



# Conversores A/D e D/A

Walter Fetter Lages

w.fetter@ieee.org

Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Escola de Engenharia

Departamento de Engenharia Elétrica

ENG04037 Sistemas de Controle Digital



# Introdução

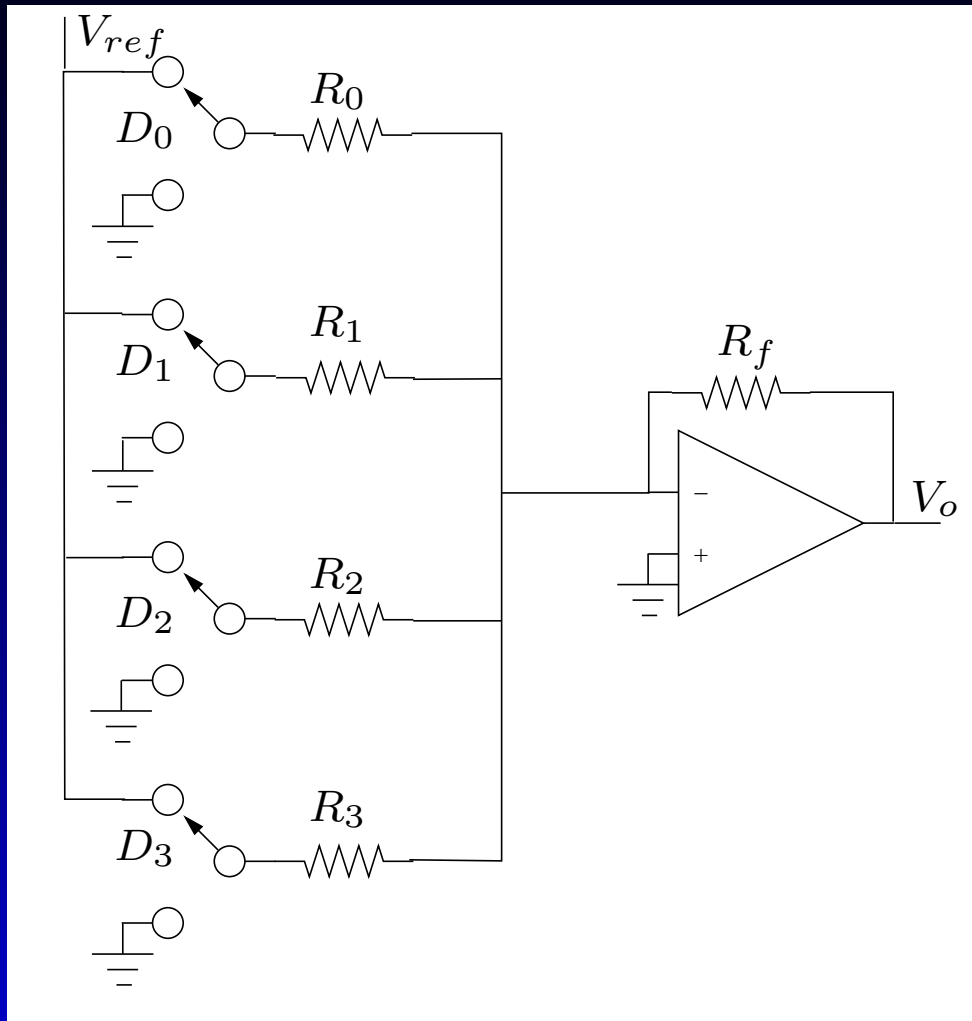
- Em geral conversores A/D são implementados utilizando-se conversores D/A
- Conversores D/A usualmente são rápidos
- Conversores A/D usualmente são lentos



# Conversores D/A

- Tipicamente, o D/A possui um segurador de ordem zero
  - Existe um *latch* na entrada do D/A
- Conversor com resistores ponderados
- Conversor com malha R-2R (multiplicativo)
- Conversor por modulação de largura de pulso (PWM)

# Resistores Ponderados



$$R_0 = \frac{R}{2^0} = R$$

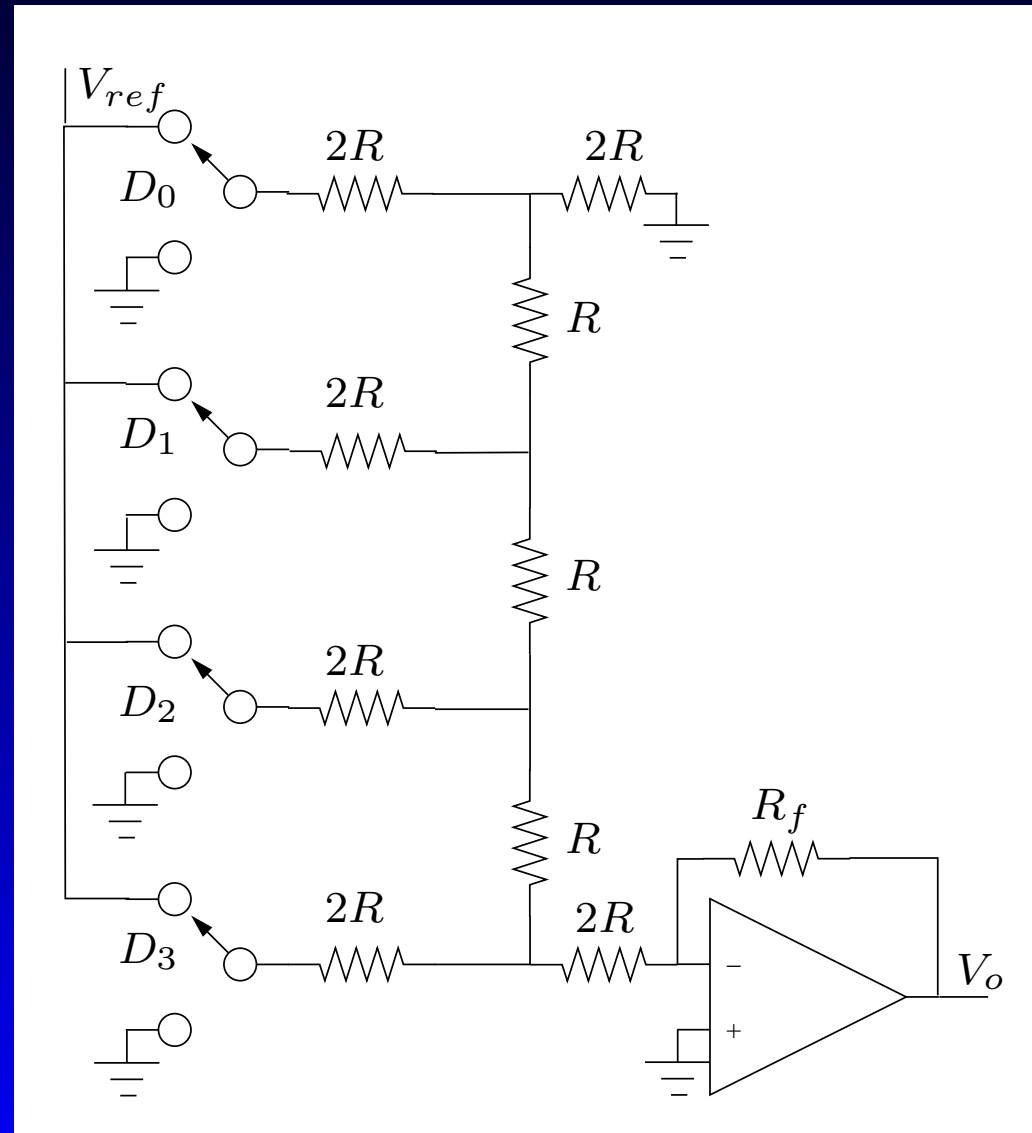
$$R_1 = \frac{R}{2^1} = \frac{R}{2}$$

$$R_2 = \frac{R}{2^2} = \frac{R}{4}$$

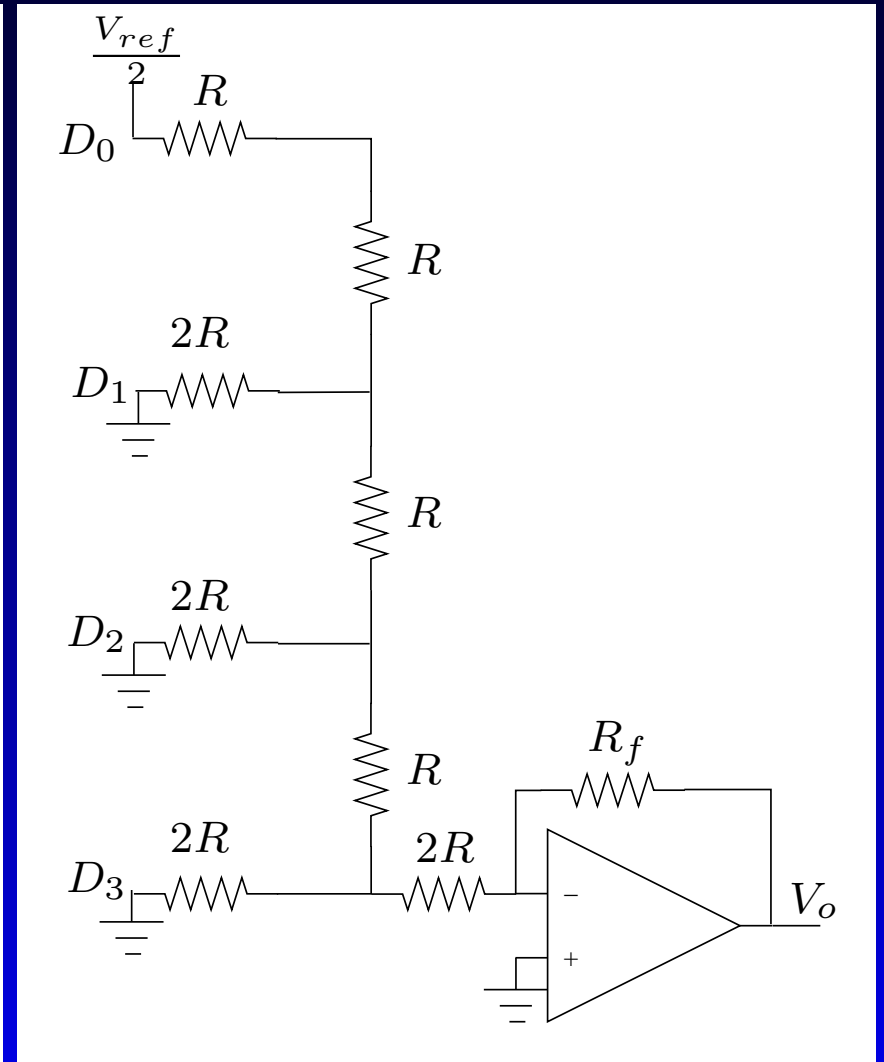
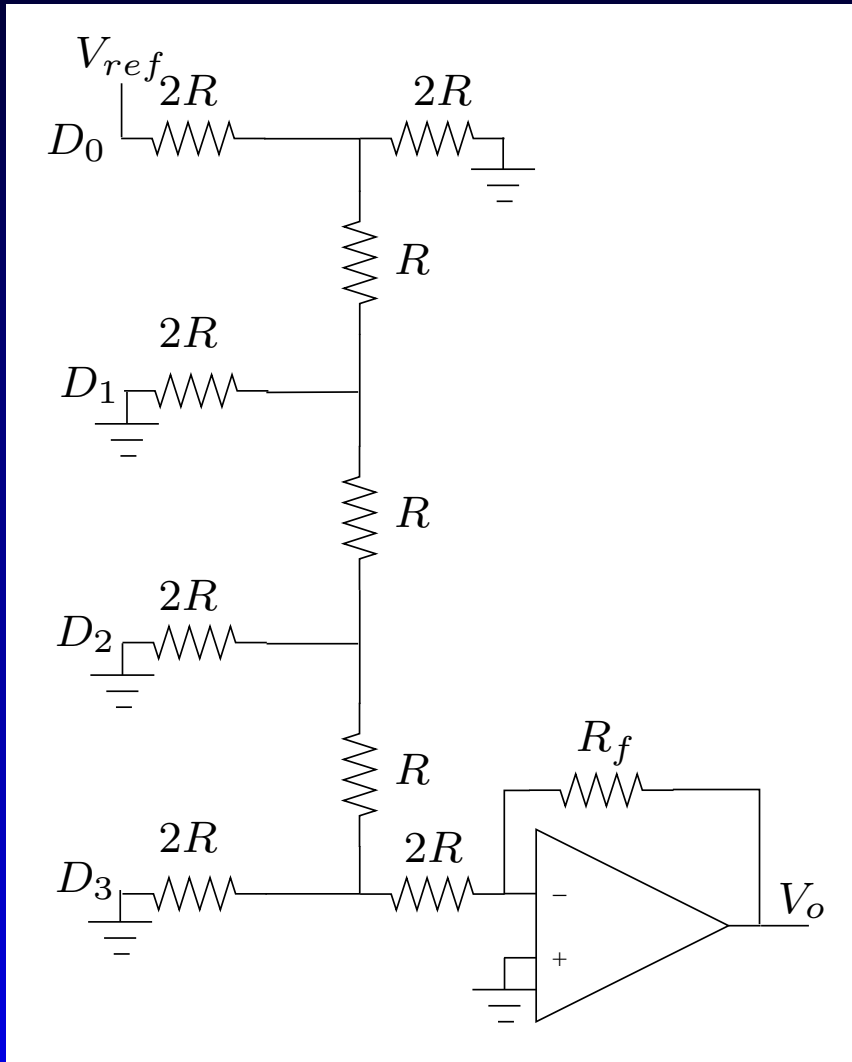
$$R_3 = \frac{R}{2^3} = \frac{R}{8}$$

$$V_o = -\frac{R_f V_{ref}}{R} (2^3 D_3 + 2^2 D_2 + 2^1 D_1 + 2^0 D_0)$$

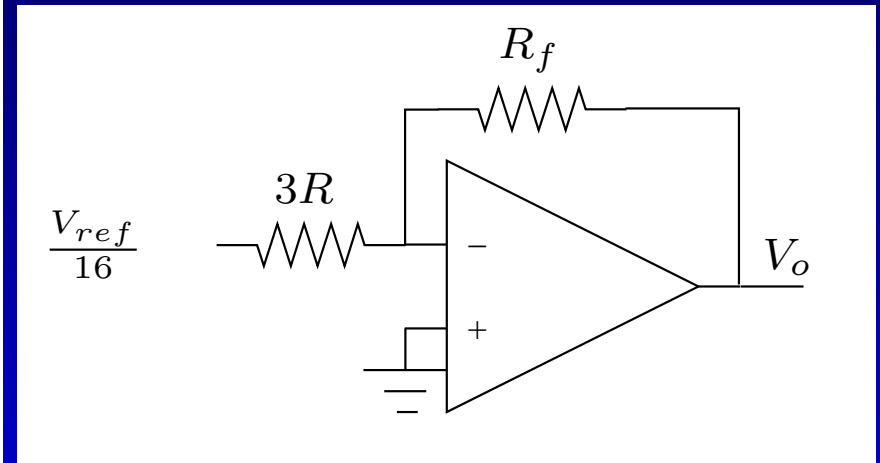
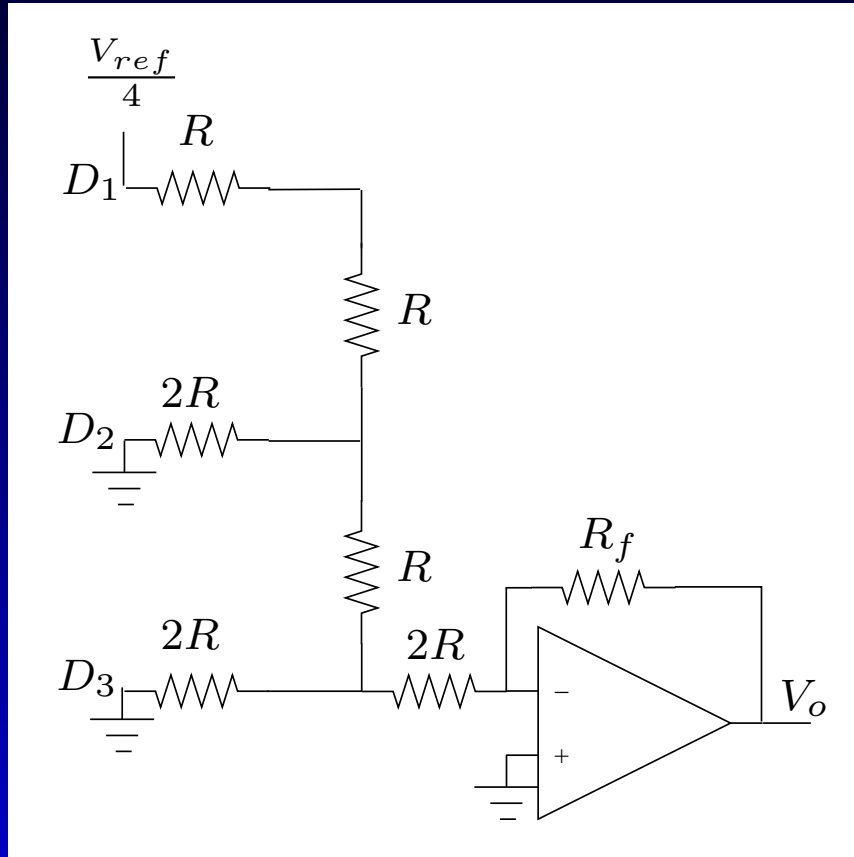
# Conversor com Malha R-2R



$$D_0 = 1D_1 = 0D_2 = 0D_3 = 0$$

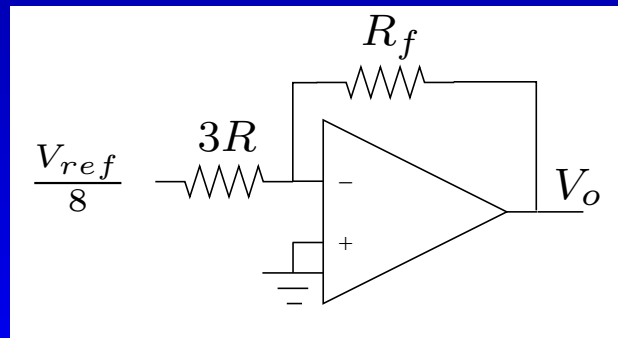
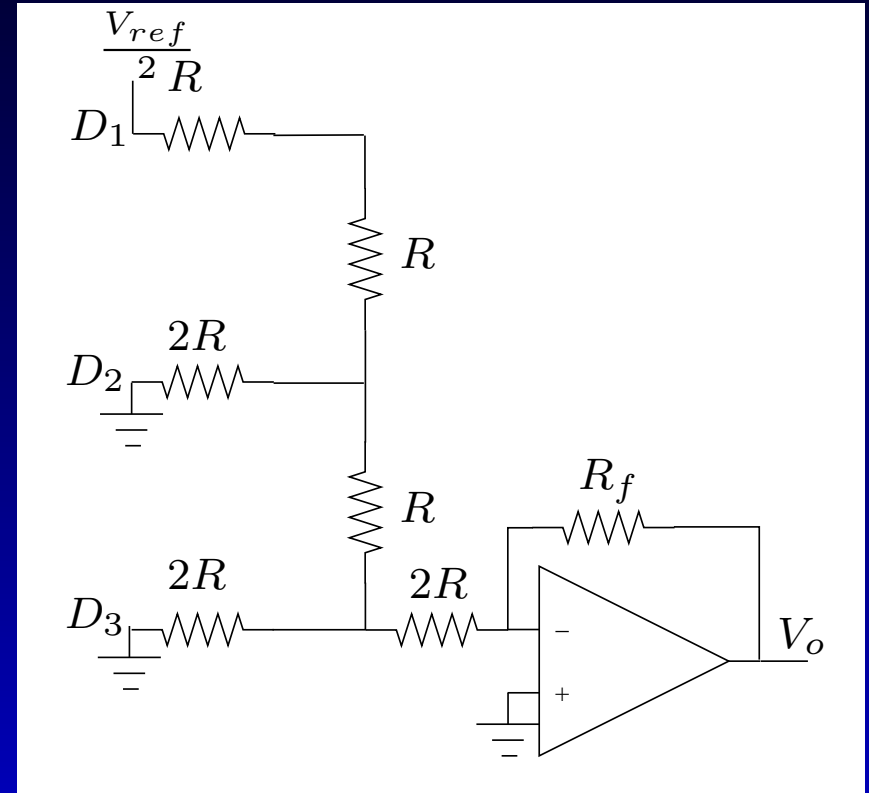
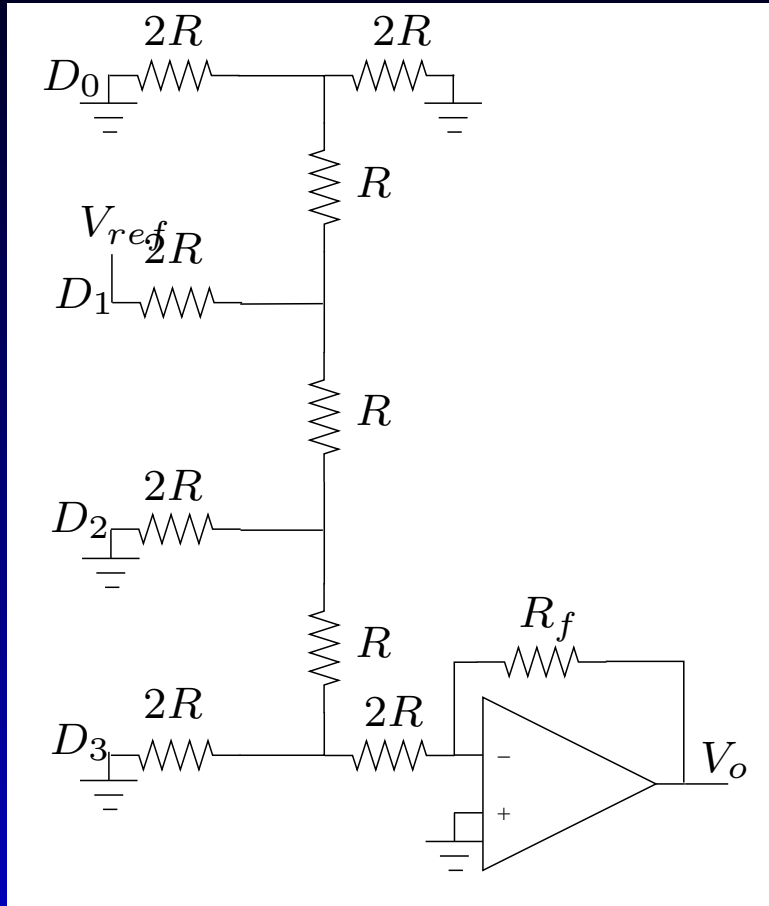


$$D_0 = 1D_1 = 0D_2 = 0D_3 = 0$$





$$D_0 = 0 \quad D_1 = 1 \quad D_2 = 0 \quad D_3 = 0$$





# Conversor com Malha R-2R

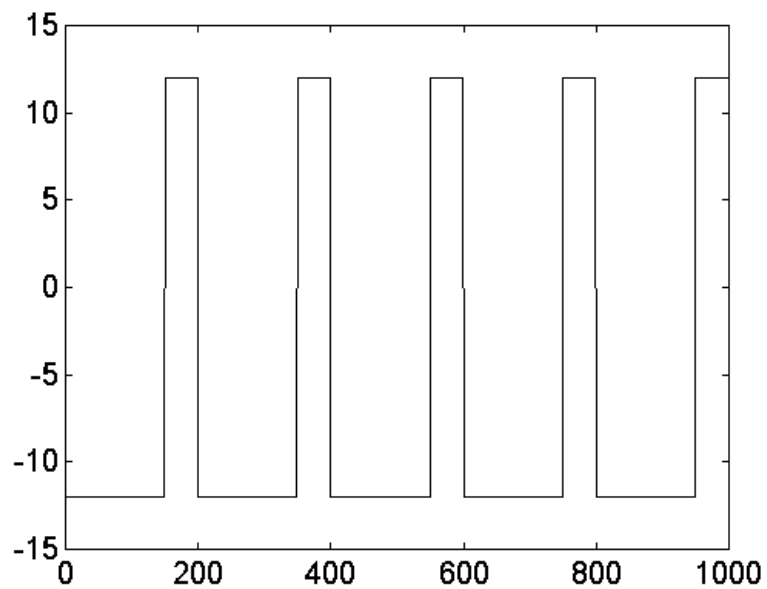
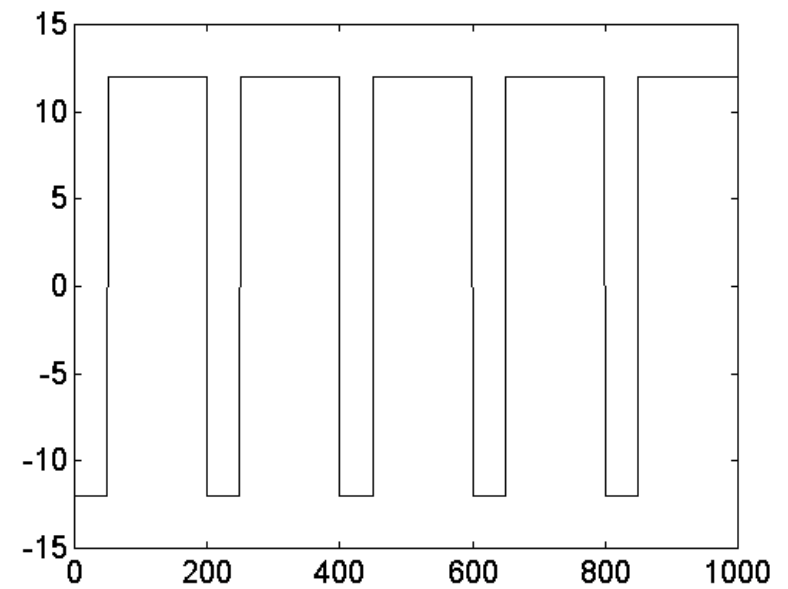
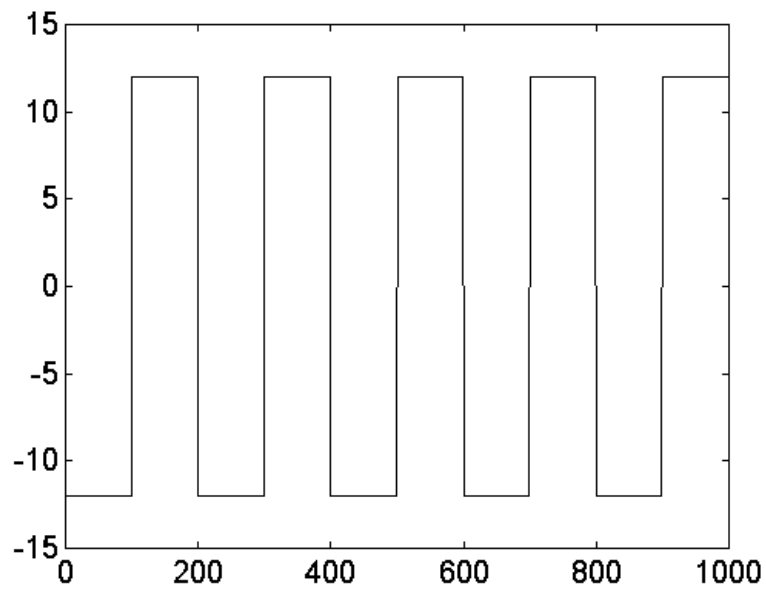


$$V_o = \frac{-R_f V_{ref}}{3R} \left( \frac{D_3}{2^1} + \frac{D_2}{2^2} + \frac{D_1}{2^3} + \frac{D_0}{2^4} \right)$$

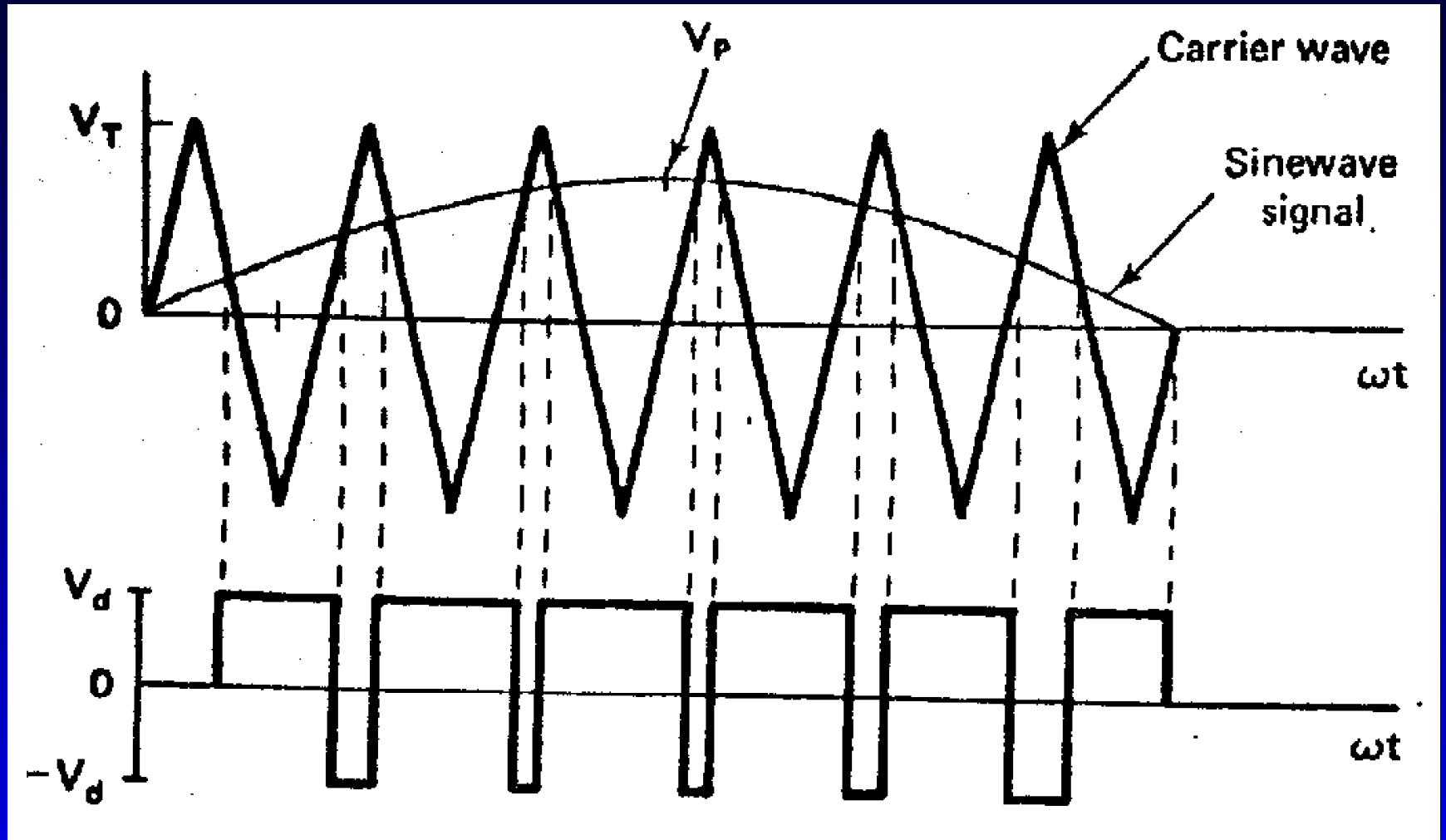
$$V_o = \frac{-R_f V_{ref}}{48R} (2^3 D_3 + 2^2 D_2 + 2^1 D_1 + 2^0 D_0)$$



# *Pulse Width Modulation*

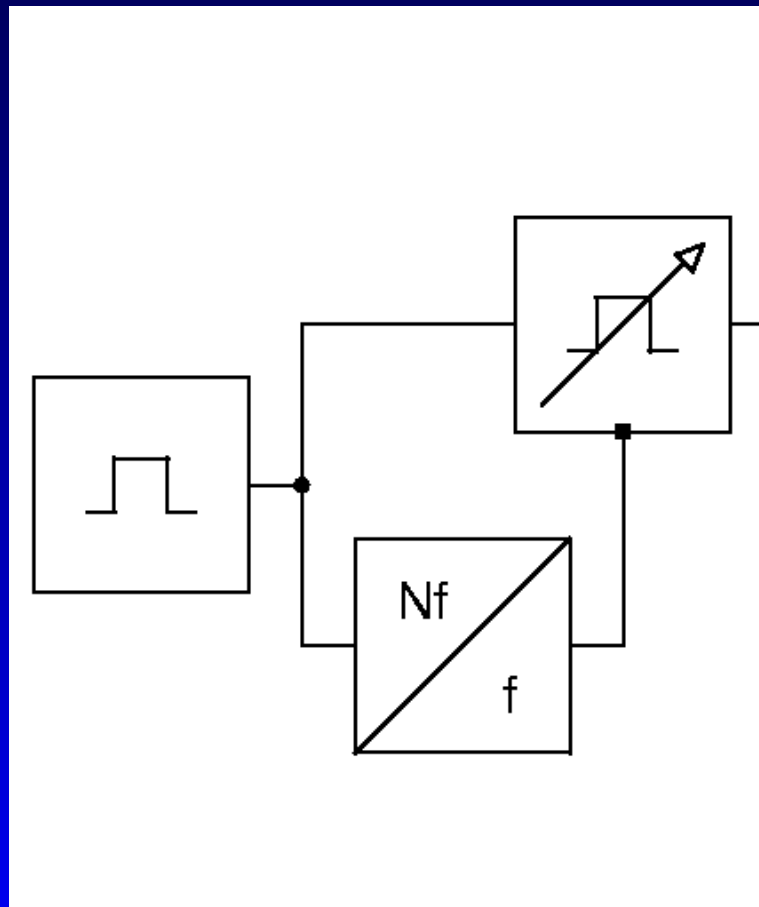


# Modulador PWM Analógico

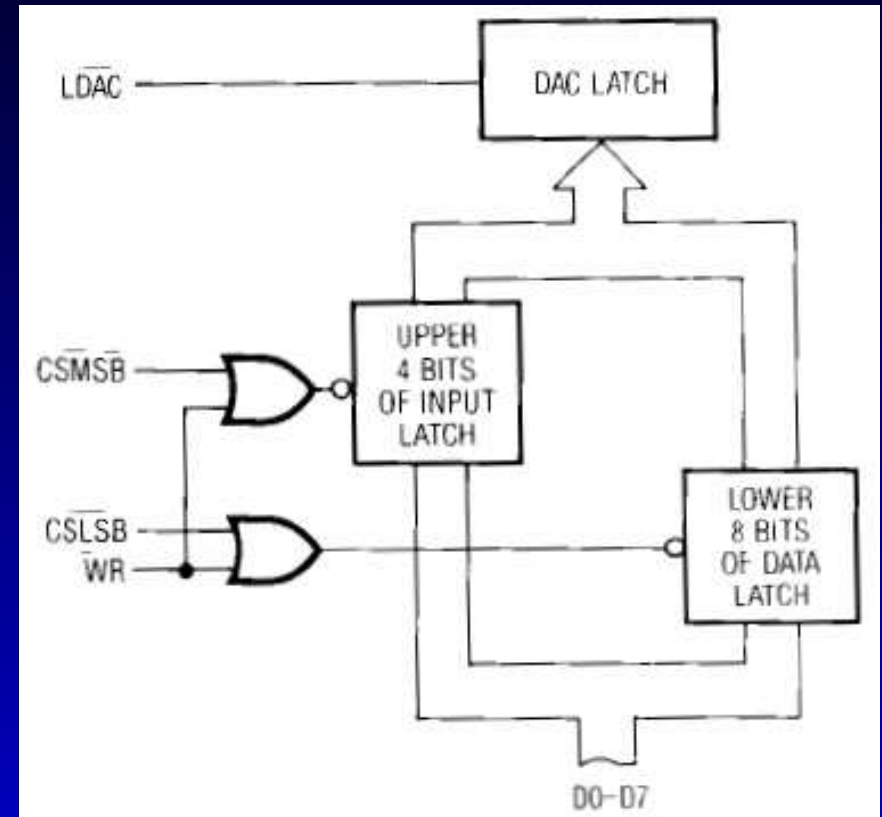
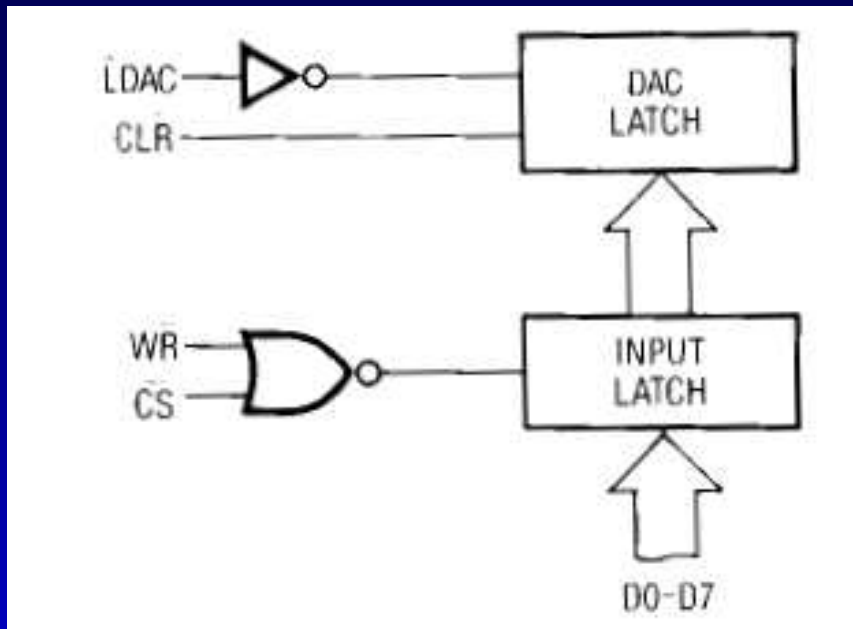


# PWM Digital

- Implementação totalmente digital
- Frequência do PWM pode ser programada



# Interface





# Conversores D/A

- O problema mais importante individualmente em sistemas de controle digital é o atraso associado ao D/A
- Ocorre devido à saída do D/A ser mantida constante entre instantes de amostragem
- Causa um atraso no sinal de  $T_s/2$
- Esta variação de fase pode ser significativa e ter implicações na estabilidade
  - É bastante significativa na frequência de Nyquist ( $90^\circ$ )
  - Para que o efeito da amostragem possa ser desprezado, é necessário utilizar uma frequência de amostragem bem maior do que a frequência de Nyquist



# Conversores A/D

- Conversores A/D são tipicamente precedidos por um *sample & hold*
- Operações realizadas pelos conversores A/D
  - Amostragem
    - Converte o sinal contínuo no tempo em discreto no tempo
  - Quantização
    - Converte o sinal contínuo em tensão em discreto em tensão
    - Usualmente em automação se utiliza quantização uniforme
  - Codificação
    - Gera o código que representa o sinal

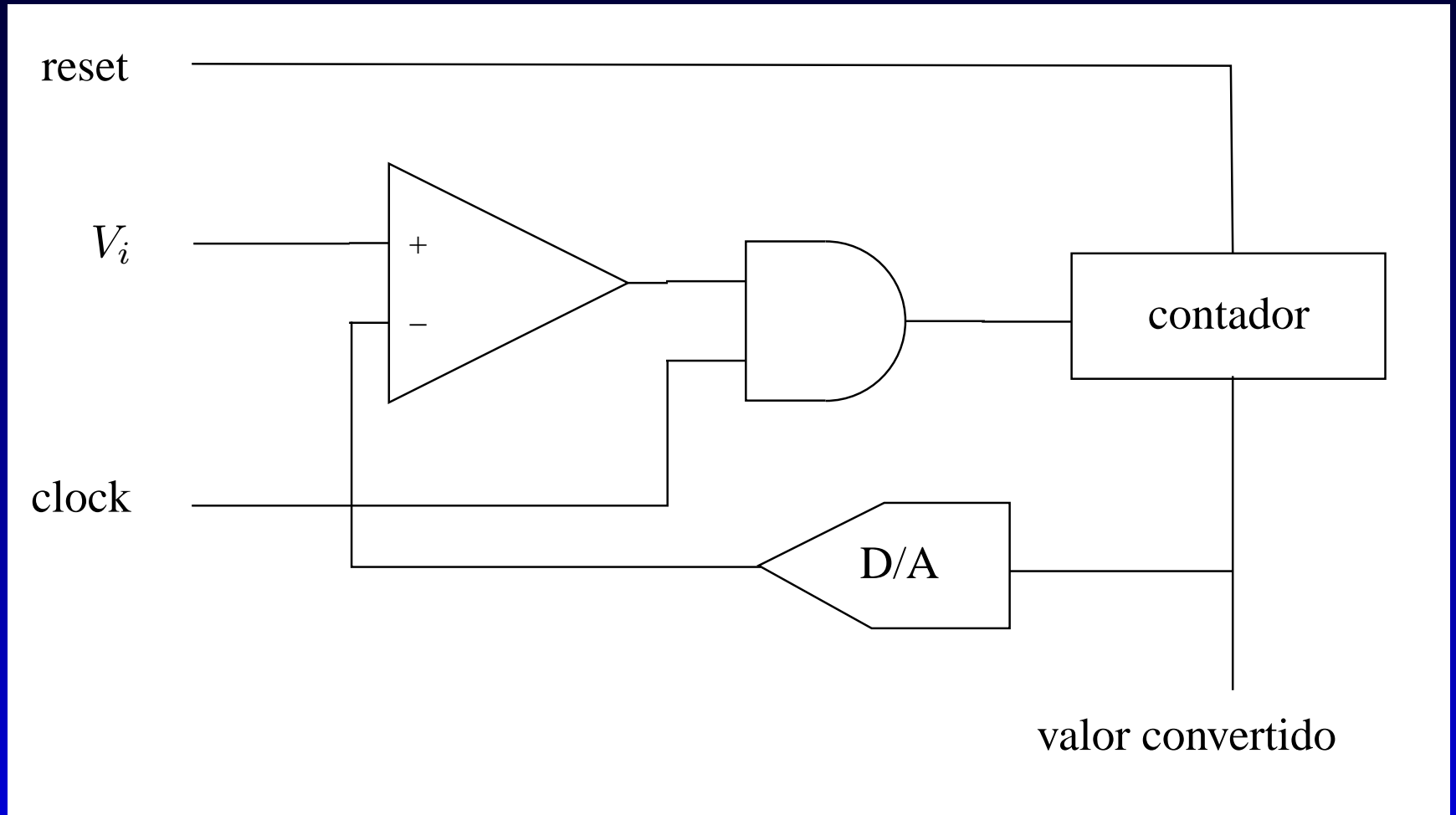


# Conversores A/D

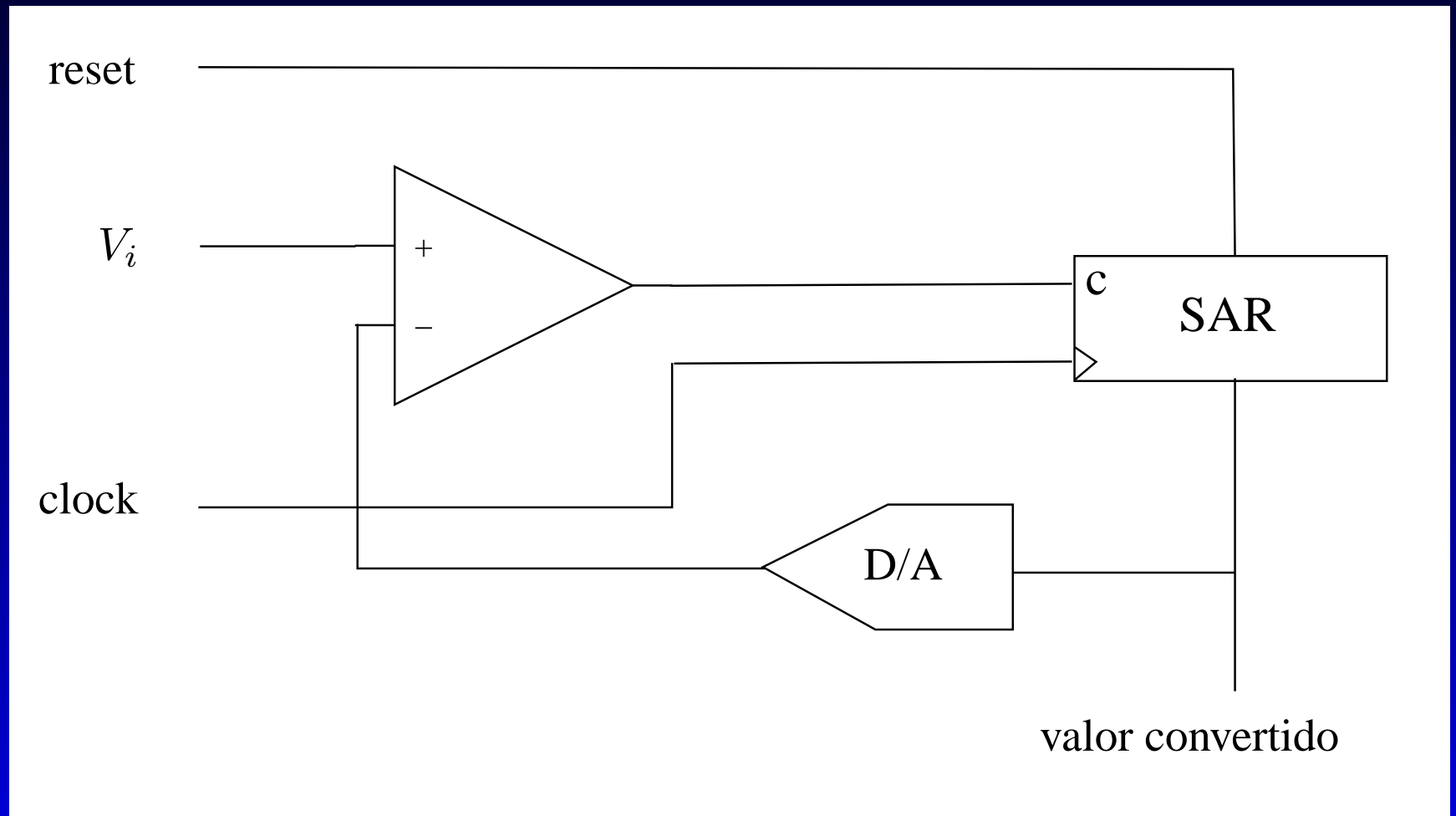
- Conversor por contagem
- Conversor por aproximações sucessivas
- Conversor por dupla inclinação
- Conversor *flash*



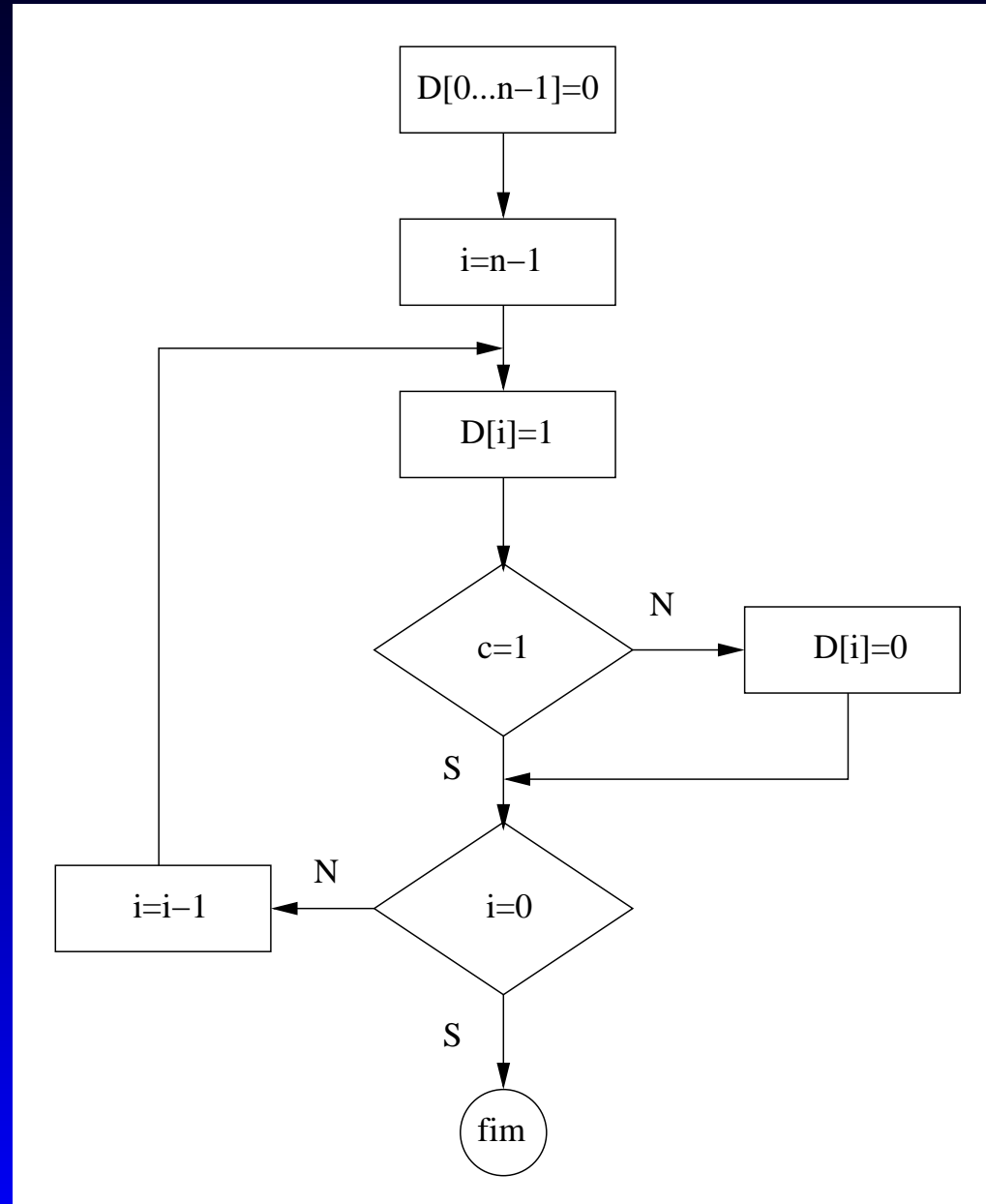
# Conversor por Contagem



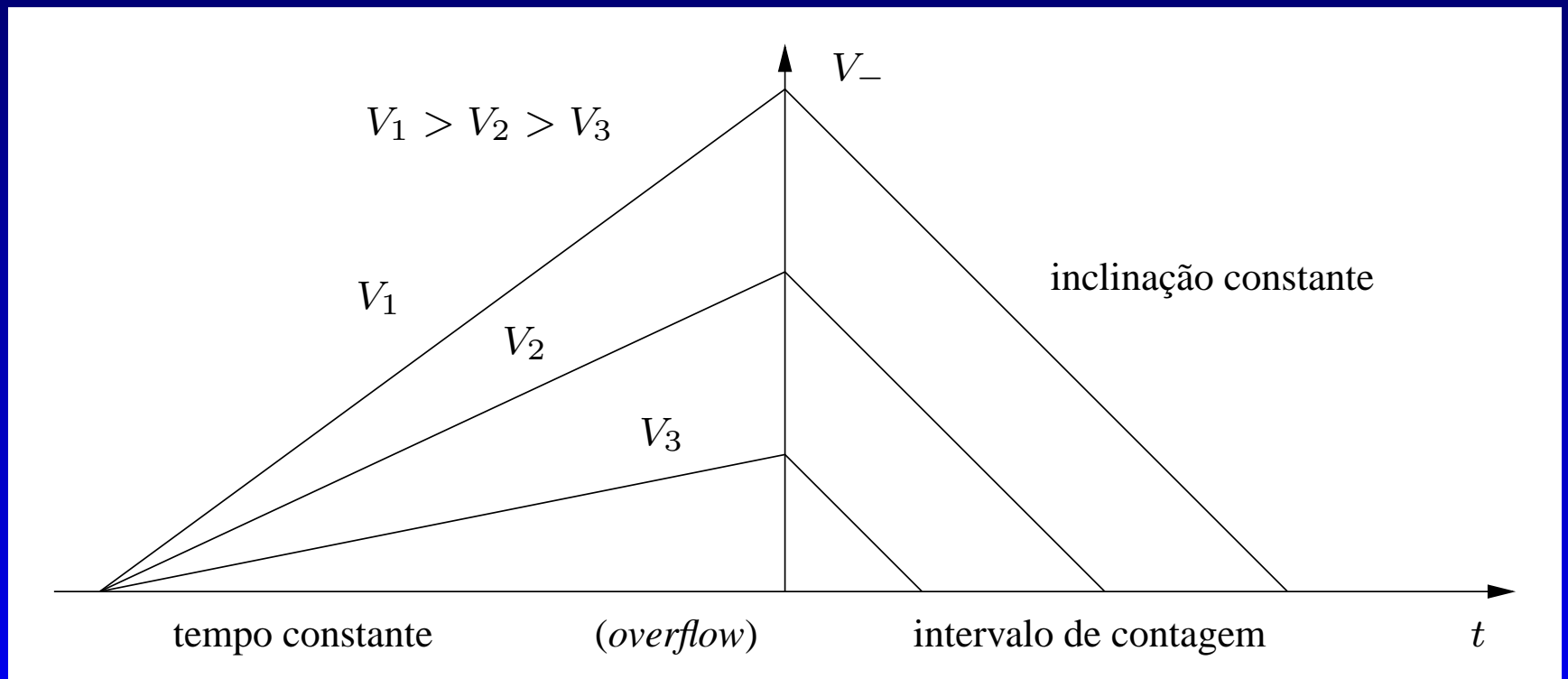
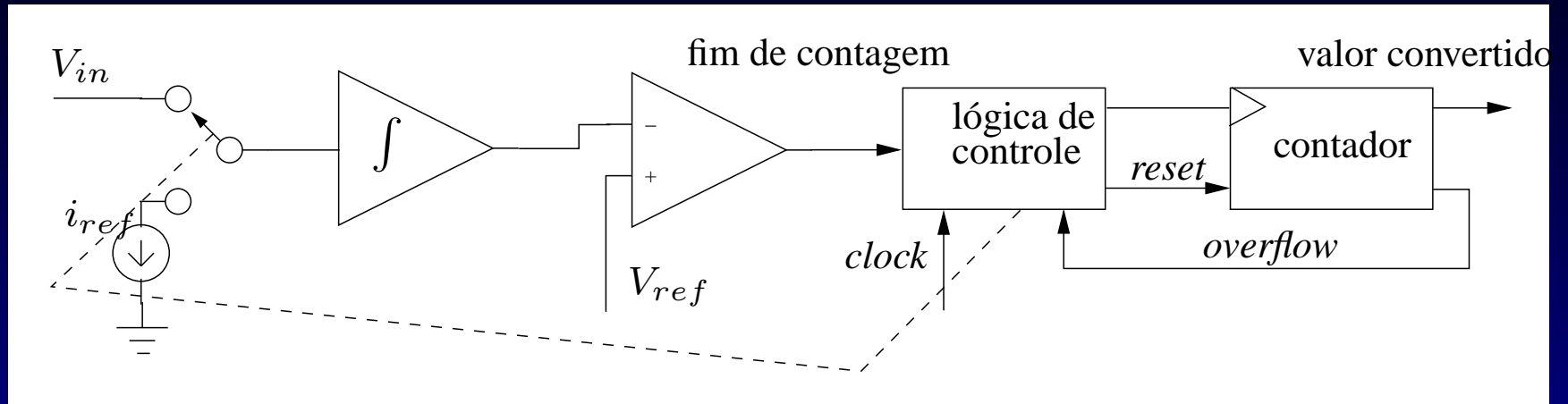
# Aproximações Sucessivas



# Aproximações Sucessivas

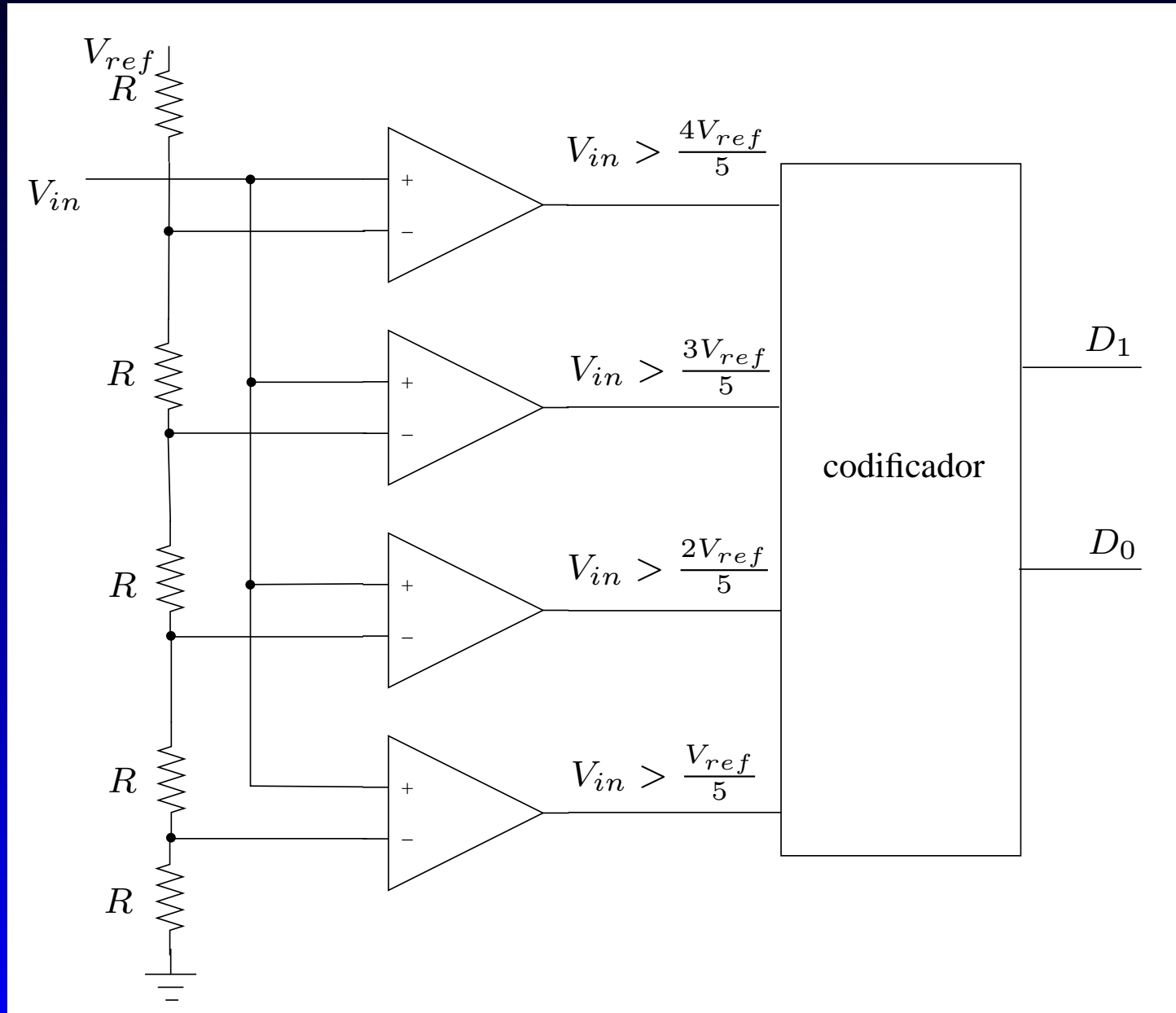


# Conversor por Dupla Inclinação

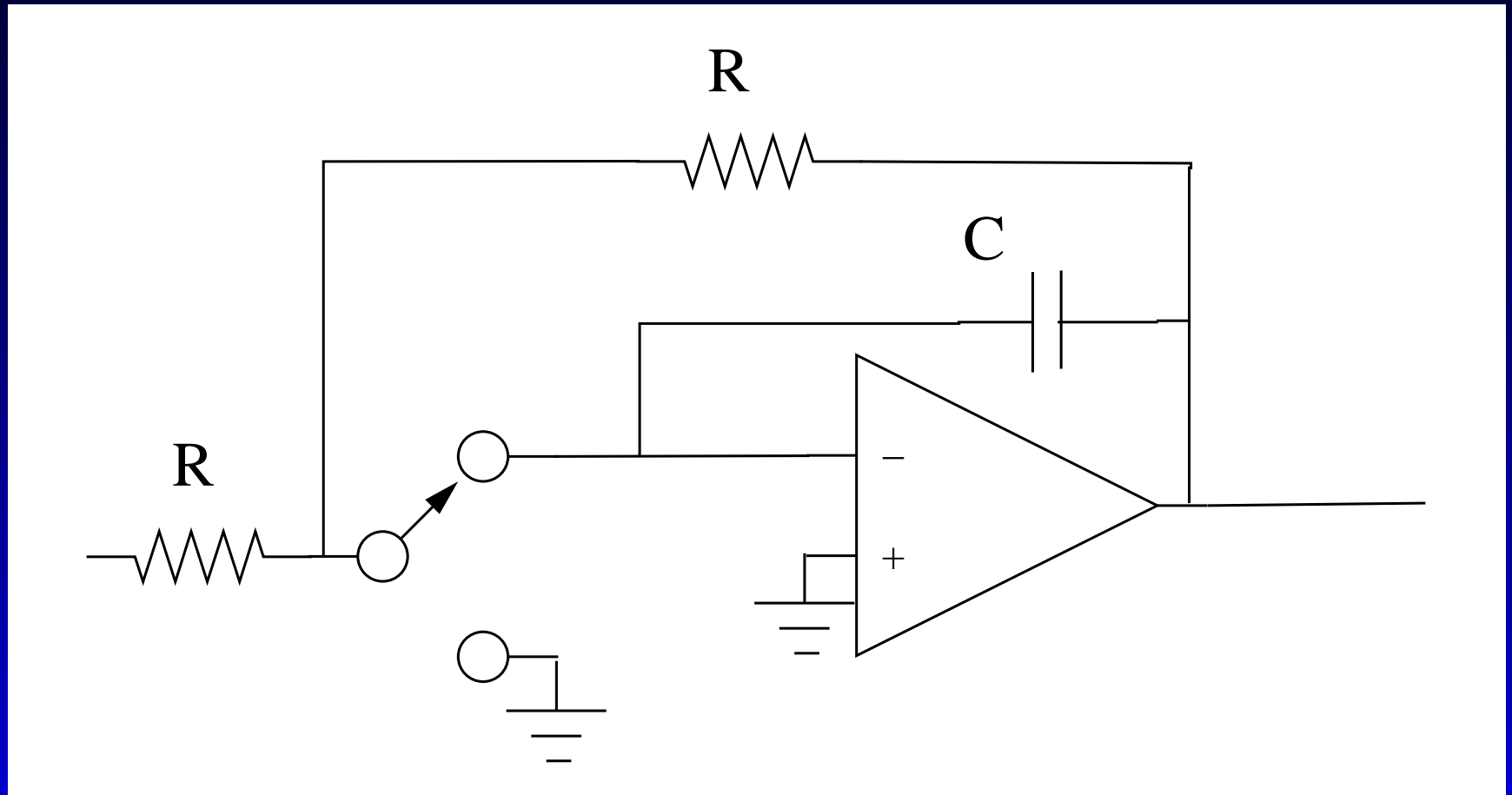




# Conversor *Flash*



# Sample & Hold





# Sample & Hold

- Para análise matemática pode ser considerado como uma modulação de impulsos seguida por uma operação de *hold*
- Modulação de impulsos

$$r^*(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} r(t)\delta(t - kT)$$

- Operação de *hold*

$$r_h(t) = r^*(kT) \text{ para } kT < t < kT + T = (k+1)T$$



# Amostragem

- Sob determinadas condições é possível reconstruir totalmente um sinal analógico amostrado a partir de suas amostras
  - Não há perda de informação na amostragem



# Aliasing

$$r^*(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} r(t)\delta(t - kT)$$

Expandindo  $\sum_{k=-\infty}^{\infty} \delta(t - kT)$  em série de Fourier:

$$\sum_{k=-\infty}^{\infty} \delta(t - kT) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_n e^{j(2\pi n/T)t}$$

com

$$C_n = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \delta(t - kT) e^{-jn(2\pi t/T)} dt$$

$$C_n = \frac{1}{T}$$



# Aliasing

$$\sum_{k=-\infty}^{\infty} \delta(t - kT) = \frac{1}{T} \sum_{n=-\infty}^{\infty} e^{j(2\pi n/T)t}$$

Se a frequência de amostragem for  $\omega_s = \frac{2\pi}{T}$  tem-se

$$\mathcal{L}[r^*(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} r(t) \frac{1}{T} \sum_{n=-\infty}^{\infty} e^{jn\omega_s t} e^{-st} dt$$

ou

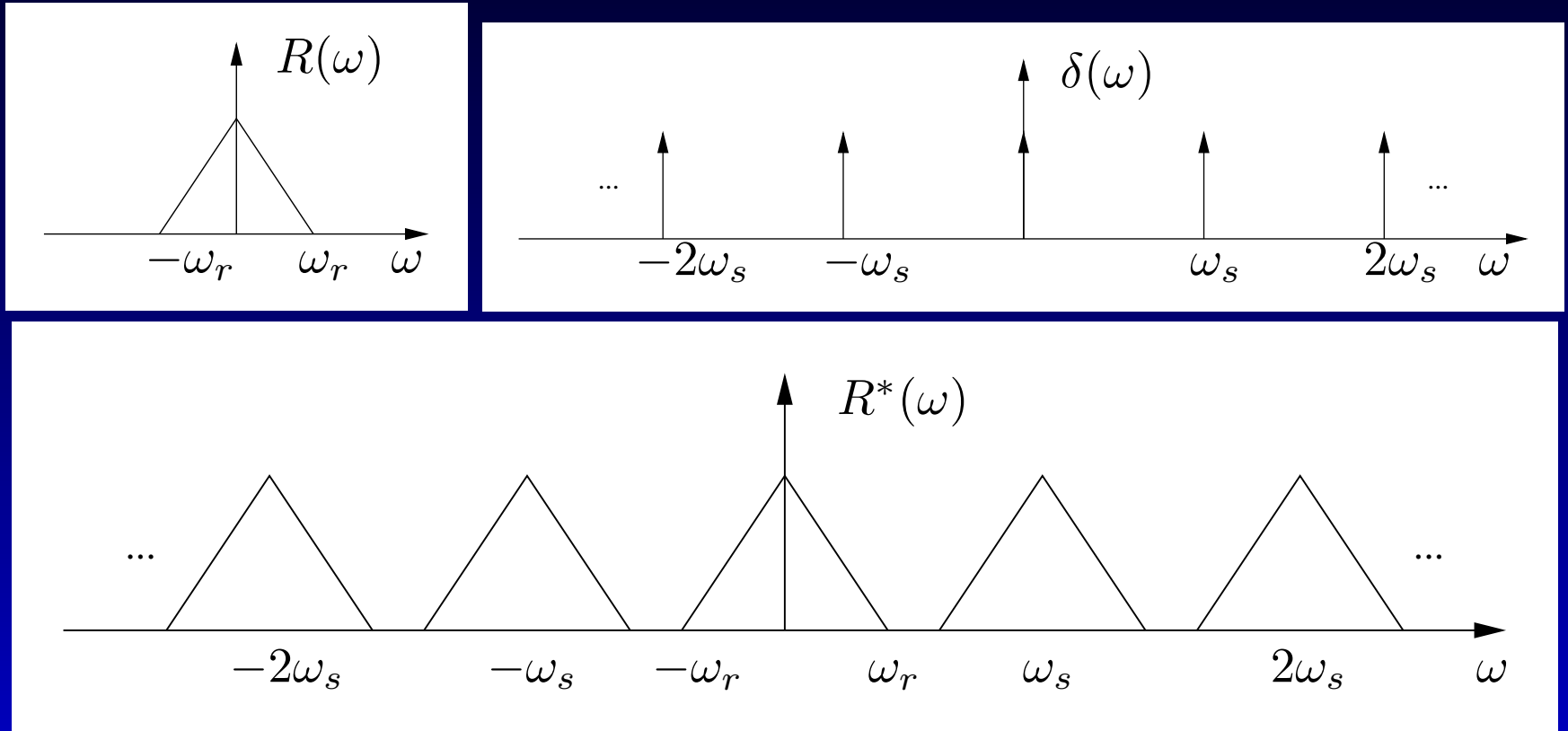
$$R^*(s) = \frac{1}{T} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} r(t) e^{jn\omega_s t} e^{-st} dt$$

que resulta

$$R^*(s) = \frac{1}{T} \sum_{n=-\infty}^{\infty} R(s - jn\omega_s)$$



# Aliasing



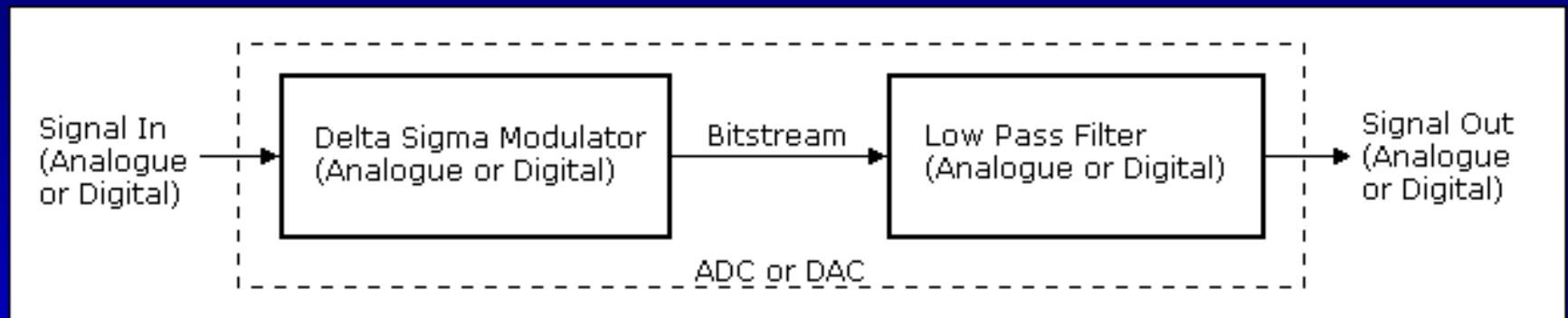


# Aliasing

- A amostragem faz com que o espectro do sinal amostrado seja o espectro do sinal contínuo atenuado de  $1/T$  e repetido a cada  $n\omega_s$
- Se  $\omega_s$  for menor do que o dobro da maior frequência do sinal, as repetições do espectro irão se sobrepor, provocando distorções (Teorema de Nyquist)
  - É necessário que o sinal a ser amostrado tenha banda limitada
- Tipicamente os sinais existentes em sistemas reais não possuem banda limitada
  - É necessário utilizar um filtro *anti-aliasing* antes da conversão A/D

# Conversor $\Sigma\Delta$

- São bastante diferentes dos demais conversores
- Não existe diferença substancial entre conversores A/D e D/A
- Conversor A/A





# Conversor $\Sigma\Delta$

- Modulador  $\Sigma\Delta$ 
  - Implementado de forma digital para entrada digital
  - Implementado de forma analógica para entrada analógica
- Filtro Passa-baixas
  - Implementado de forma digital para saída digital
  - Implementado de forma analógica para saída analógica



# Bitstream

- Sinal serial de 1 bit com uma taxa muito mais alta do que a taxa de conversão do A/D ou D/A
- Pode ser considerada como um sinal digital ou analógico
- O valor médio representa o valor médio do sinal de entrada
- Semelhante à um sinal PWM
- O *bitstream* é convertido para gerar a saída do conversor



# Bitstream

- Saída analógica
  - O *bitstream* é convertido para um sinal analógico por um conversor D/A de 1 bit
    - Conversão para dois valores de tensão, por exemplo  $-1V$  e  $+1V$
- Saída digital
  - O *bitstream* é convertido valores digitais conforme a codificação utilizada
    - Conversão para o valor digital máximo ou valor digital mínimo, por exemplo 7f e 80 em um sistema de 8 bits em complemento 2



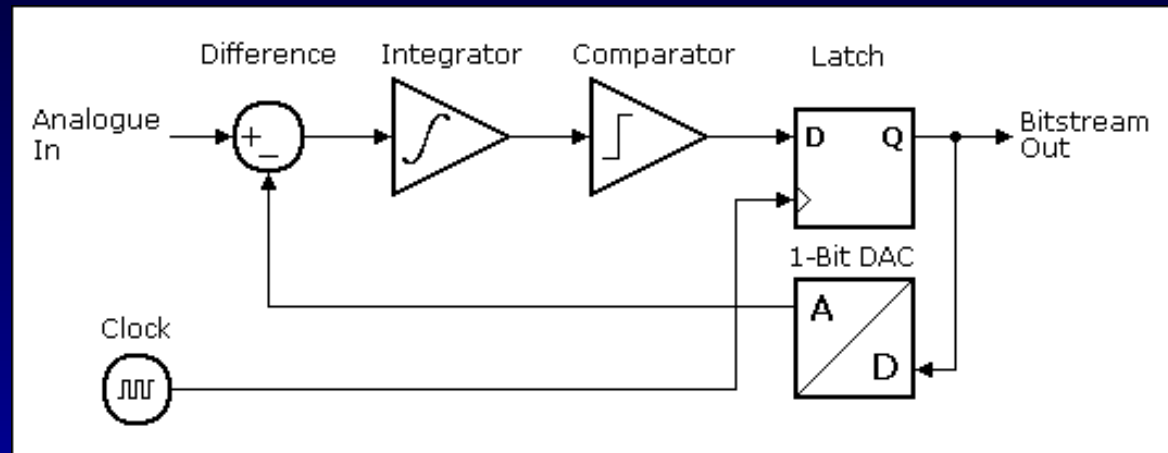


# Filtro Passa-Baixas

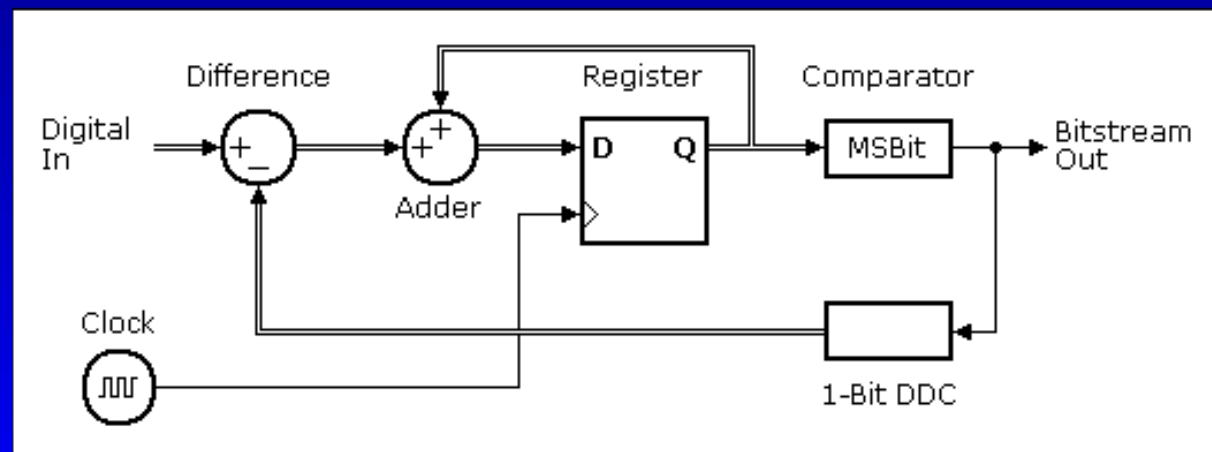
- O valor convertido é o valor médio do *bitstream*
- O *bitstream* é como se fosse um sinal com informação em baixa frequência com bastante ruído nas frequências altas

# Modulador $\Sigma\Delta$

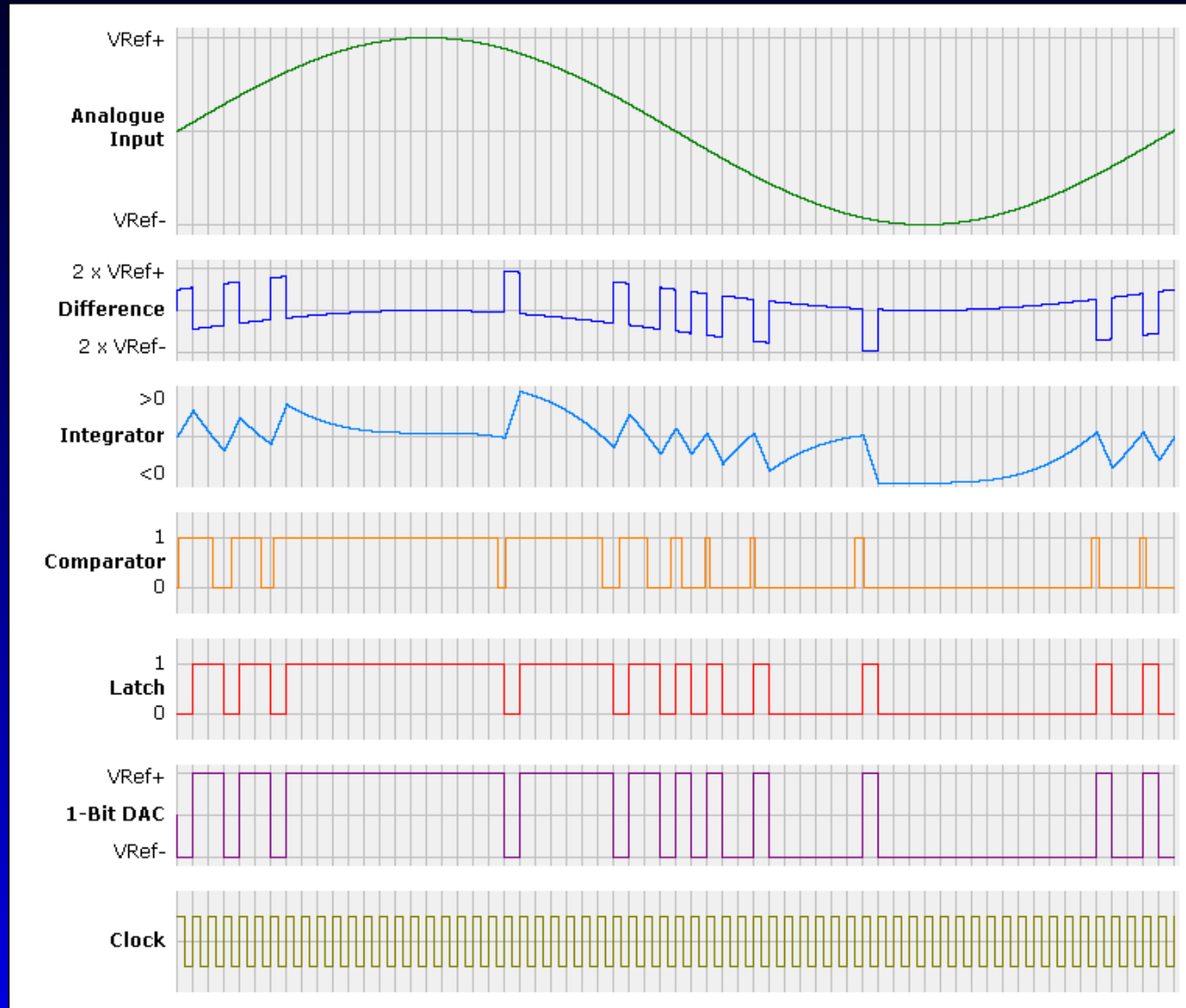
- Analógico



- Digital

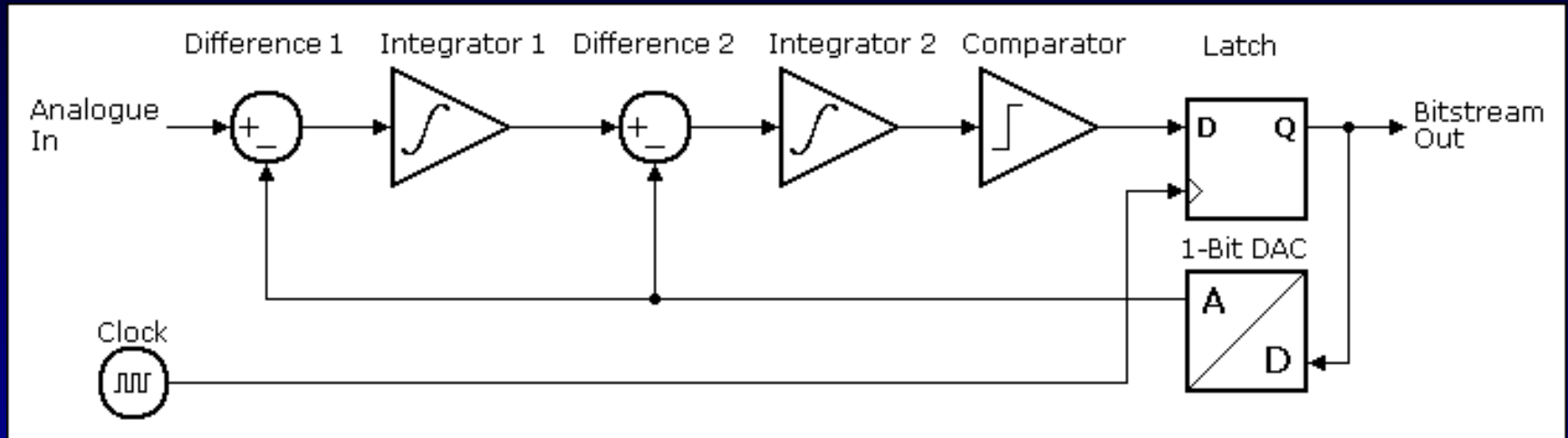


# Sinais (Modulador de 1ª Ordem)



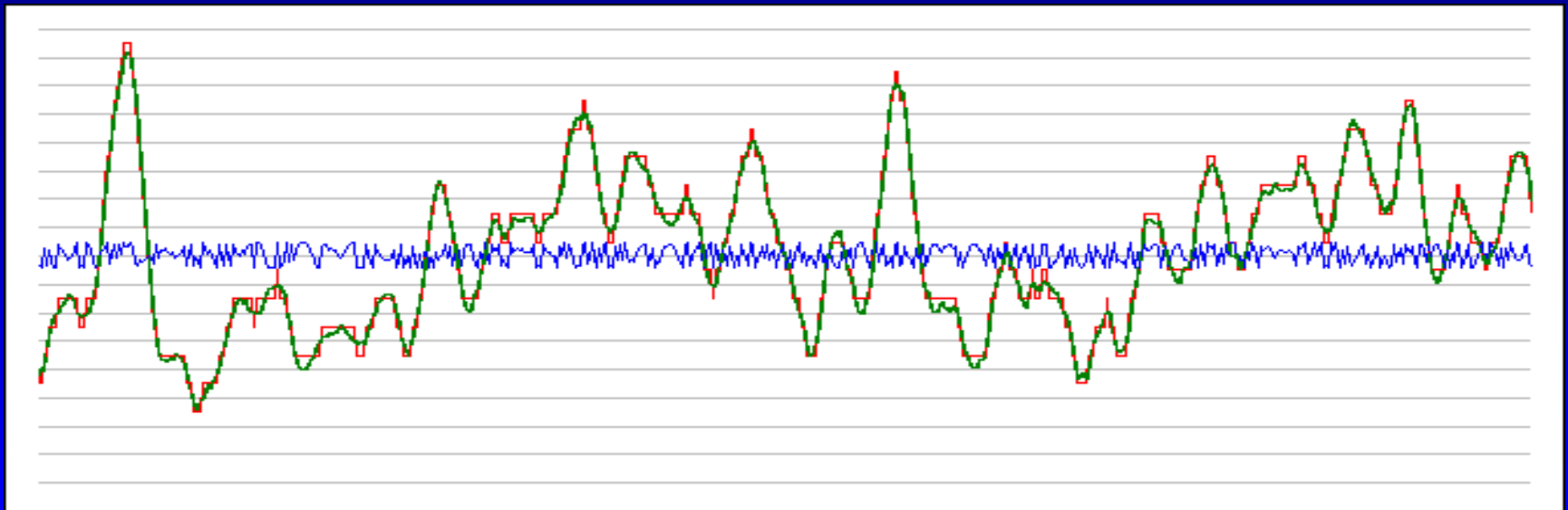
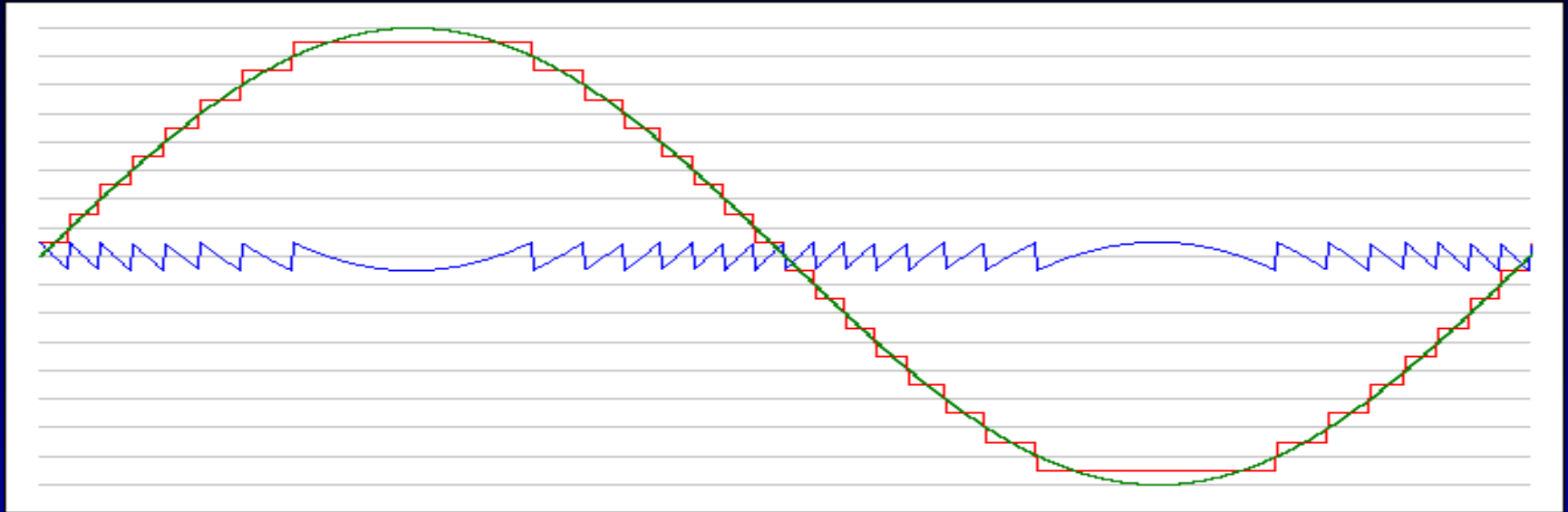
- *Clock* 64 vezes a frequência do sinal

# Modulador de 2ª Ordem



- Ruído menor e mais espalhado em frequência
  - Ruído "mais branco"
- Moduladores de ordem superior a 2
  - Mais de 2 integradores
  - Instáveis devido à variação de fase

# Ruído de Quantização



# Conversores $\Sigma\Delta$ Multi-bit

