



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

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

ELE00002 Sistemas de Automação



Introdução

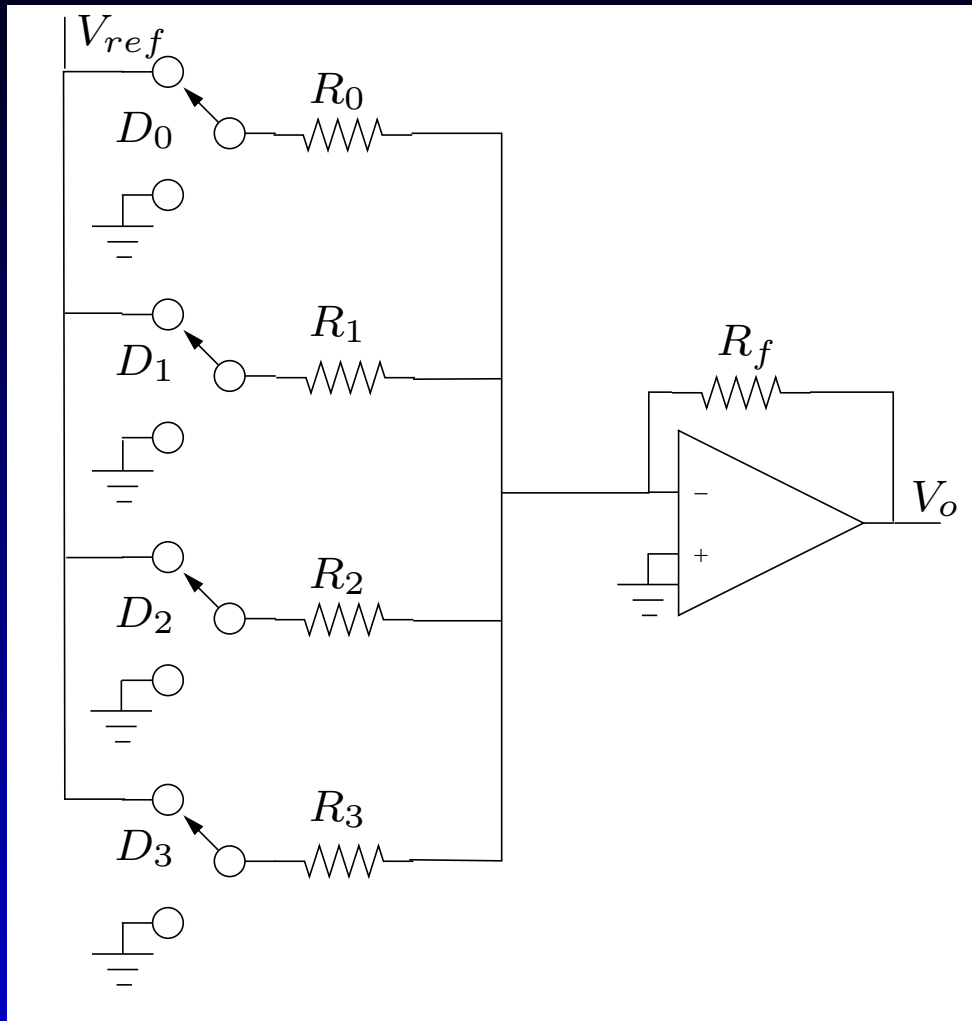
- Em geral conversores A/D são implementados utilizando-se conversores D/A
- Conversores D/A usualmente são rápidos
- Conversores A/D usualmente são lentos



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



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

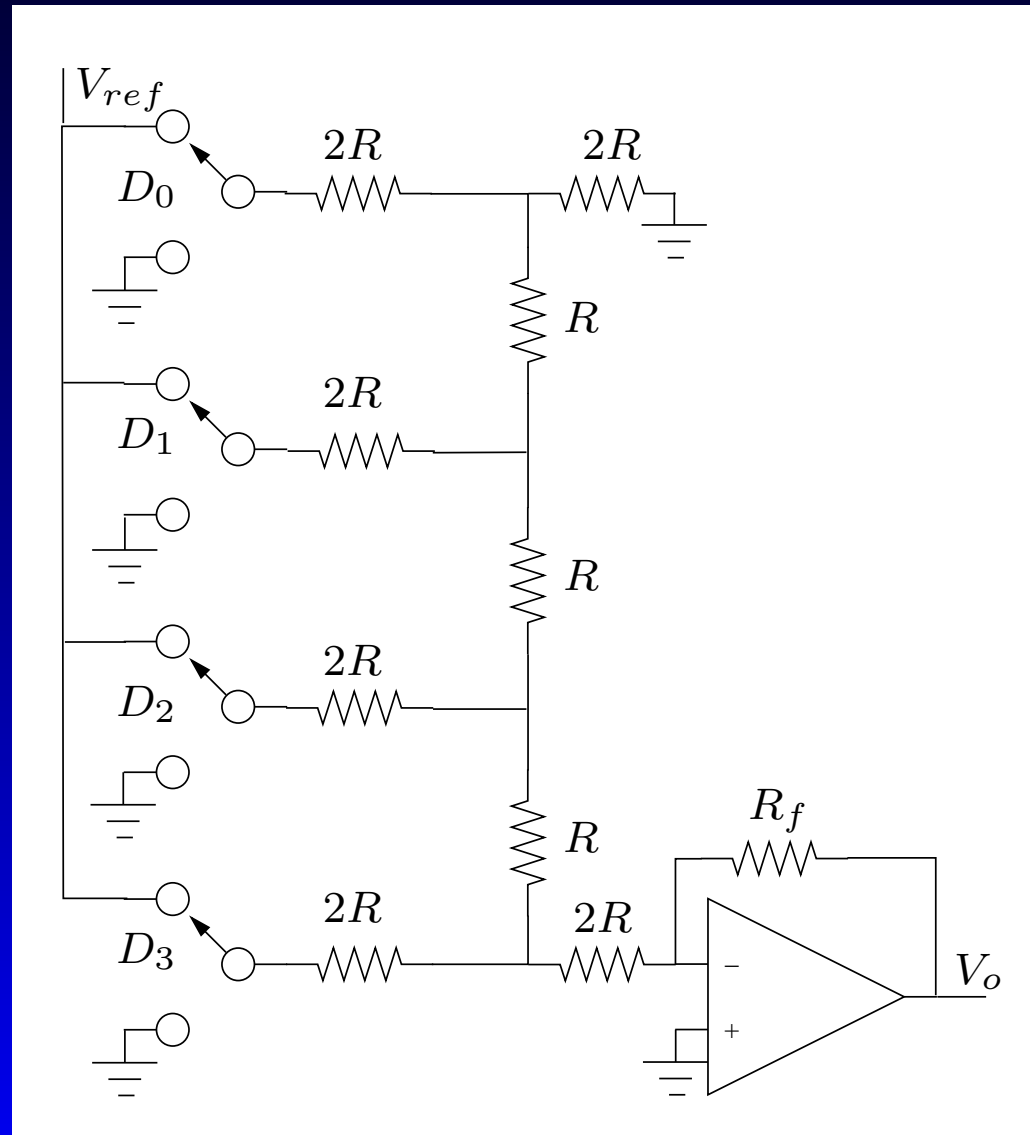
$$R_1 = \frac{R}{2^1} = \frac{R}{2}$$

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

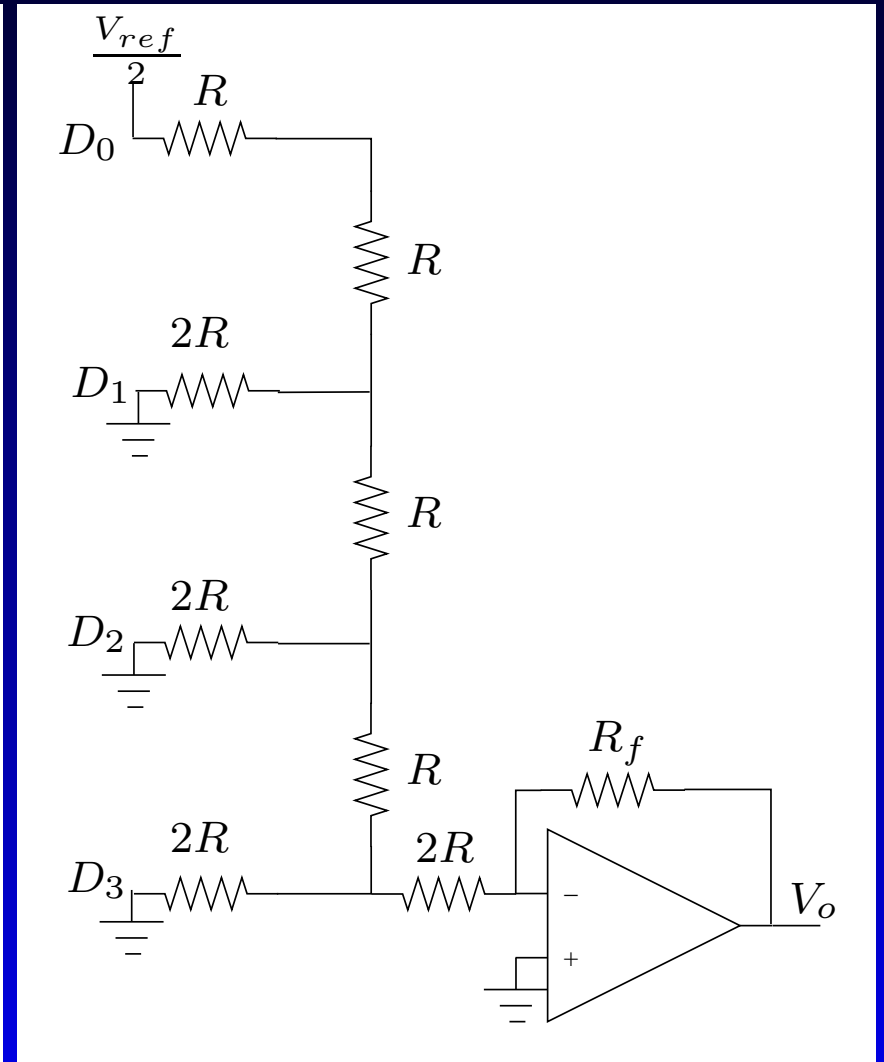
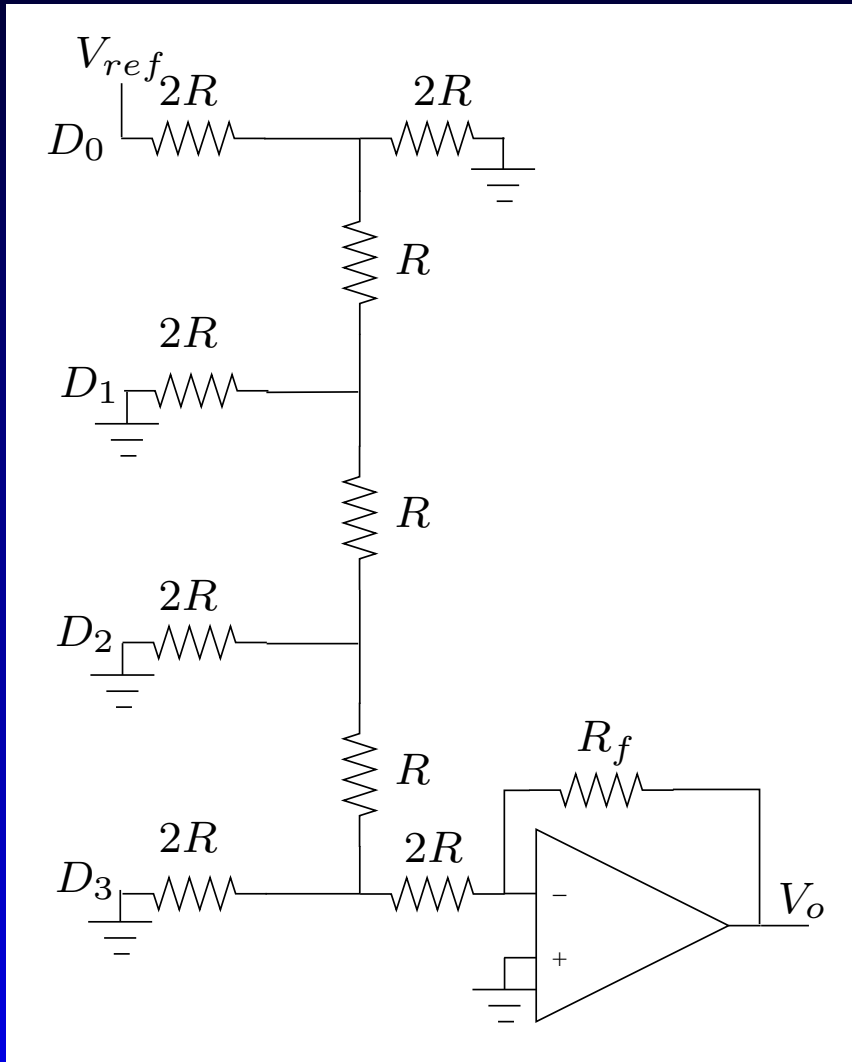
$$R_3 = \frac{R}{2^3} = \frac{R}{8}$$

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

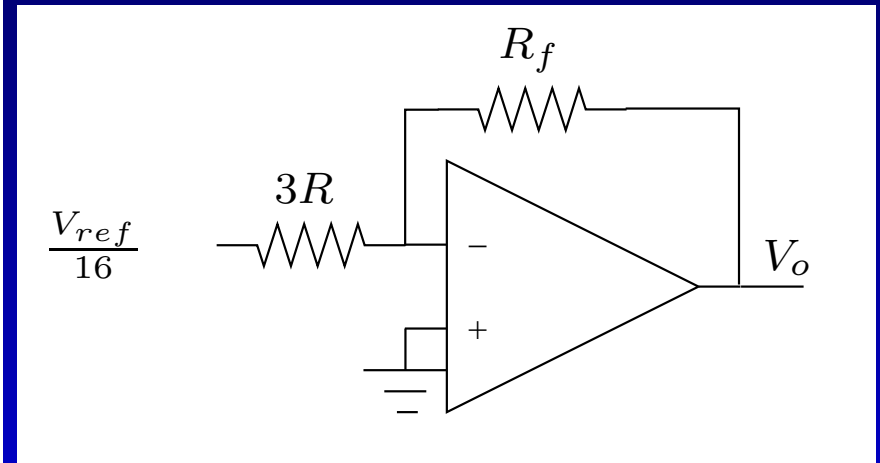
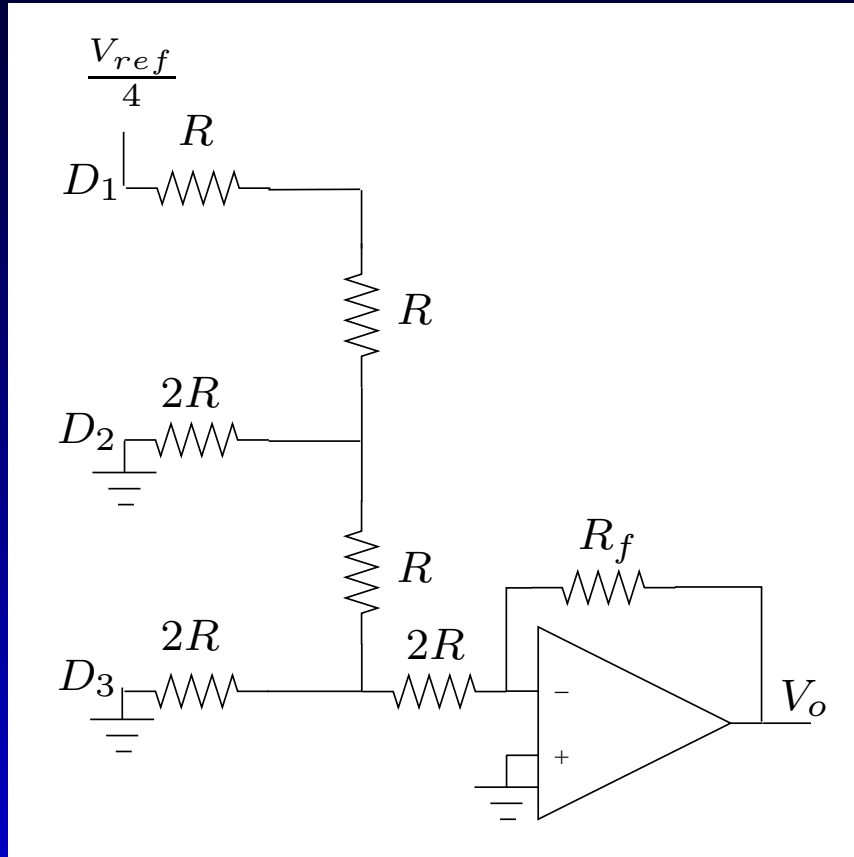
Conversor com Malha R-2R



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

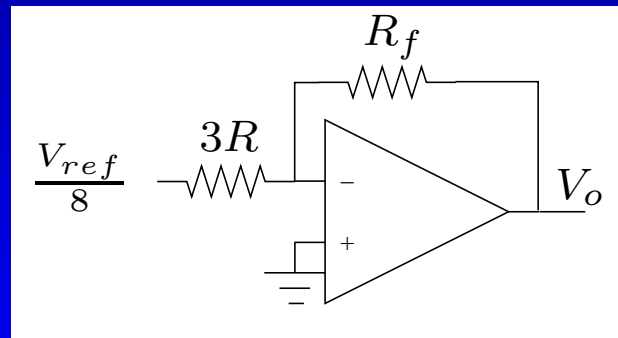
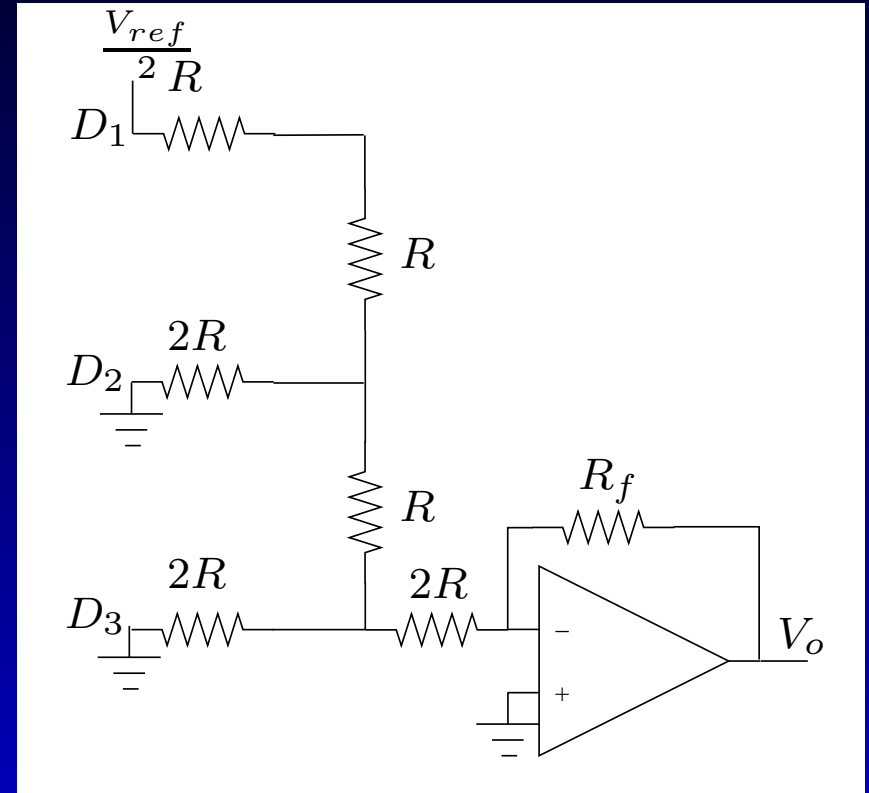
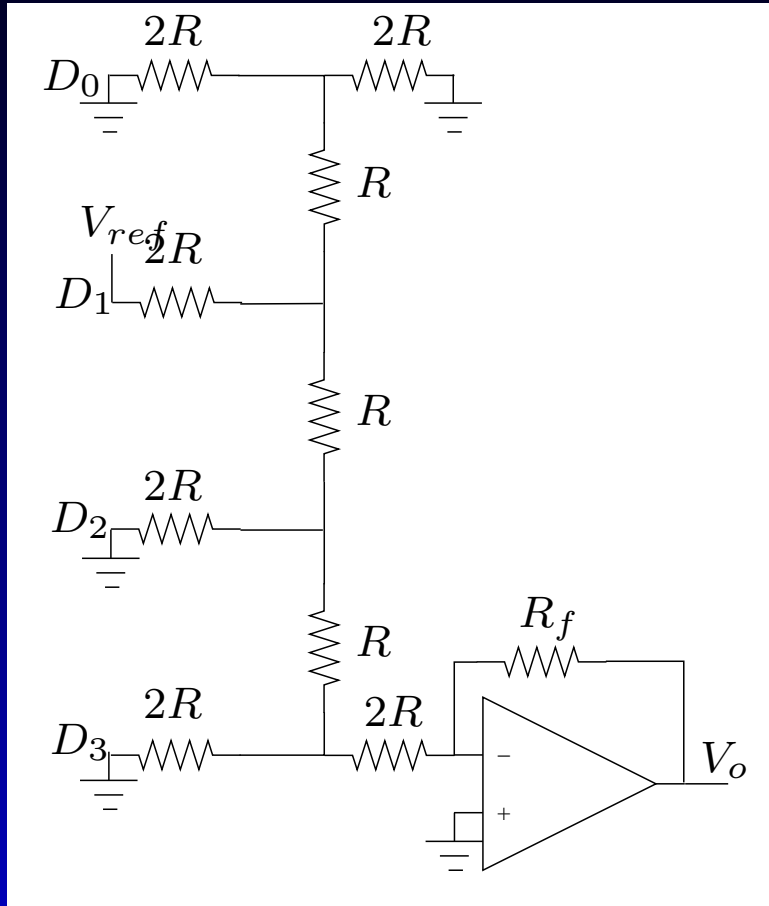


$$D_0 = 1D_1 = 0D_2 = 0D_3 = 0$$





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



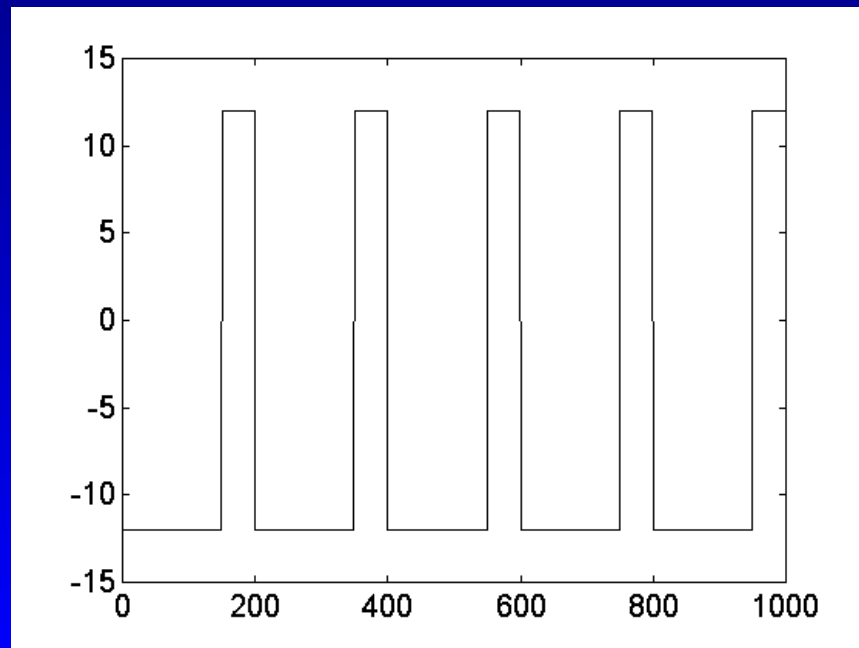
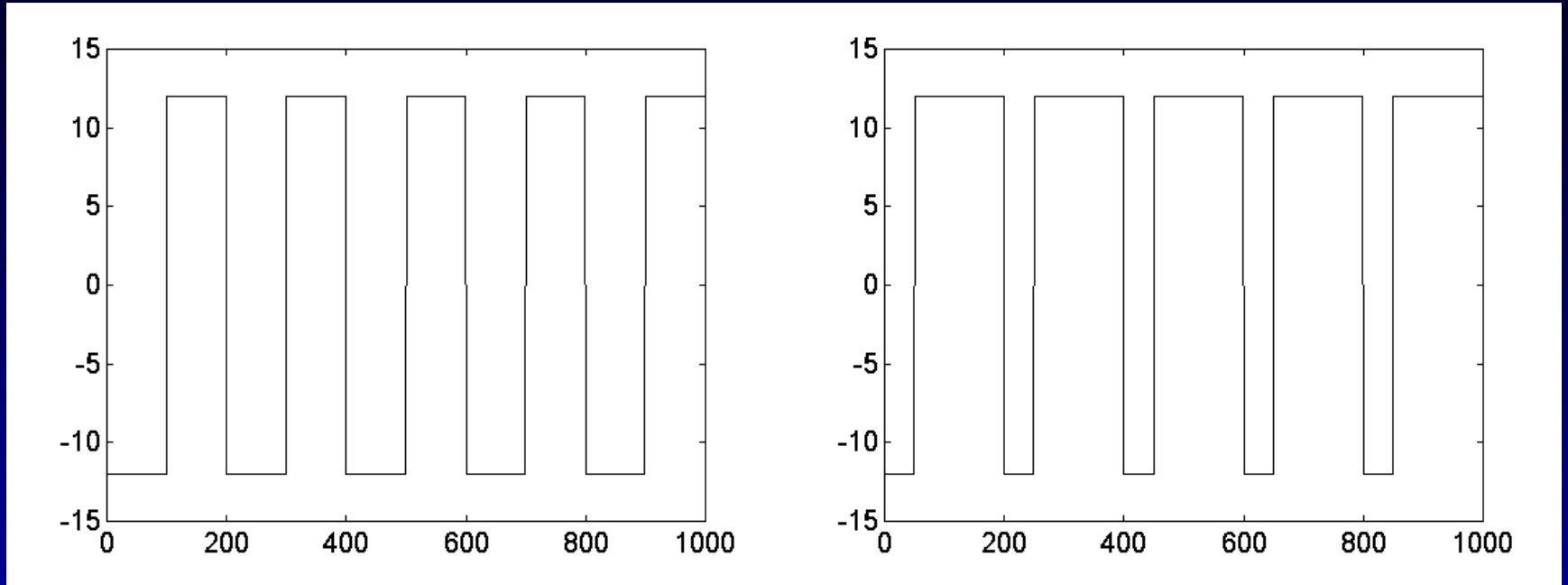
Conversor com Malha R-2R



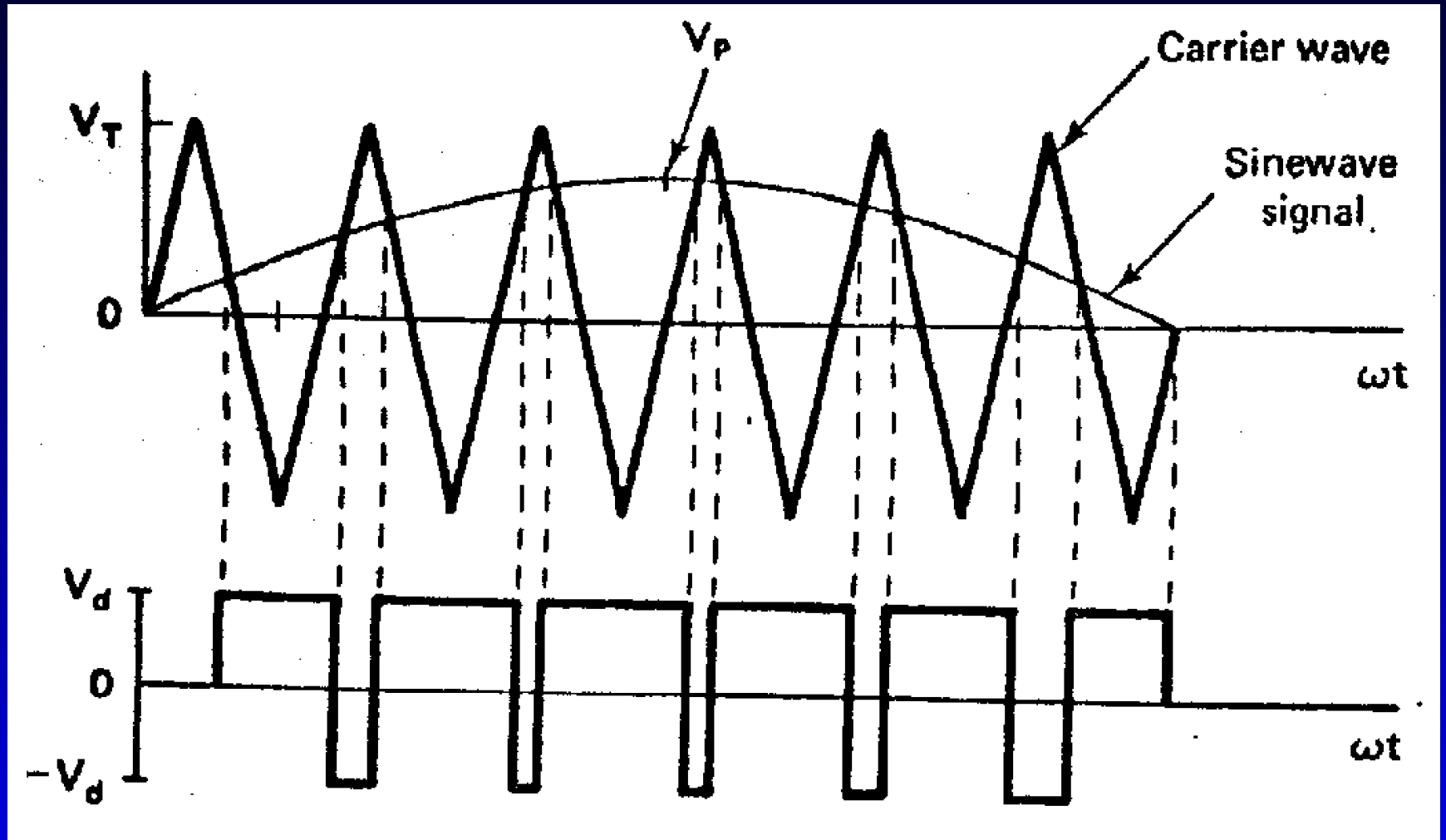
$$V_o = \frac{-R_f V_{ref}}{3R} \left(\frac{D_3}{2^1} + \frac{D_2}{2^2} + \frac{D_1}{2^3} + \frac{D_0}{2^4} \right)$$

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

Pulse Width Modulation

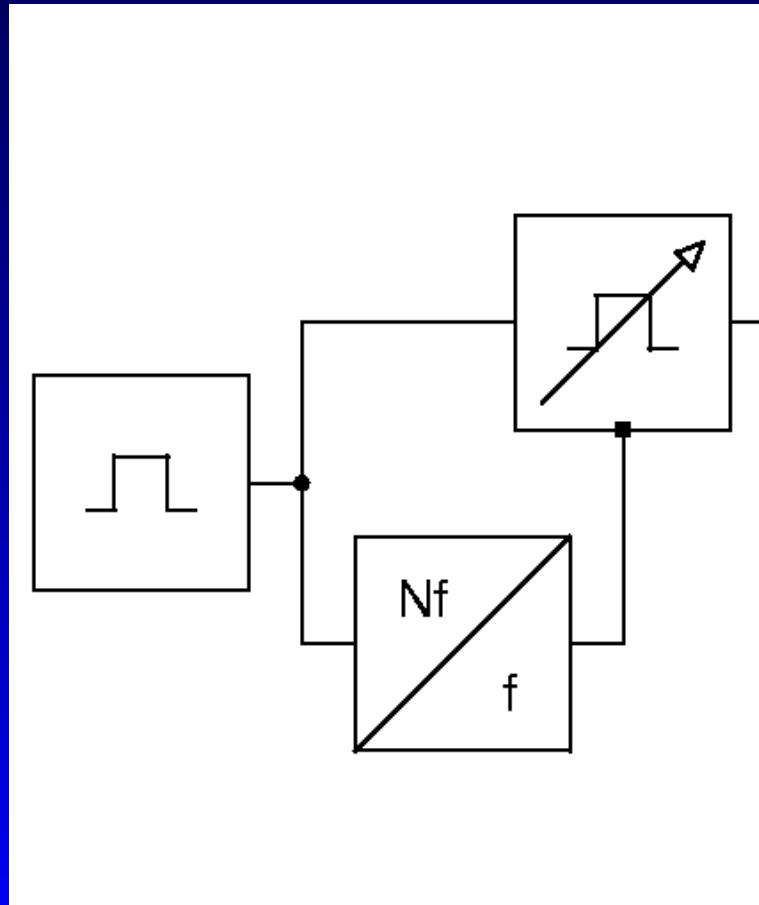


Modulador PWM Analógico

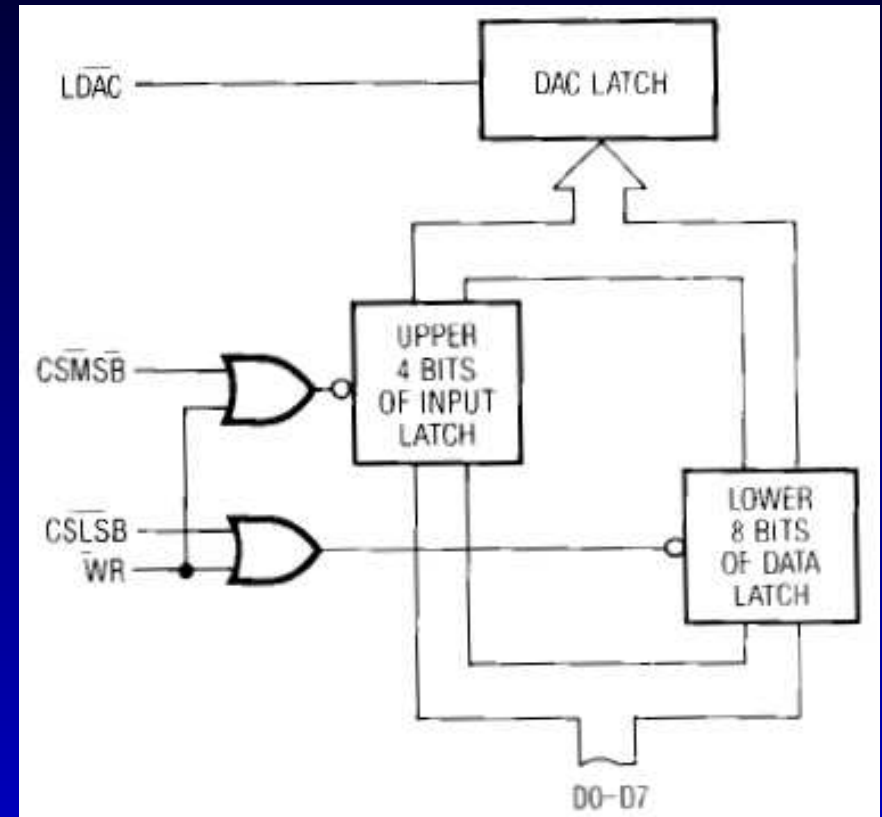
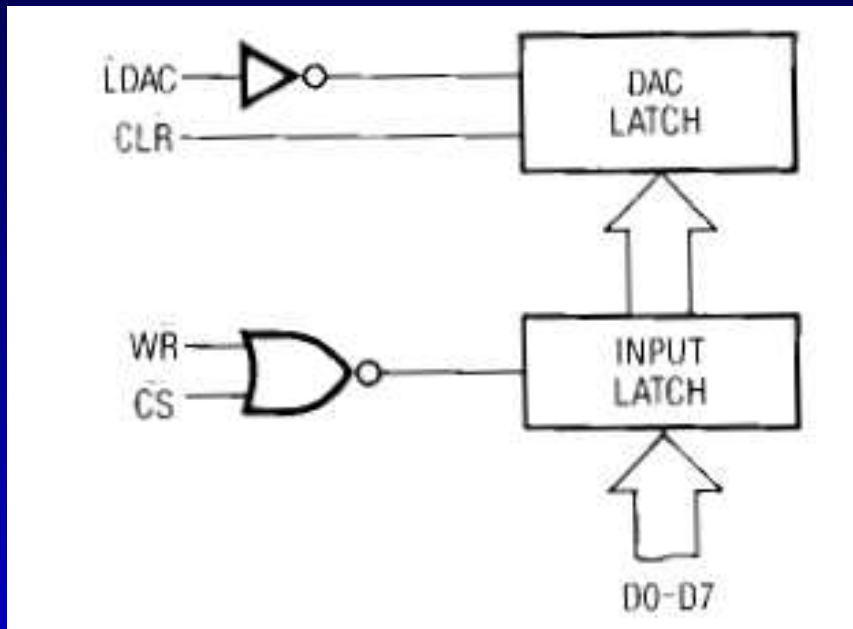


PWM Digital

- 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°)
 - 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

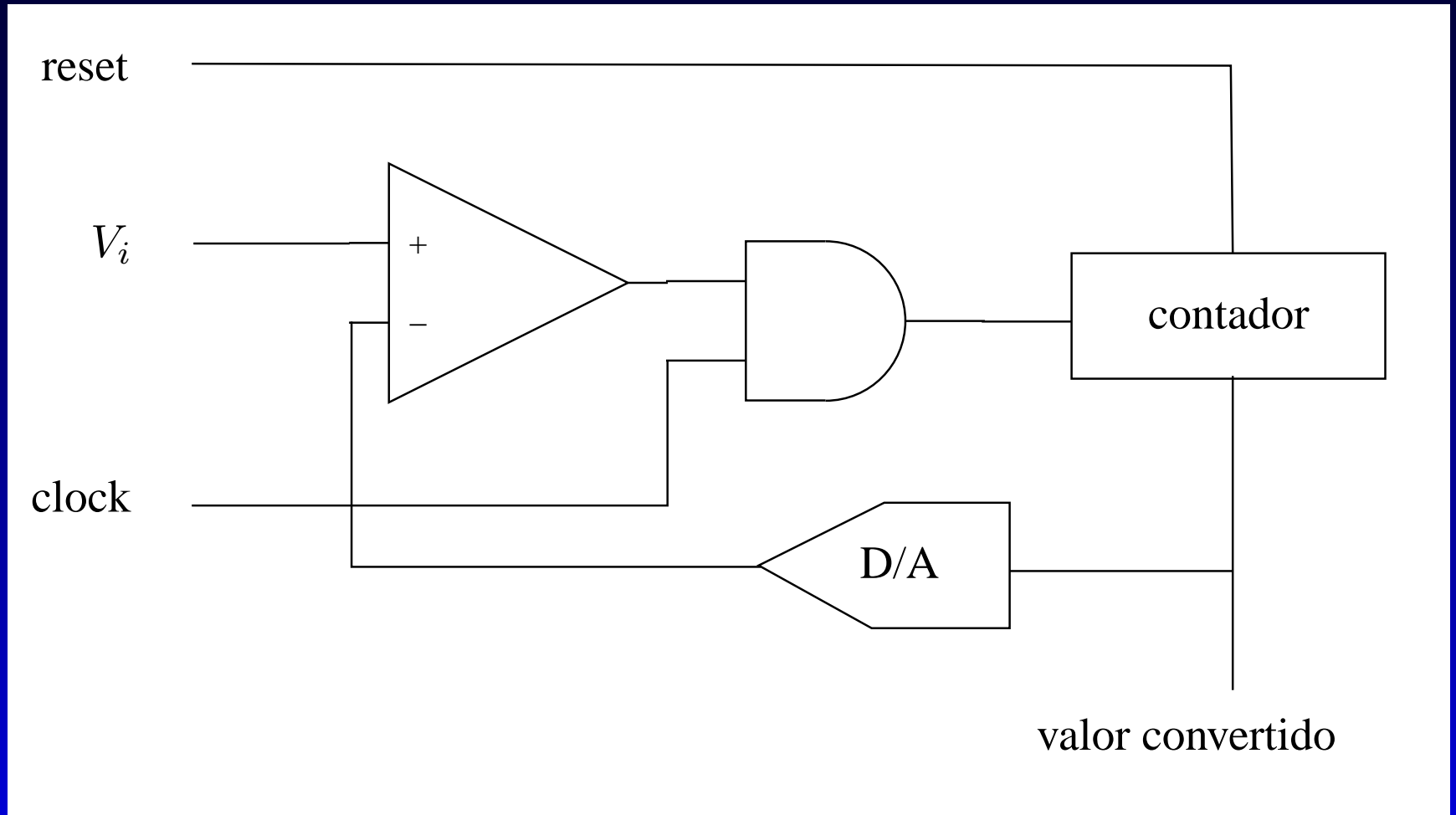
- Conversores A/D são tipicamente precedidos por um *sample & hold*
- Operações realizadas pelos conversores A/D
 - Amostragem
 - Converte o sinal contínuo no tempo em discreto no tempo
 - Quantização
 - Converte o sinal contínuo em tensão em discreto em tensão
 - Usualmente em automação se utiliza quantização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



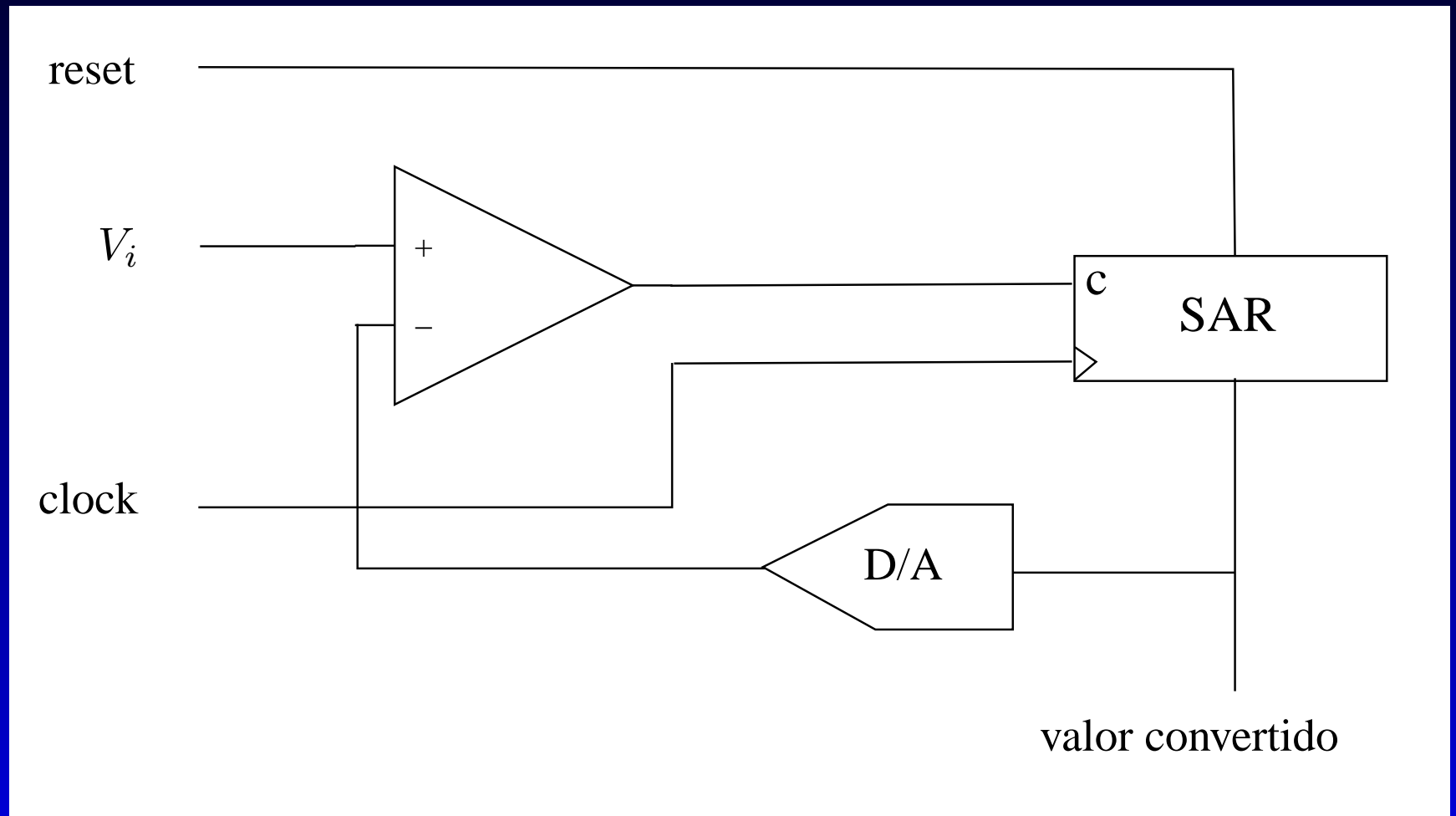
Conversores A/D

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

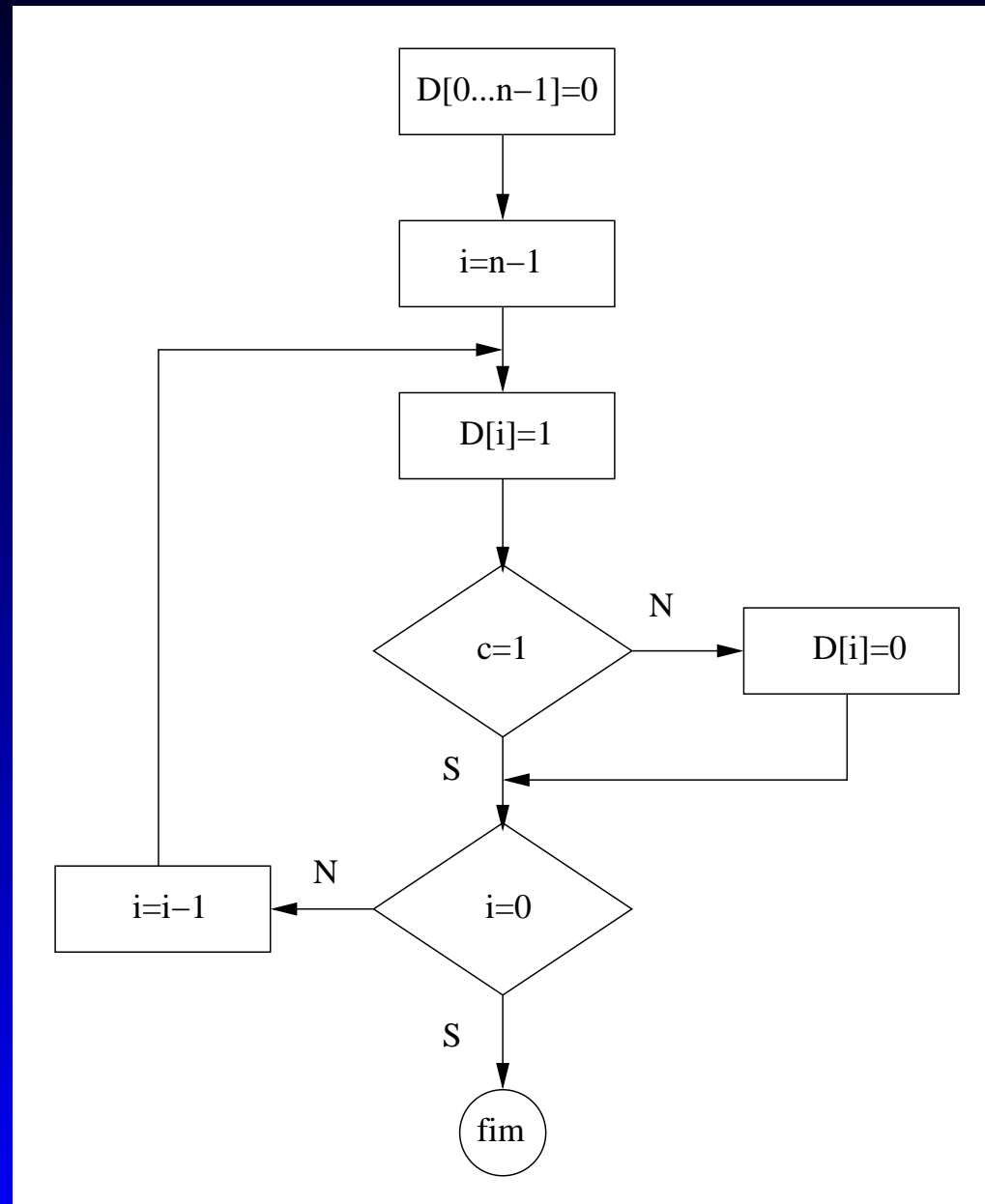
Conversor por Contagem



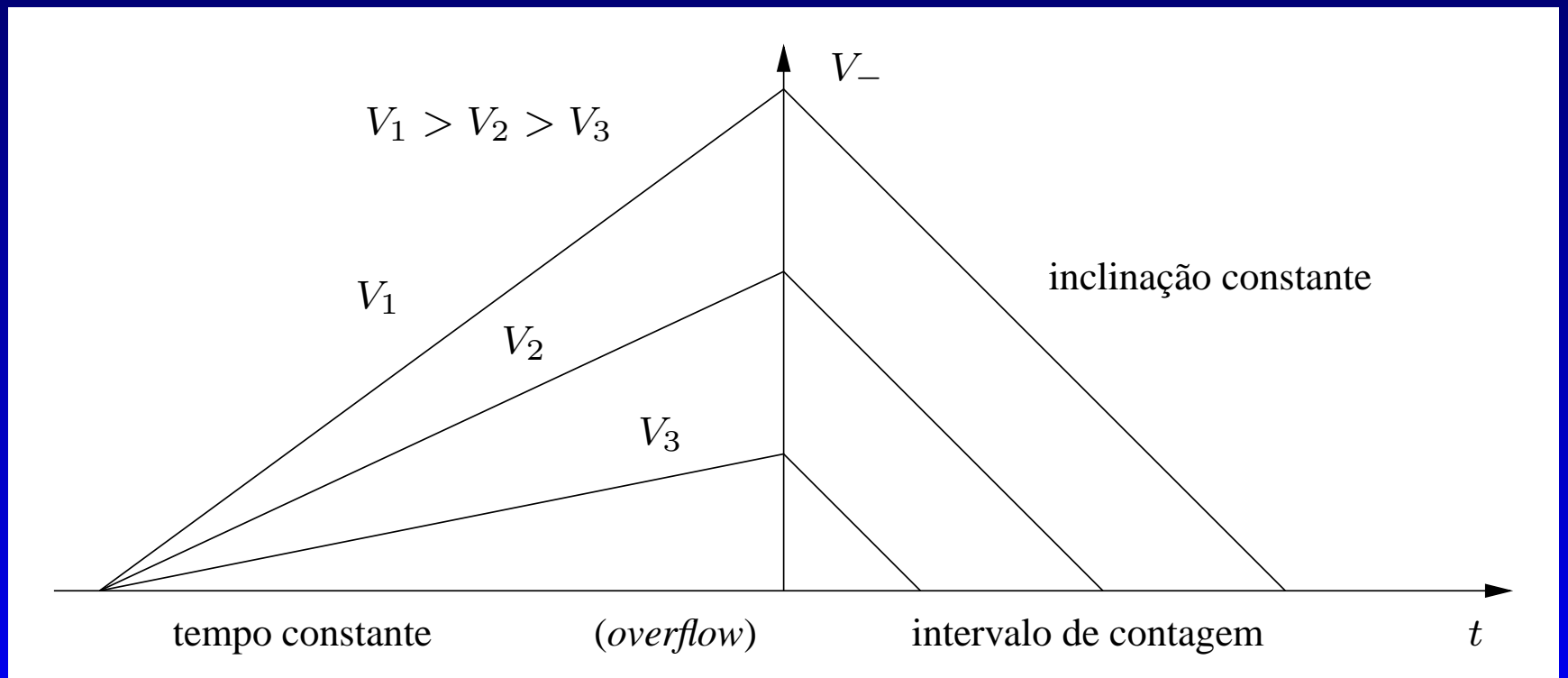
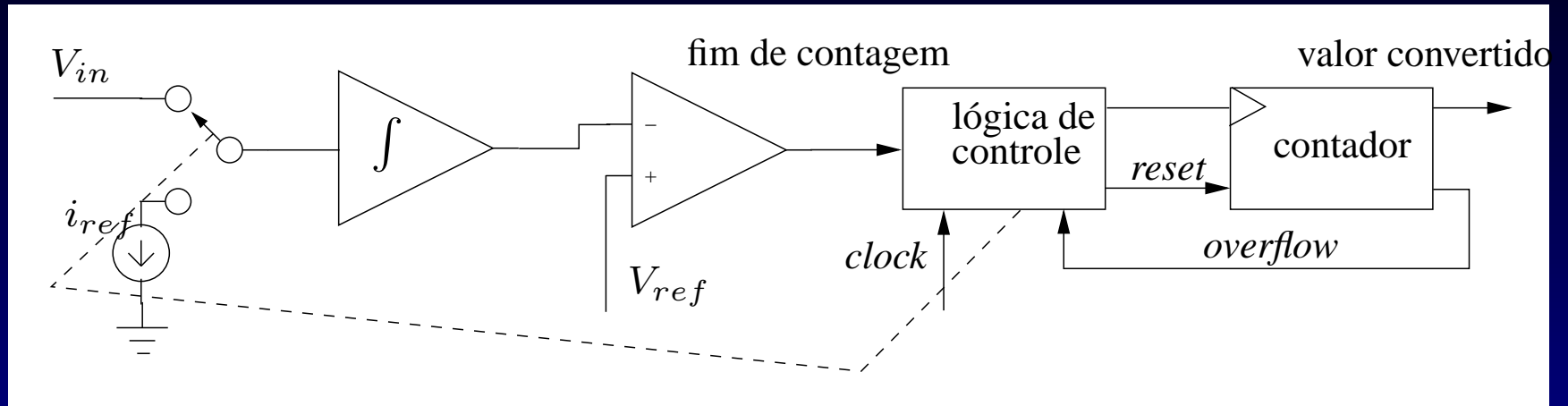
Aproximações Sucessivas



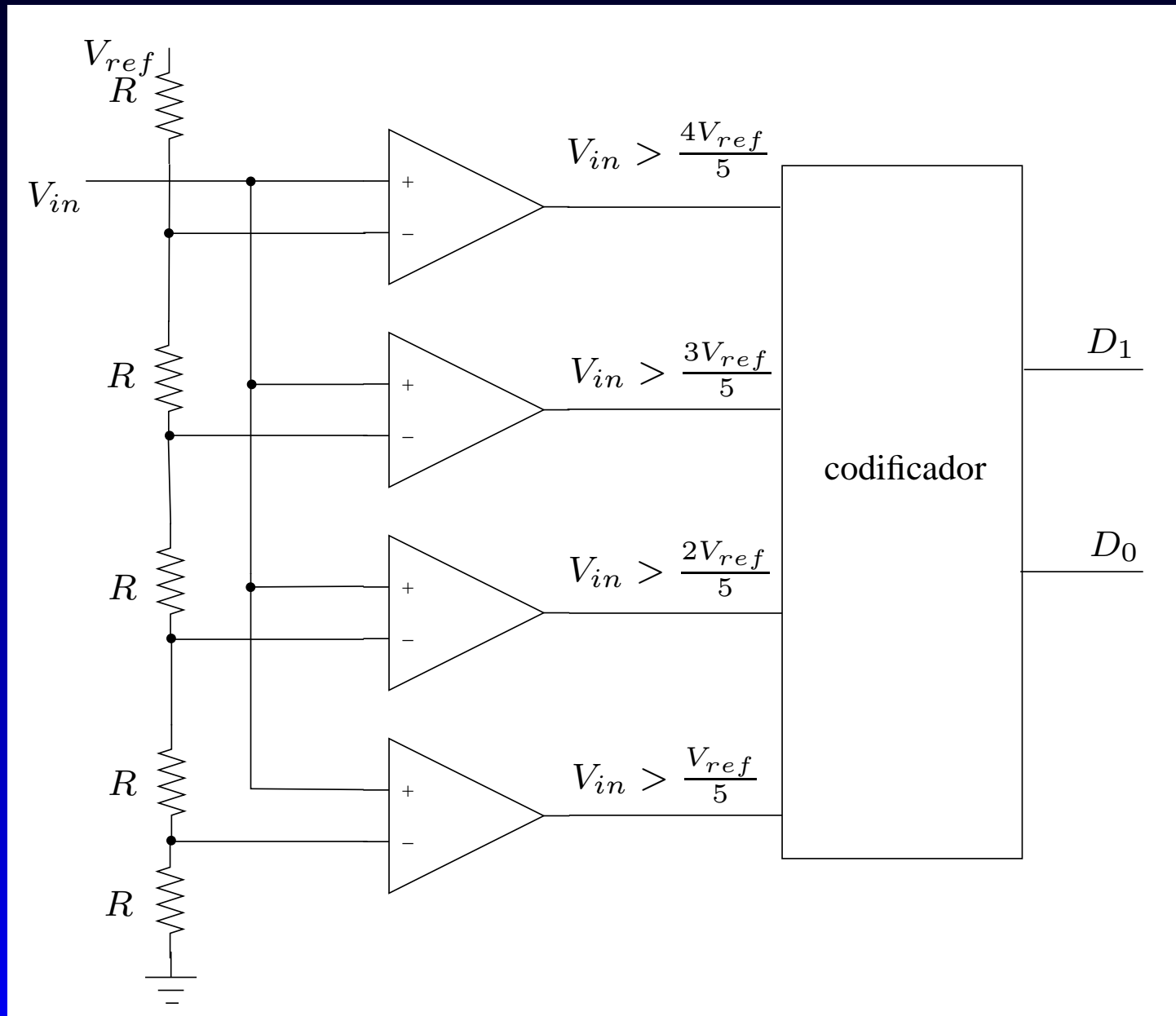
Aproximações Sucessivas



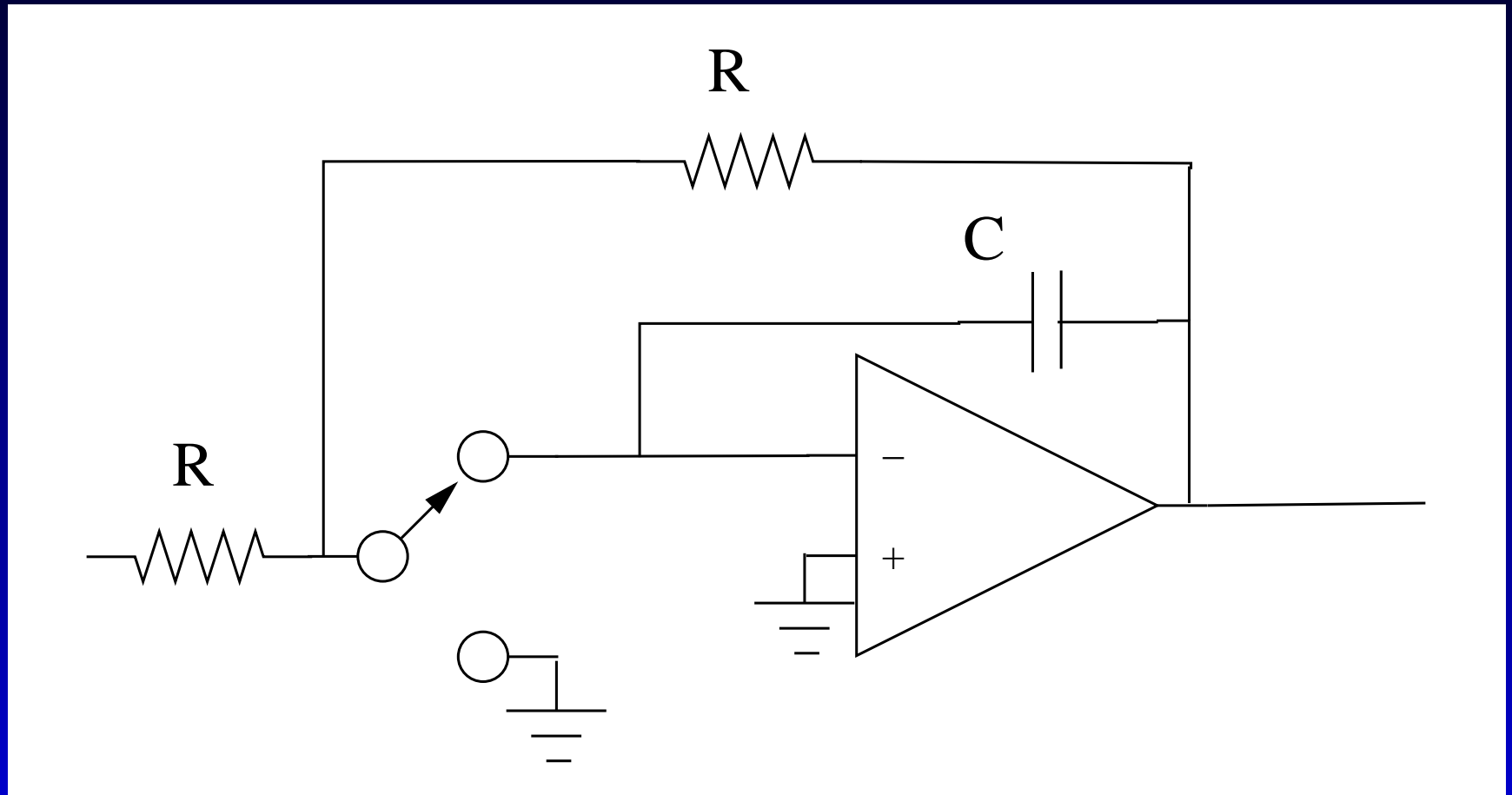
Conversor por Dupla Inclinação



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

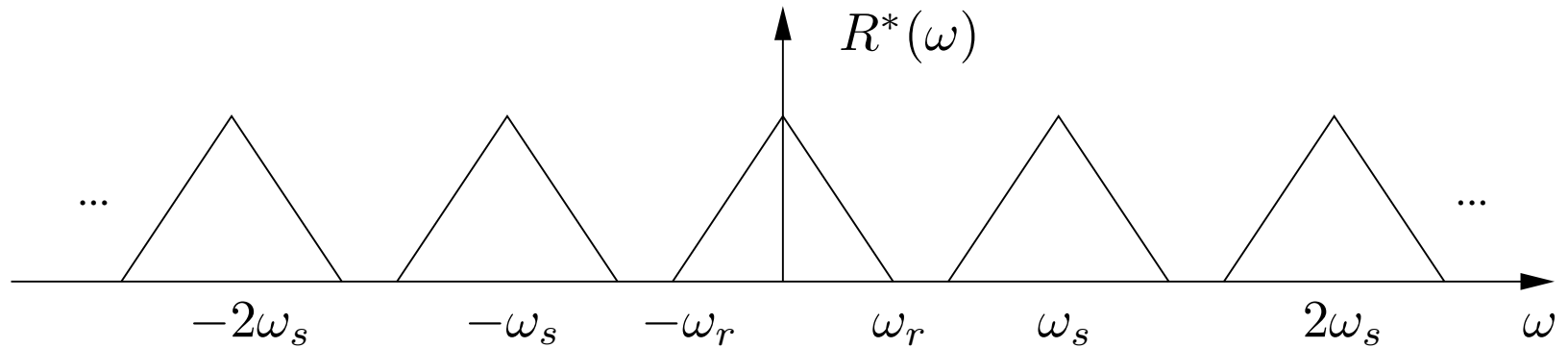
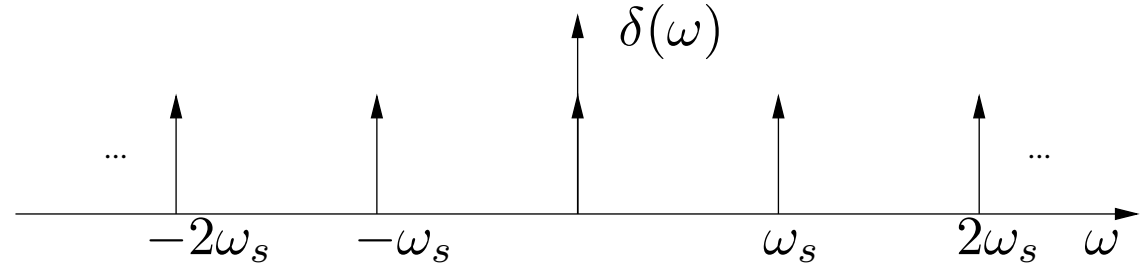
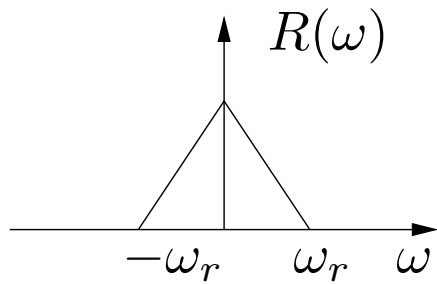
$$R^*(s) = \frac{1}{T} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} r(t) e^{jn\omega_s t} e^{-st} dt$$

que resulta

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



Aliasing



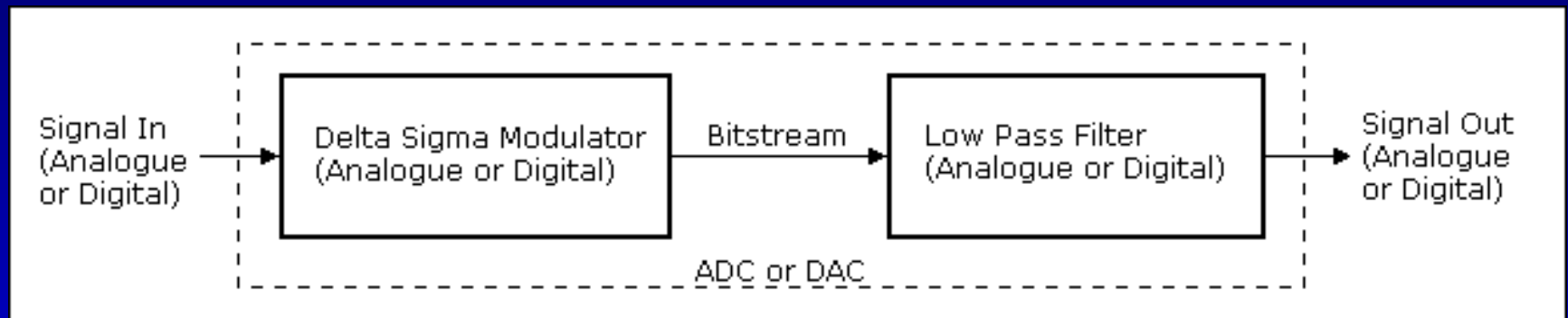


Aliasing

- 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 ω_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

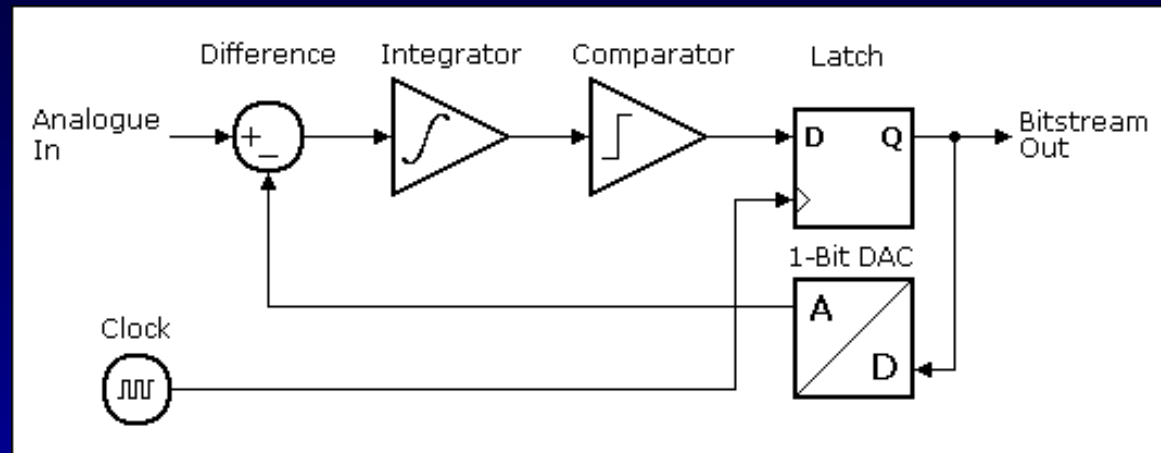


Filtro Passa-Baixas

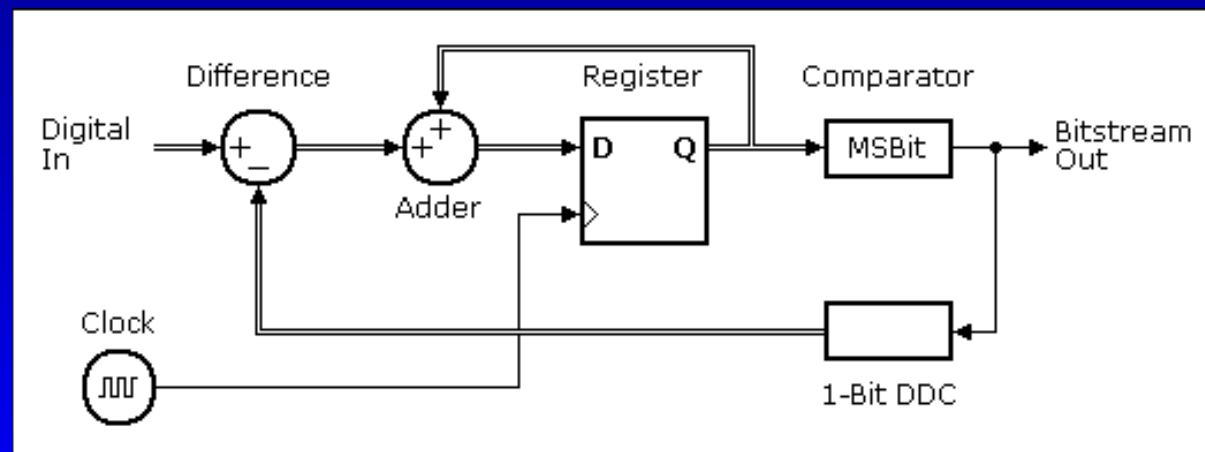
- O valor convertido é o valor médio do *bitstream*
- O *bitstream* é como se fosse um sinal com informação em baixa frequência com bastante ruído nas frequências altas

Modulador $\Sigma\Delta$

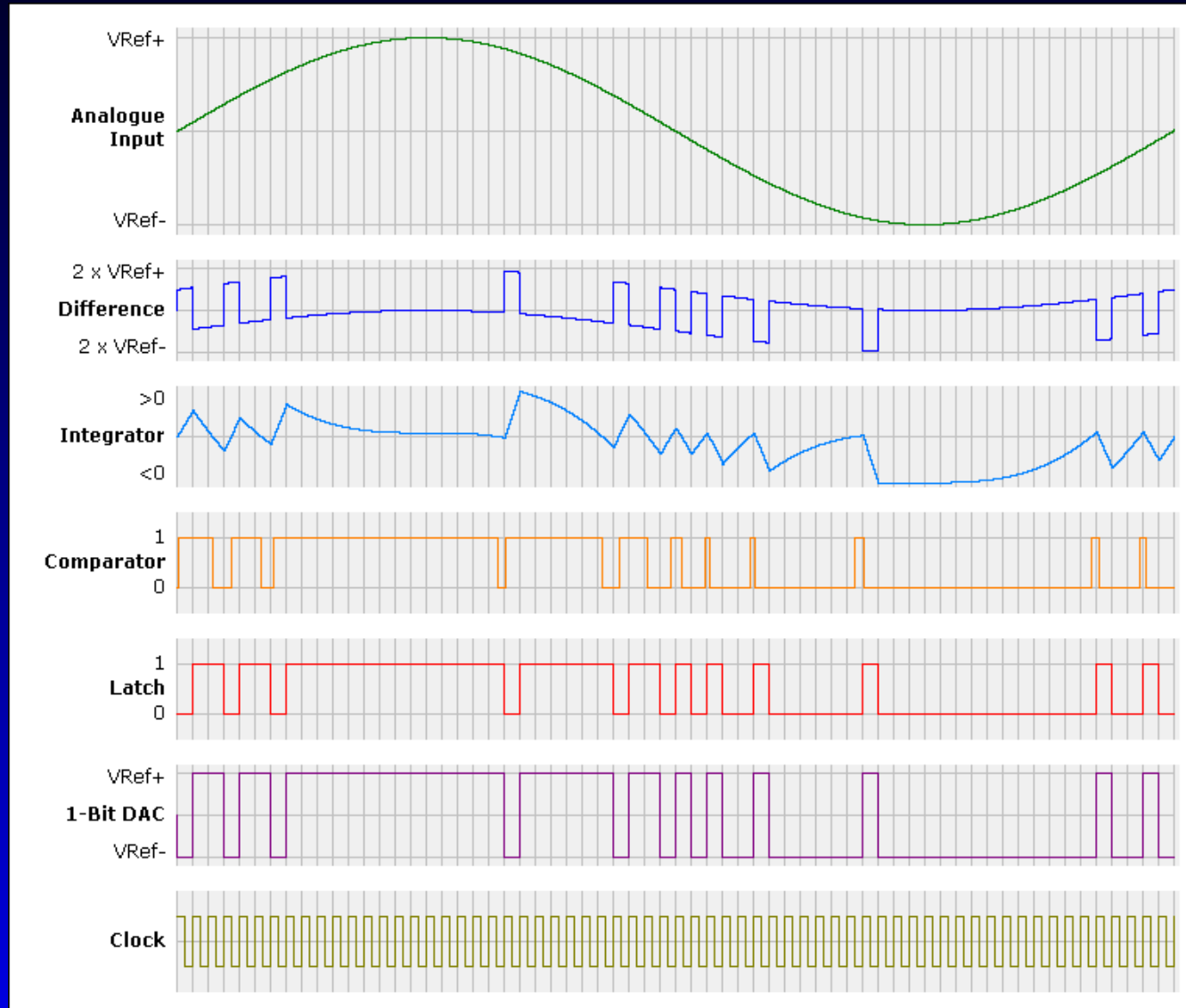
- Analógico



- Digital

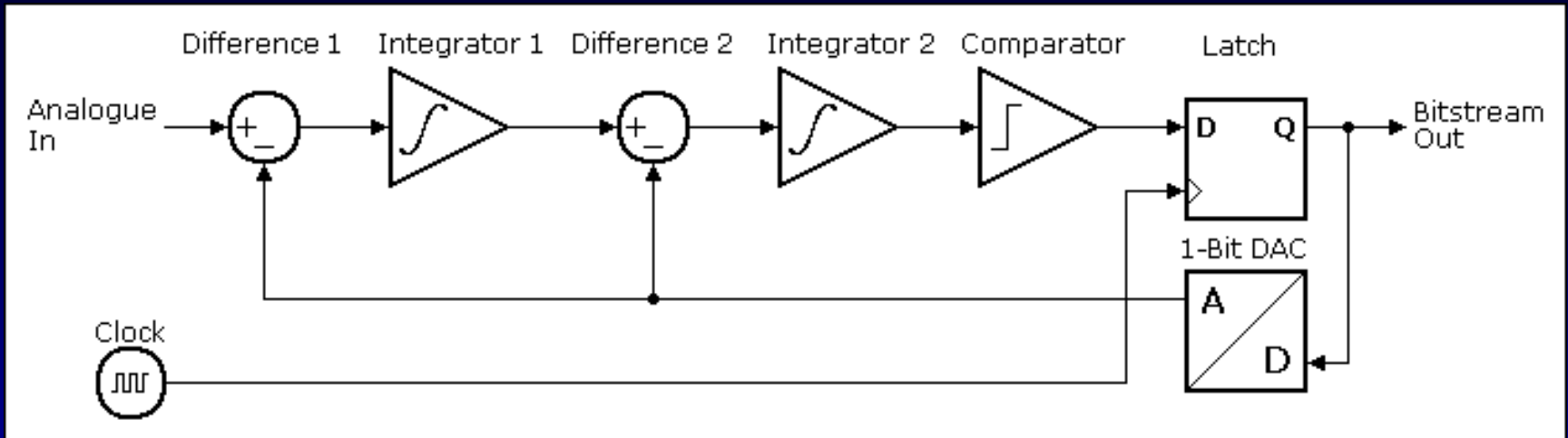


Sinais (Modulador de 1ª Ordem)



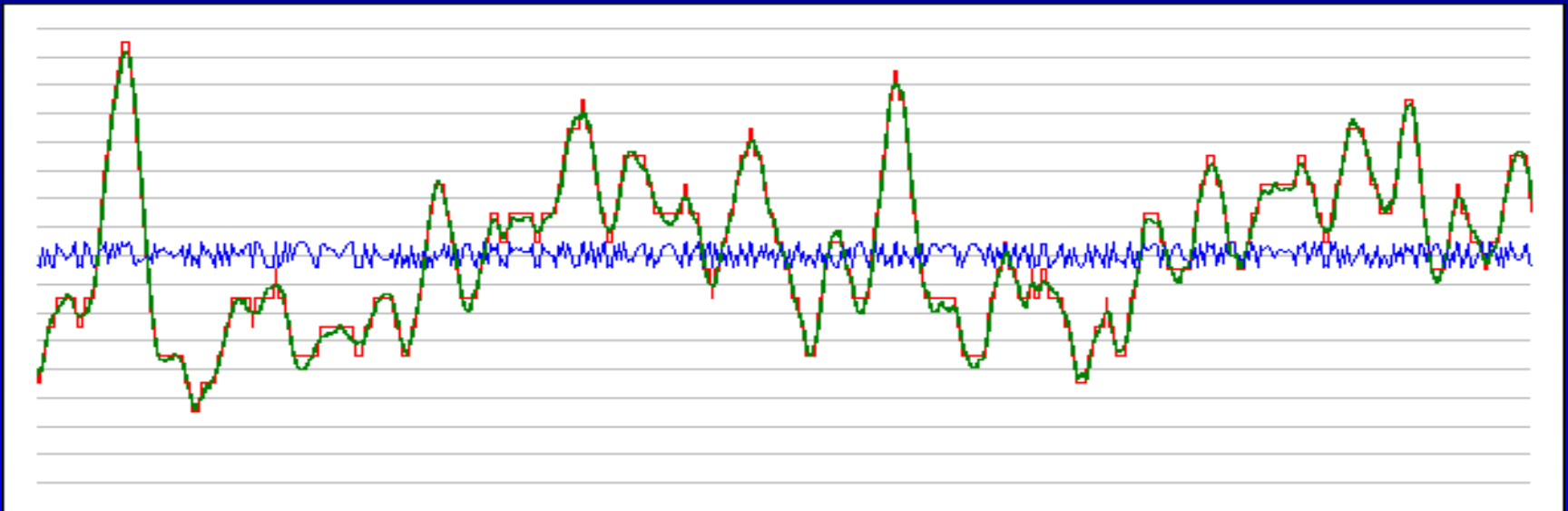
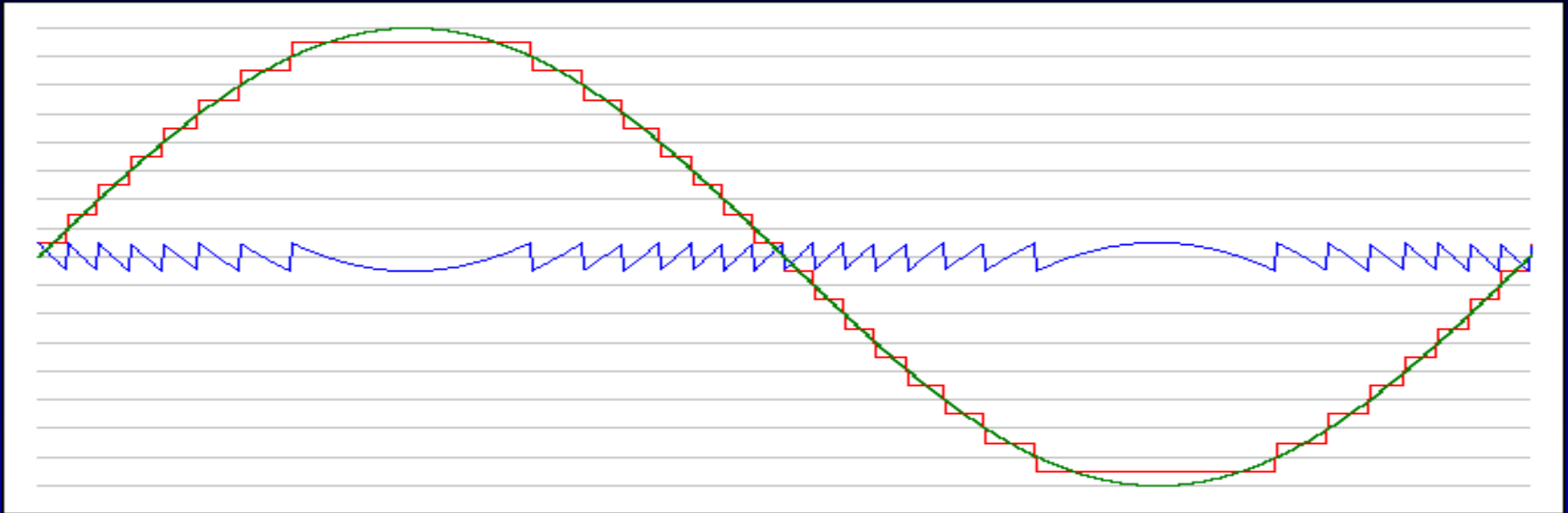
- *Clock* 64 vezes a frequência do sinal

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

