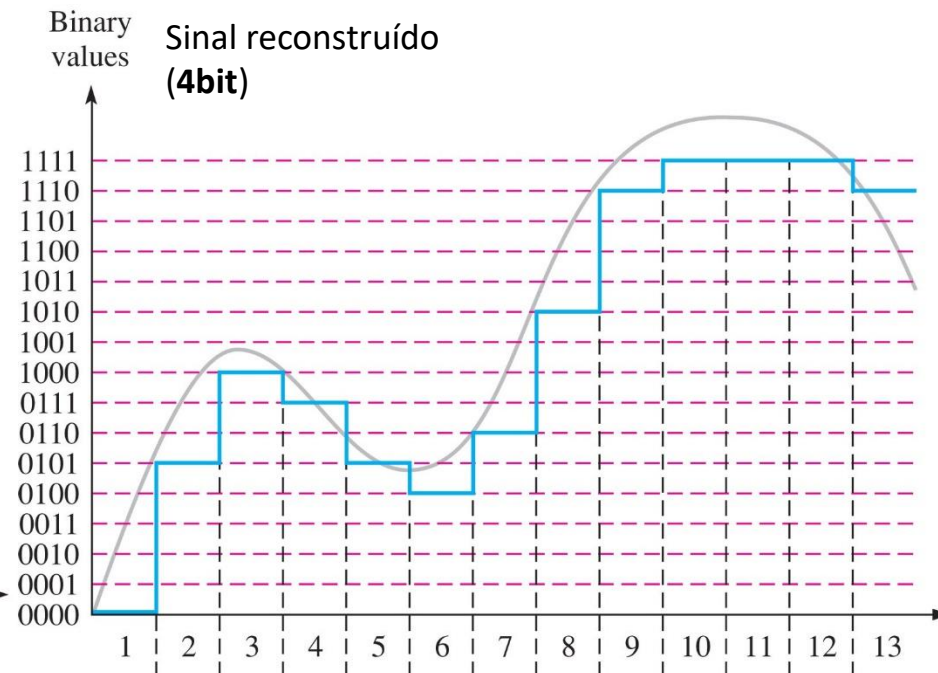
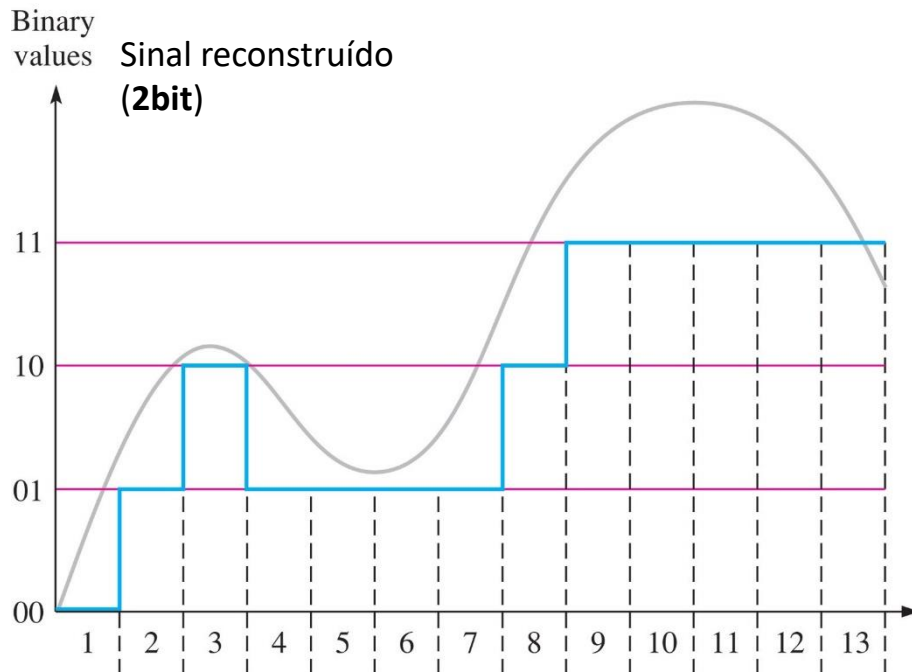


Conversores A/D e D/A

• Aplicação Genérica e Definições:

Efeito da quantização:

- Observe que a perda de informação é menor para o caso de maior resolução de quantização (**4bit**) do que quando utilizado **2bit** de resolução.

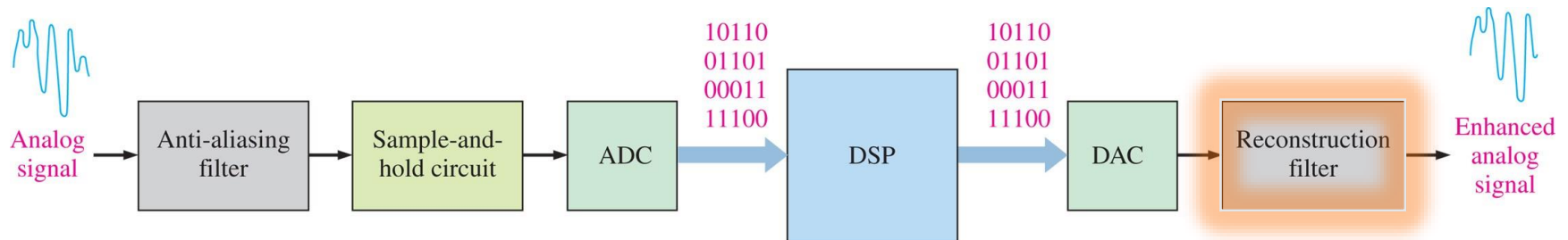


Conversores A/D e D/A

- **Aplicação Genérica e Definições:**

Processamento Digital de Sinais (DSP – *Digital Signal Processor*):

Diagrama completo de uma aplicação de processamento de sinais:

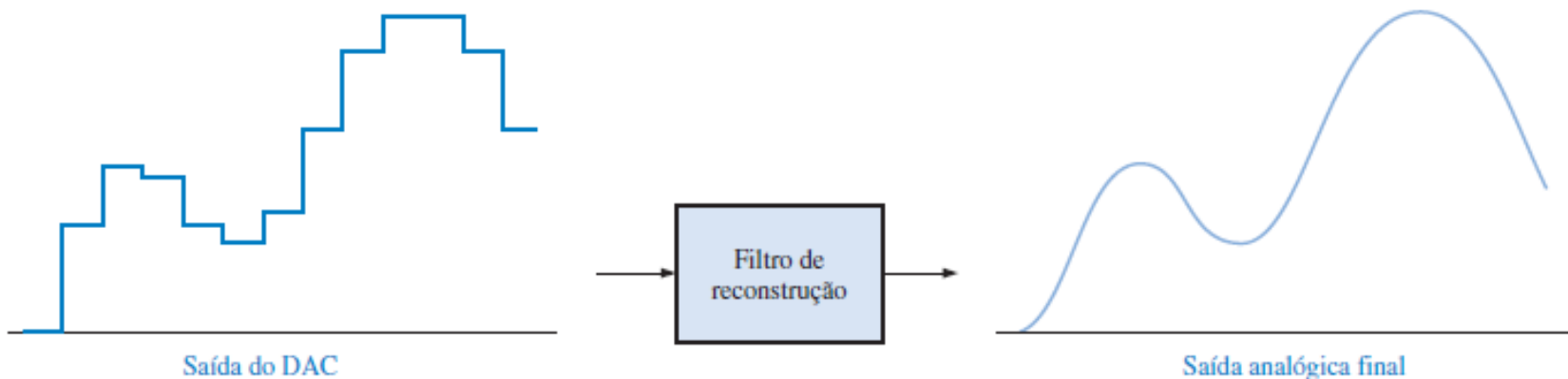


Conversores A/D e D/A

- **Aplicação Genérica e Definições:**

Filtro de Reconstrução:

A saída de um DAC é uma aproximação, na forma de uma “escada”, do sinal analógico original após ser processado por um DSP. A finalidade do filtro de reconstrução passa-baixas (algumas vezes denominado de pós-filtro) é para “suavizar” a saída do DAC eliminando o conteúdo de alta frequência que resulta das transições dos “degraus da escada”, como aproximadamente ilustrado na Figura.



Conversores A/D e D/A

- **Exercício:**

Refaça os passos de amostragem, retenção, conversão e reconstrução de um sinal triangular de 1kHz utilizando as seguintes especificações:

Teste A:

- Amostragem em 1.5kHz e resolução de 4 bits
- Amostragem em 2kHz e resolução de 4 bits
- Amostragem em 10kHz e resolução de 4 bits

Teste B:

- Amostragem em 10kHz e resolução de 2 bits
- Amostragem em 10kHz e resolução de 3 bits
- Amostragem em 10kHz e resolução de 4 bits

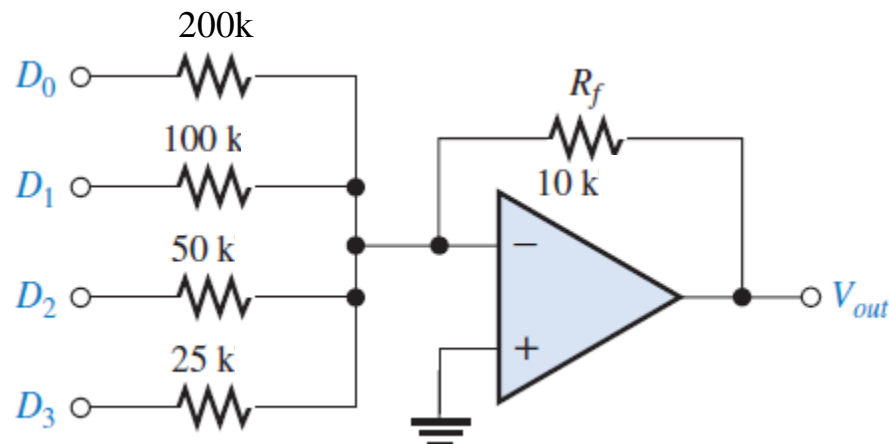
Analise os dados obtidos e indique as conclusões possíveis para cada um dos testes quanto a operação dos conversores A/D e D/A.

Conversores A/D e D/A

- **Circuito DAC: Conversor Digital Analógico**

Entrada Ponderada:

- Um método de conversão digital-analógico usa um circuito de resistores com valores de resistências que representam os pesos binários dos bits de entrada do código digital.

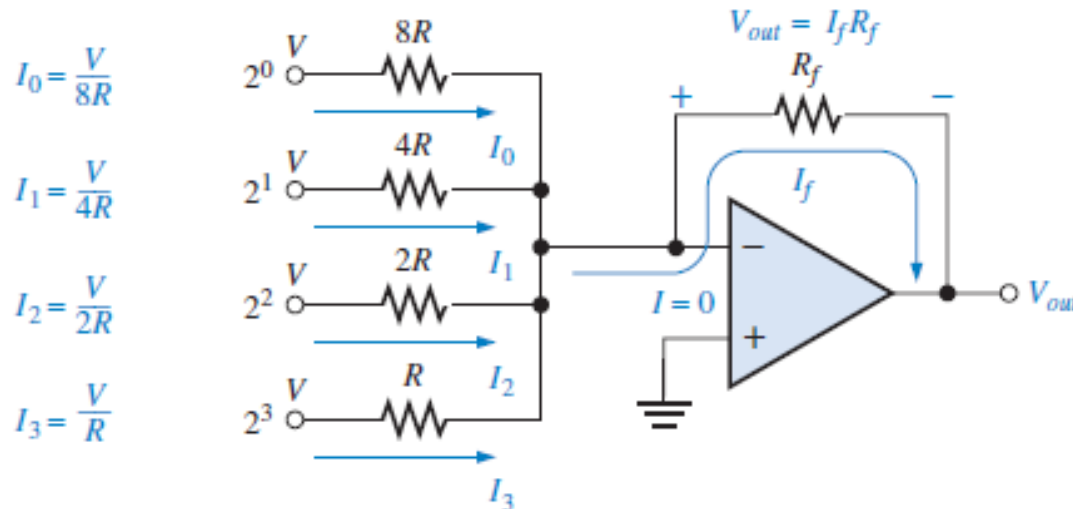


Conversores A/D e D/A

• Circuito DAC: Conversor Digital Analógico

Entrada Ponderada:

- Como praticamente não existe corrente na entrada inversora (–) do amp-op, todas as correntes de entrada se somam e passam no resistor R_f . Como a entrada inversora é 0 V (terra virtual), a queda de tensão em R_f é igual à tensão de saída, assim $V_{out} = I_f R_f$.

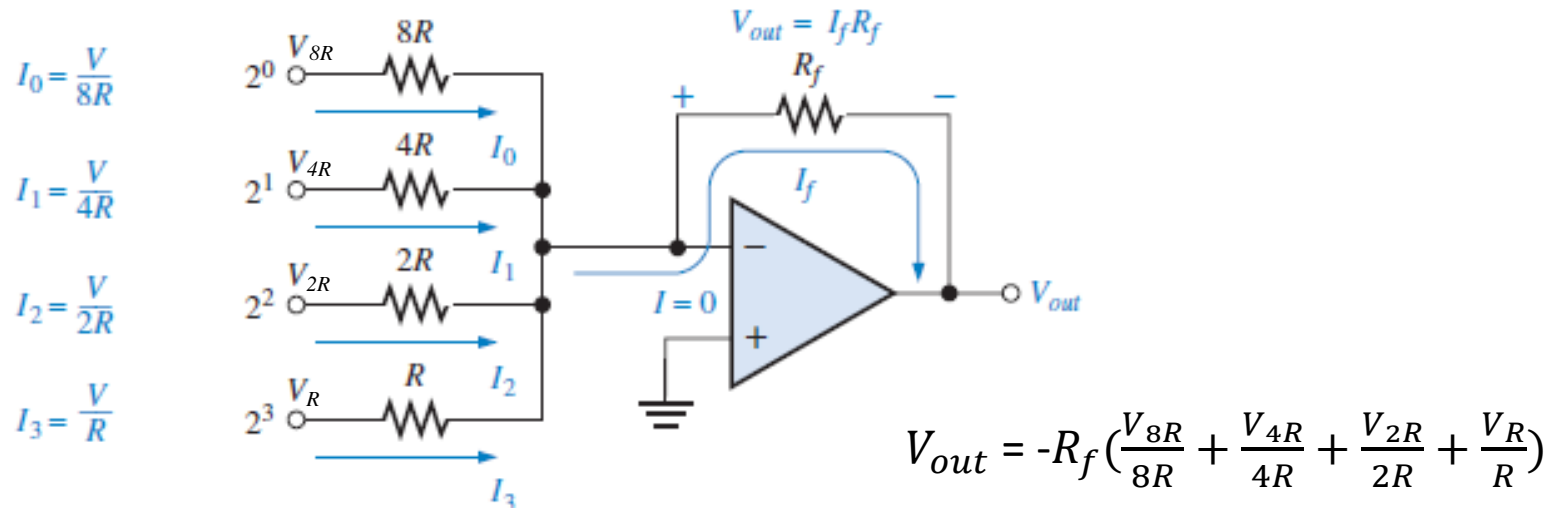


Conversores A/D e D/A

• Circuito DAC: Conversor Digital Analógico

Entrada Ponderada:

- Como praticamente não existe corrente na entrada inversora (–) do amp-op, todas as correntes de entrada se somam e passam no resistor R_f . Como a entrada inversora é 0 V (terra virtual), a queda de tensão em R_f é igual à tensão de saída, assim $V_{out} = I_f R_f$.

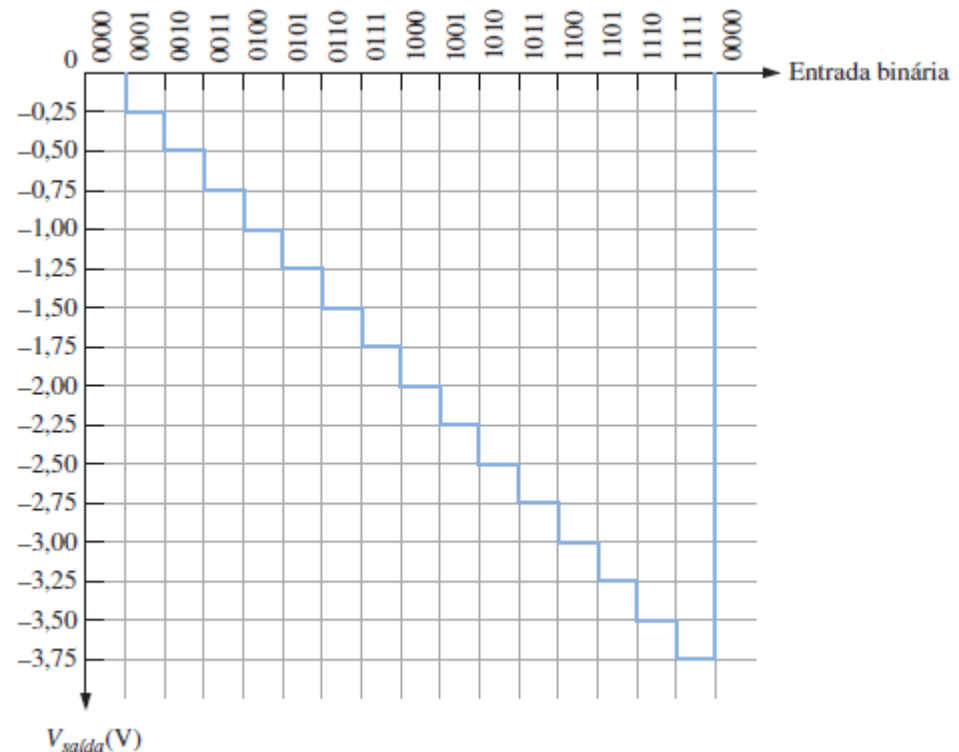
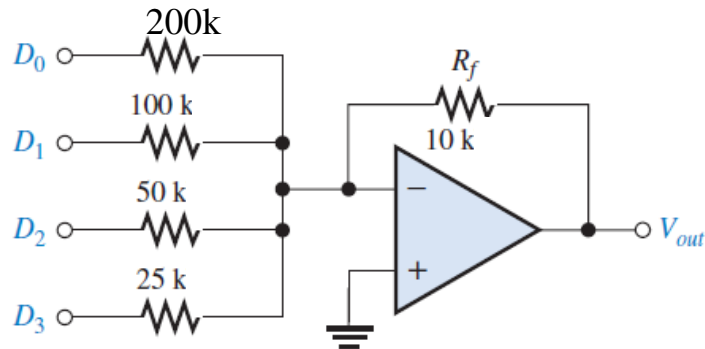


Conversores A/D e D/A

• Circuito DAC: Conversor Digital Analógico

Entrada Ponderada:

Exercício: Determine a saída do DAC mostrado na Figura 13–37(a) se as formas de onda que representam a sequência de números de 4bits são aplicadas às entradas. A entrada D_0 é o bit menos significativo (LSB).



Conversores A/D e D/A

- **Circuito DAC: Conversor Digital Analógico**

Entrada Ponderada:

- *Desvantagem:* As desvantagens desse tipo de DAC são o número de valores de resistores diferentes e o fato de que os níveis de tensão têm que ser exatamente o mesmo para todas as entradas.

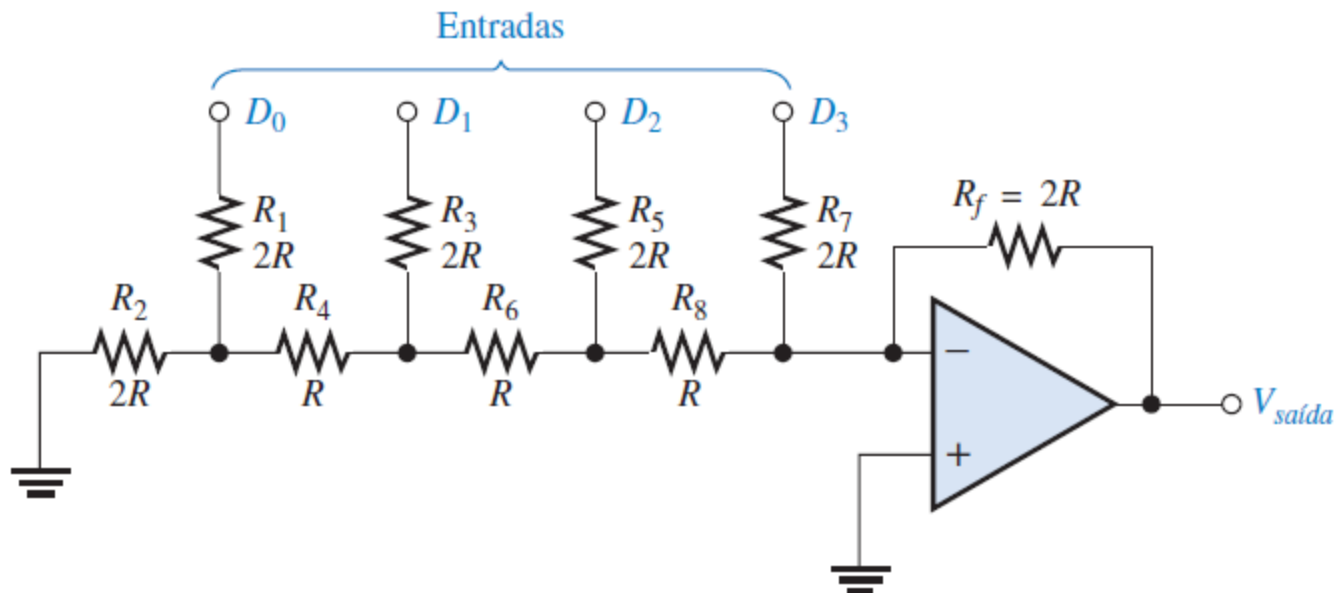
Exemplo: um conversor de 8 bits necessita de oito resistores, com valores que variam de R a $128R$ em degraus ponderados em binário. Essa faixa de resistores requer tolerâncias de uma parte em 255 (menos de 0,5%) para converter com precisão a entrada, o que torna esse tipo de DAC muito difícil de produzir em escala.

Conversores A/D e D/A

- Circuito DAC: Conversor Digital Analógico**

Escada R/2R:

- Esse tipo de circuito supera o problema do DAC com entrada binária ponderada, pois requer apenas dois valores de resistores.

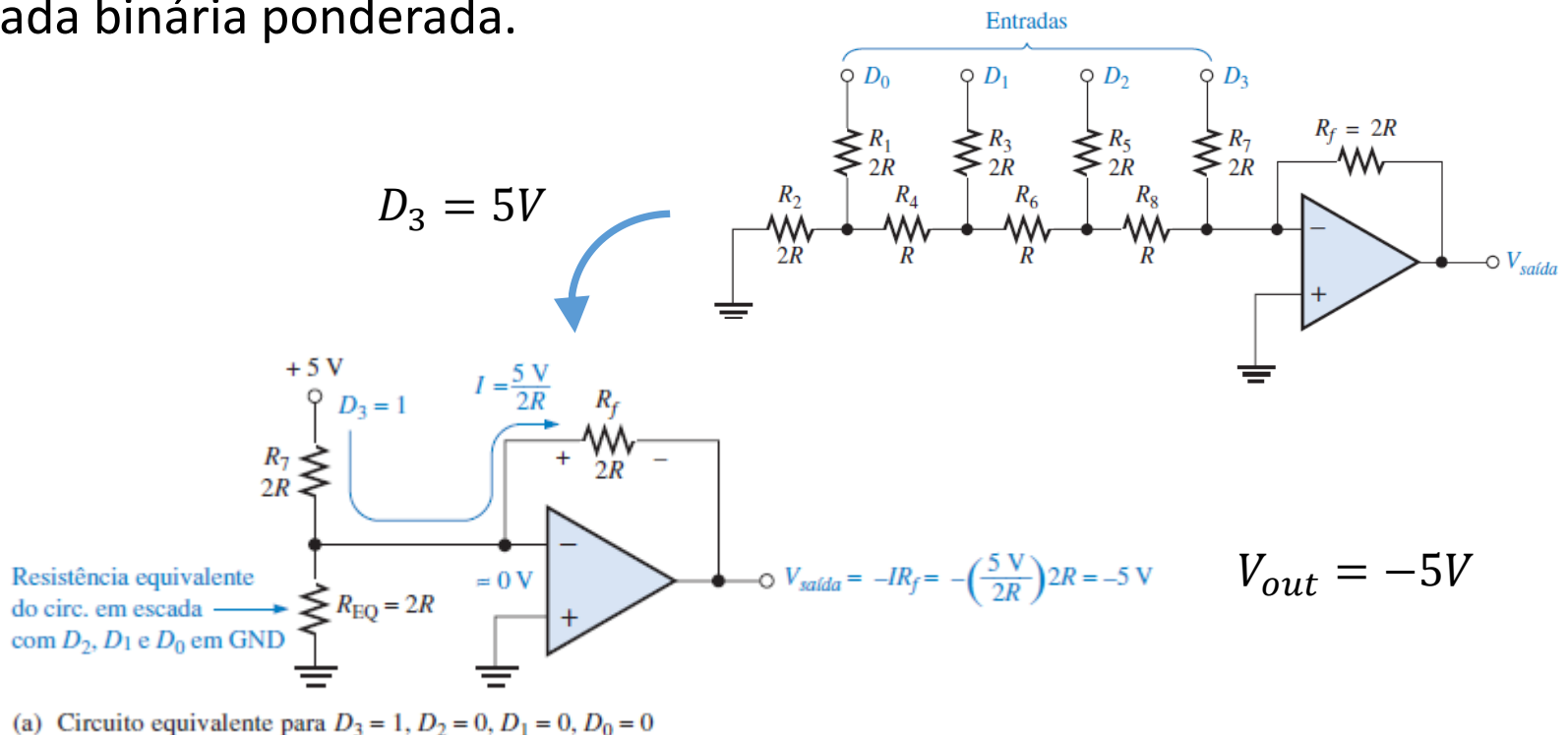


Conversores A/D e D/A

• Circuito DAC: Conversor Digital Analógico

Escada R/2R:

- Esse tipo de circuito supera o problema do DAC com entrada binária ponderada, pois requer apenas dois valores de resistores.
- Apresenta a mesma equação para a tensão de saída que o DAC com entrada binária ponderada.

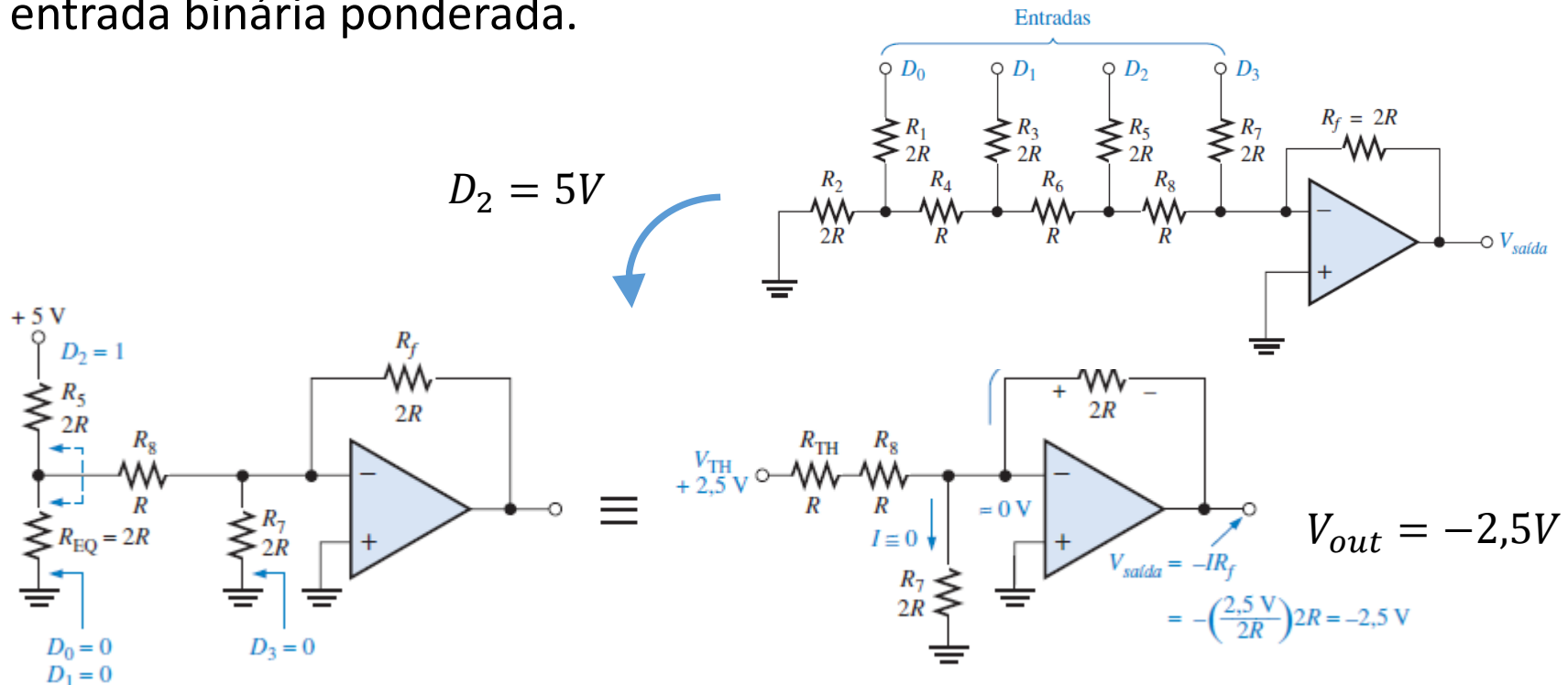


Conversores A/D e D/A

• Circuito DAC: Conversor Digital Analógico

Escada R/2R:

- Esse tipo de circuito supera o problema do DAC com entrada binária ponderada, pois requer apenas dois valores de resistores.
- Apresenta a mesma equação para a tensão de saída que o DAC com entrada binária ponderada.

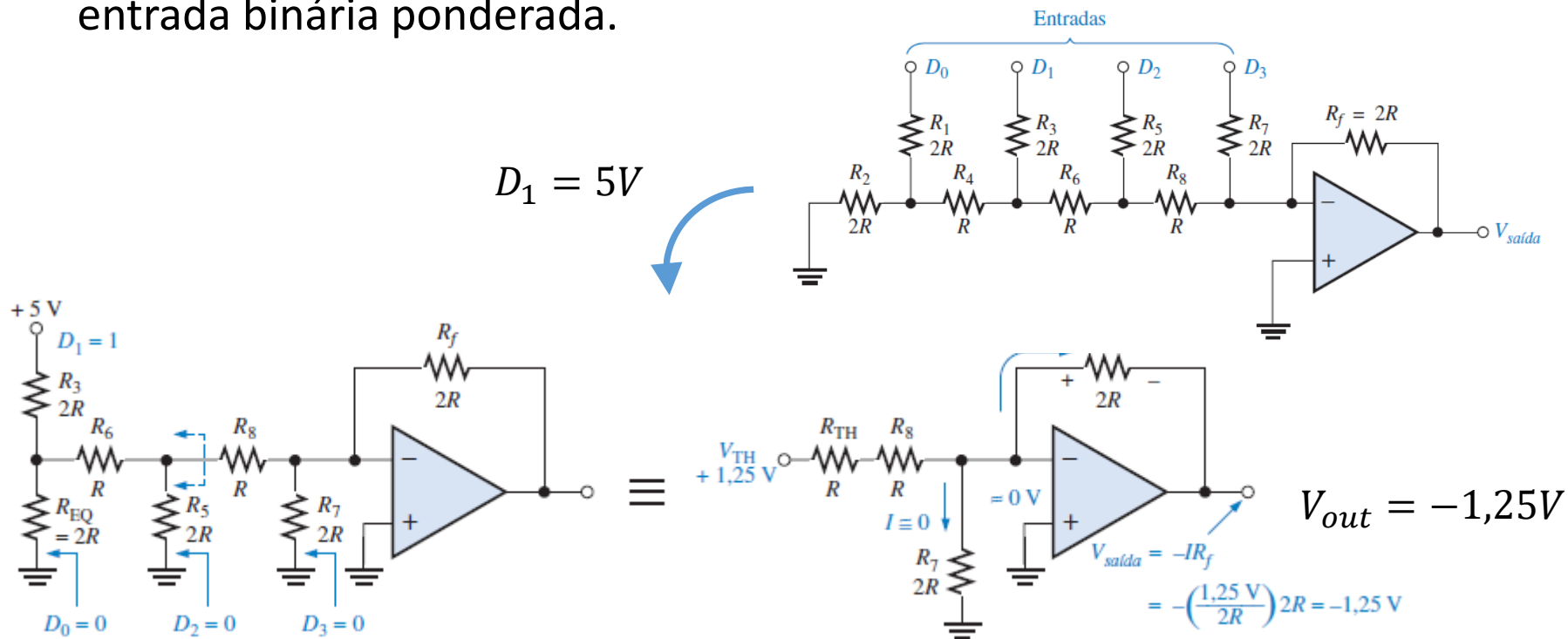


Conversores A/D e D/A

• Circuito DAC: Conversor Digital Analógico

Escada R/2R:

- Esse tipo de circuito supera o problema do DAC com entrada binária ponderada, pois requer apenas dois valores de resistores.
- Apresenta a mesma equação para a tensão de saída que o DAC com entrada binária ponderada.

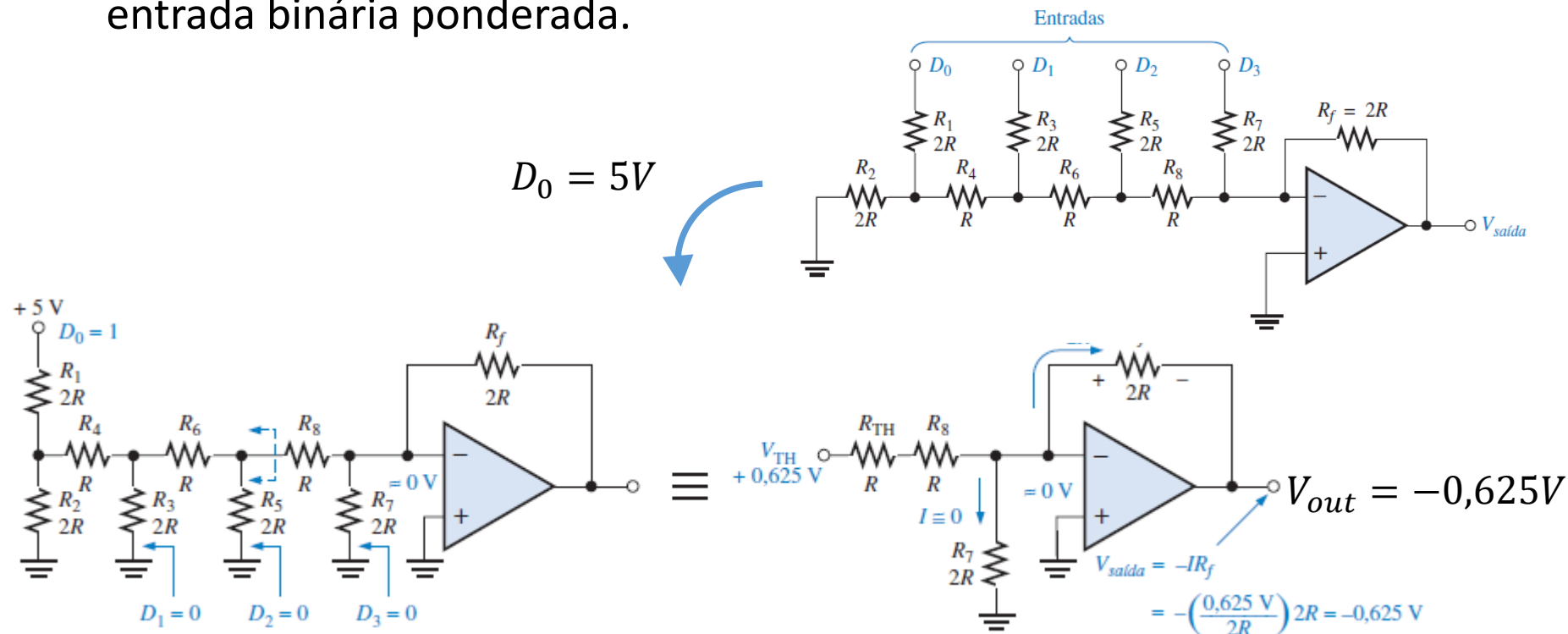


Conversores A/D e D/A

• Circuito DAC: Conversor Digital Analógico

Escada R/2R:

- Esse tipo de circuito supera o problema do DAC com entrada binária ponderada, pois requer apenas dois valores de resistores.
- Apresenta a mesma equação para a tensão de saída que o DAC com entrada binária ponderada.

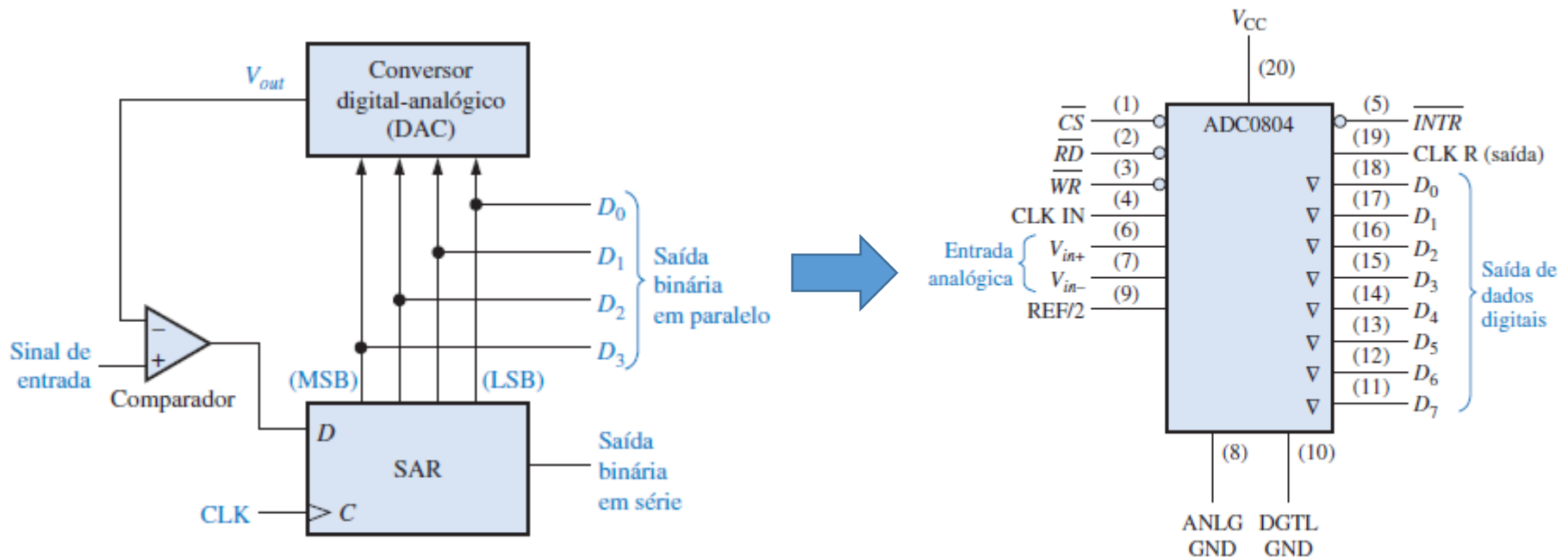


Conversores A/D e D/A

• Circuito ADC: Conversor Analógico Digital

Aproximação Sucessiva:

- Esse método apresenta uma conversão em um tempo de conversão fixo que é o mesmo para qualquer valor de tensão analógica de entrada;
- Ele consiste de um DAC, um registrador de aproximação sucessiva (SAR) e um comparador;
- O CI ADC0804 é um exemplo de um ADC de aproximação sucessiva.

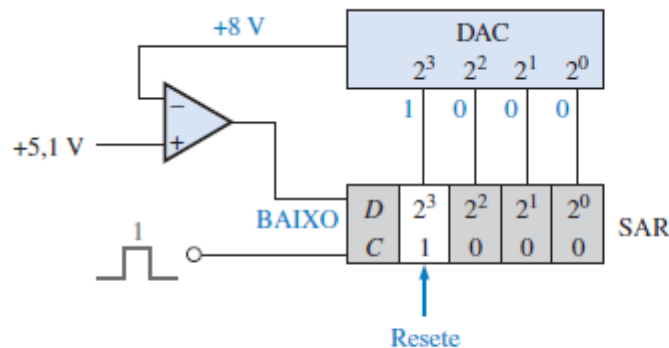


Conversores A/D e D/A

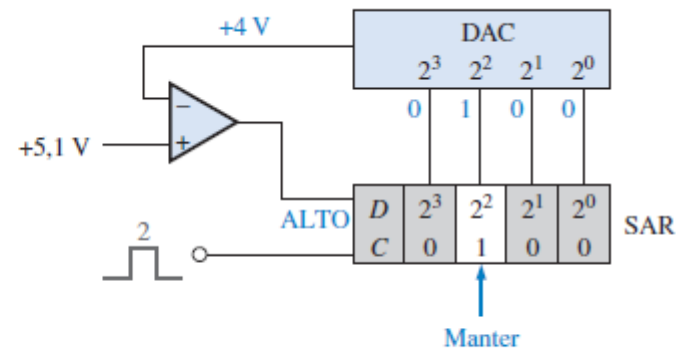
• Circuito ADC: Conversor Analógico Digital

Aproximação Sucessiva:

- A operação básica é a seguinte: Os bits de entrada do DAC são habilitados (feitos iguais a 1) um de cada vez, começando com o bit mais significativo (MSB). Conforme cada bit é habilitado, o comparador produz uma saída que indica se a tensão do sinal de entrada é maior ou menor que a saída do DAC.



(a) Teste do MSB



(b) Teste do bit 2^2

Conversores A/D e D/A

- **Circuito ADC: Conversor Analógico Digital**

Aproximação Sucessiva:

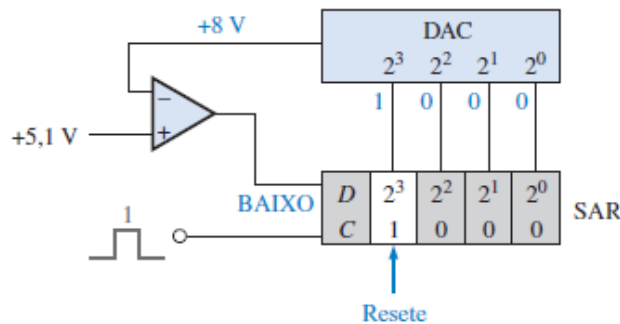
- A operação básica é a seguinte:
 - Os bits de entrada do DAC são habilitados (feitos iguais a 1) um de cada vez, começando com o bit mais significativo (MSB). Conforme cada bit é habilitado, o comparador produz uma saída que indica se a tensão do sinal de entrada é maior ou menor que a saída do DAC.
 - Se a saída do DAC for maior que o sinal de entrada, a saída do comparador será nível BAIXO, fazendo com que o bit no registrador seja resetado. Se a saída for menor que o sinal de entrada, o bit 1 é mantido no registrador.
 - O sistema faz isso primeiro com o MSB, e em seguida com o próximo bit mais significativo, depois o próximo e assim por diante. Após todos os bits do DAC serem testados, o ciclo de conversão estará completo.

Conversores A/D e D/A

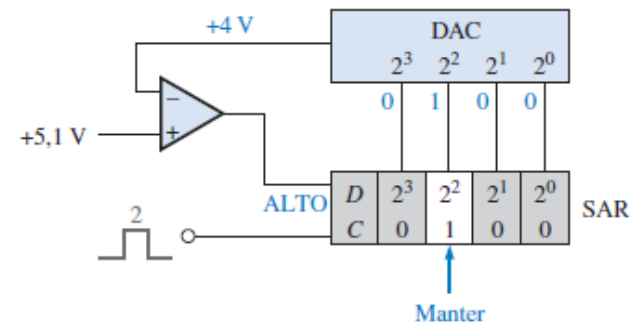
• Circuito ADC: Conversor Analógico Digital

Aproximação Sucessiva:

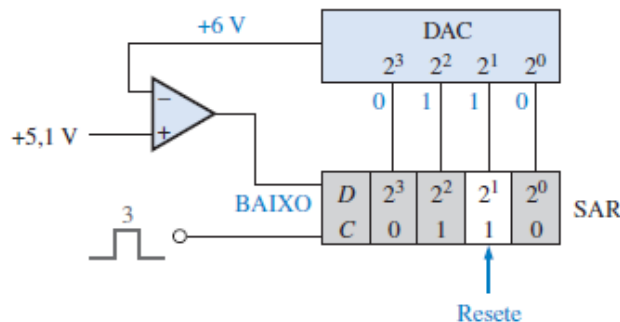
- Exemplo para 4bit, considerando tensão máxima na entrada do A/D (V_{MAX}) em 16V, para uma tensão de entrada $V_{IN} = 5,1V$



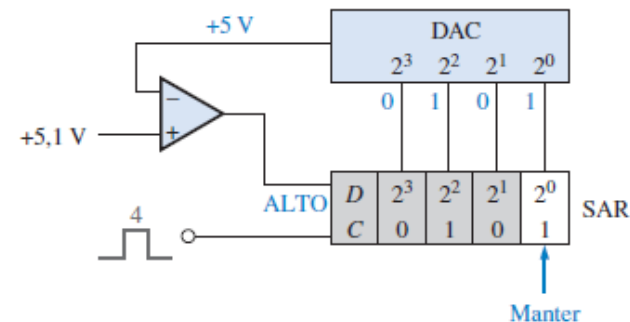
(a) Teste do MSB



(b) Teste do bit 2²



(c) Teste do bit 2¹



(d) Teste do bit 2⁰

Conversores A/D e D/A

- **Circuito ADC: Conversor Analógico Digital**

Aproximação Sucessiva:

- Exercício:

Repita passo a passo a conversão A/D utilizando aproximação sucessiva em 4bit e tensão $V_{MAX} = 16V$, para uma tensão na entrada $V_{IN} = 9,1V$ e responda: Qual o resultado da conversão A/D?