

Conversores AD e DA

Prof. Ilan Sousa Correa

Universidade Federal do Pará (UFPA)

Instituto de Tecnologia (ITEC)

Faculdade de Eng. da Computação e Telecomunicações (FCT)

Conversores AD e DA

Introdução;

ADC: Amostragem; Quantização e codificação

DAC: Reconstrução ideal de sinais amostrados; Reconstrução prática de sinais amostrados; Circuito exemplo; Exemplo no Tina

Conversores AD e DA

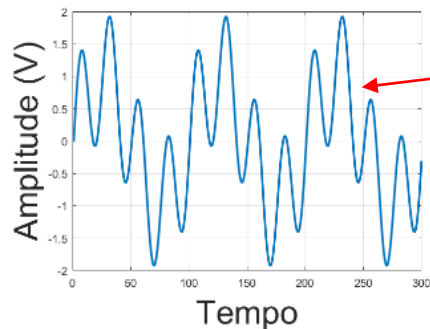
Introdução

- Visão geral da conversão Analógico-Digital (AD)
 - O que é:
 - Representação digital de grandeza analógica.
 - Representação em tempo e amplitude discretos (digital) de um sinal de tempo e amplitude contínuos (analógico).
 - É composta de:
 - Amostragem e quantização;
 - Alguns autores dividem a quantização em mapeamento e codificação.

Conversores AD e DA

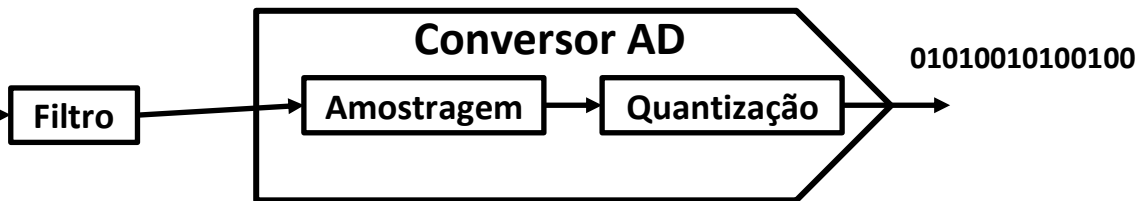
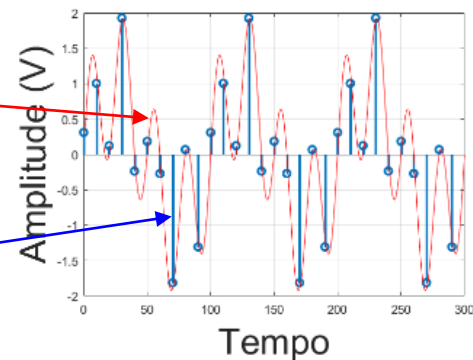
Introdução

- Visão geral da conversão Analógico-Digital (AD)
 - Exemplo: digitalização de um sinal de áudio



Sinal original

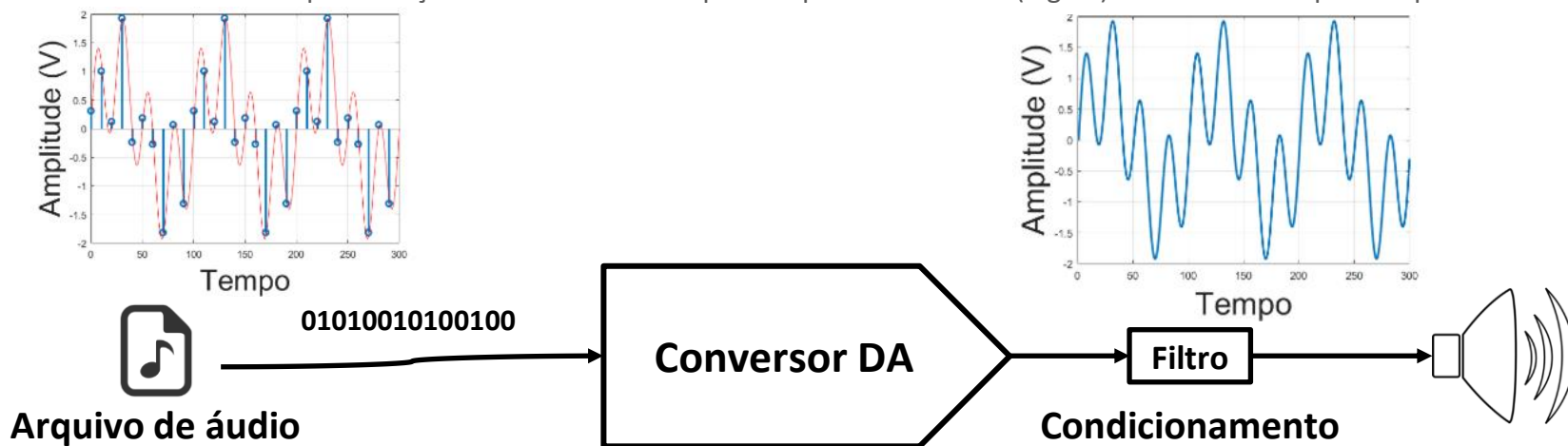
Amostras do sinal



Conversores AD e DA

Introdução

- Visão geral da conversão Digital-analógico (DA)
 - O que é:
 - Conversão de uma informação digital para uma forma analógica.
 - Representação em de sinal de tempo e amplitude discretos (digital) em sinal de tempo e amplitude contínuos

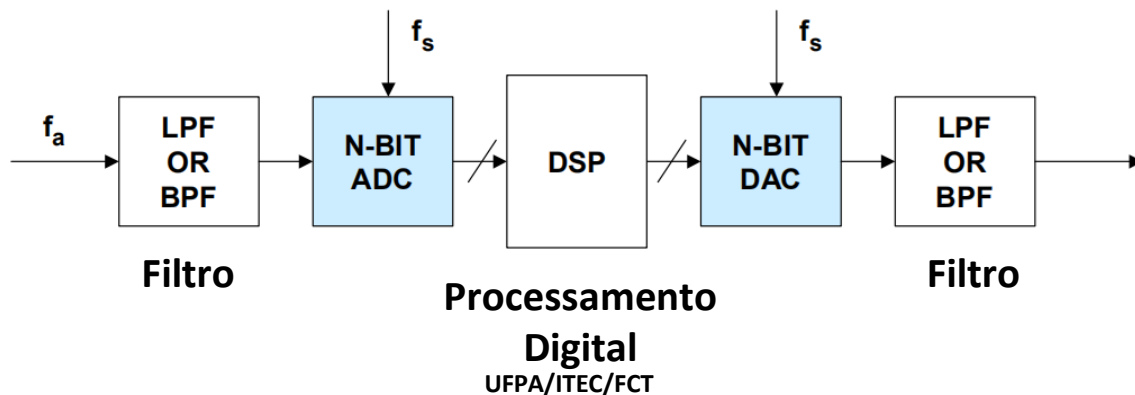


Conversores AD e DA

LPF \Rightarrow Low-pass filter (filtro passa-baixas)
BPF \Rightarrow bandpass filter (filtro passa-banda)
ADC \Rightarrow Analog-to-digital converter (conversor AD)
DAC \Rightarrow Digital-to-analog converter (conversor DA)
DSP \Rightarrow Digital signal processing (processamento digital de sinais)

Introdução

- Visão geral das conversões Analógico-Digital (AD) e Digital-Analógico (DA)
 - Aplicações
 - Processamento digital de sinais analógicos;
 - Sensoriamento, telecomunicações, áudio, etc.
 - Exemplo de processamento digital de sinais analógicos



Conversores AD e DA

Amostragem

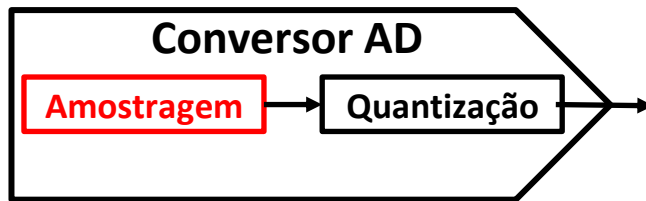
Conversores AD e DA

Amostragem

- Processo no qual um sinal analógico de tempo contínuo é convertido em um sinal de tempo tempo discreto
- Matematicamente

$$x_d(nT_a) = x_a(t) \times p(t) \quad p(t) = \sum_{-\infty}^{\infty} \delta(t - nT_a)$$

- $x_d(t)$ é um trem de impulsos com pesos iguais às amplitudes de $x_a(t)$ nos instantes nT_a



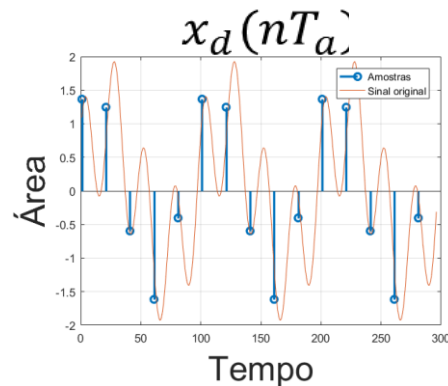
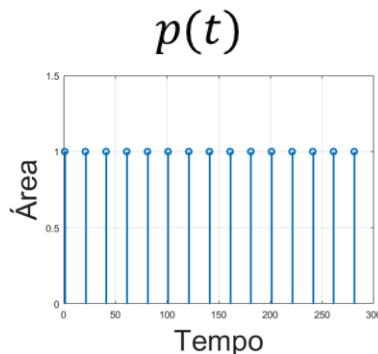
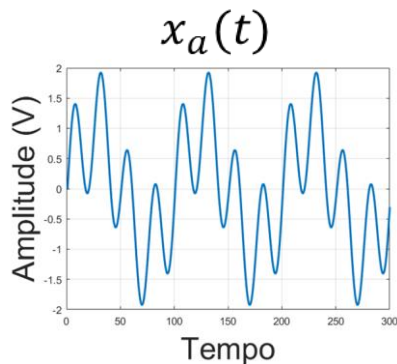
Conversores AD e DA

Amostragem

- Processo no qual um sinal analógico de tempo contínuo é convertido em um sinal de tempo tempo discreto
- Matematicamente

$$x_d(nT_a) = x_a(t) \times p(t) \quad p(t) = \sum_{-\infty}^{\infty} \delta(t - nT_a)$$

- $x_d(t)$ é um trem de impulsos com pesos iguais às amplitudes de $x_a(t)$ nos instantes nT_a



Conversores AD e DA

Amostragem

- No domínio da frequência
 - $p(t)$ é um sinal periódico e pode ser representado pela série de Fourier

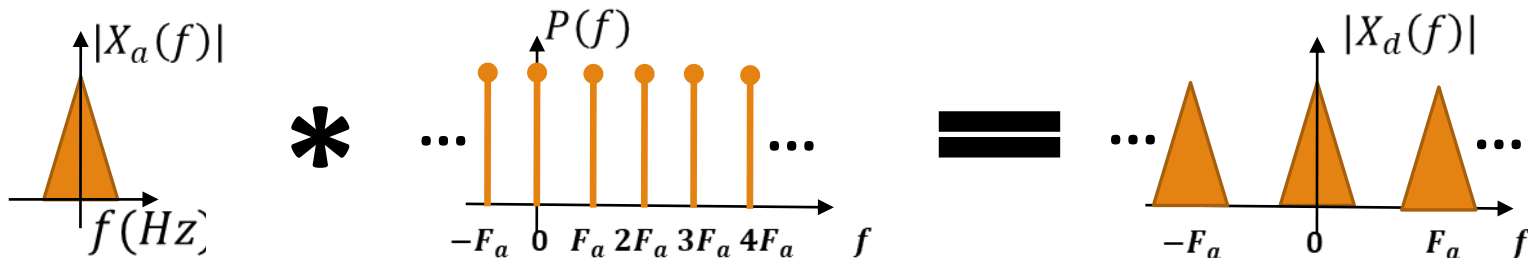
$$c_n = \frac{1}{T_a} \int_{T_s} p(t) e^{-\frac{jk2\pi t}{T_s}} dt = \frac{1}{T_a}$$

$$p(t) = \sum_{\infty} c_n e^{\frac{jn2\pi t}{T_a}} = \frac{1}{T_a} \sum e^{\frac{j2\pi nt}{T_a}}$$

$$P(f) = \frac{2\pi}{T_a} \sum \delta\left(\frac{2\pi}{T_a} - \frac{2\pi k}{T_a}\right)$$

$p(t)$ é periódico, logo pode ser representado no domínio da frequência pela Série de Fourier

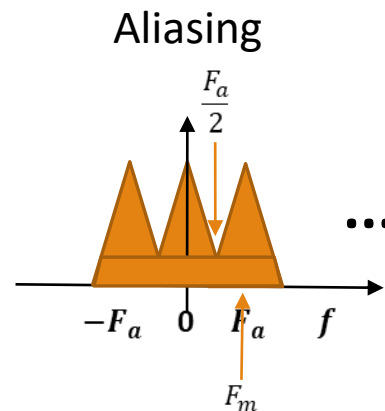
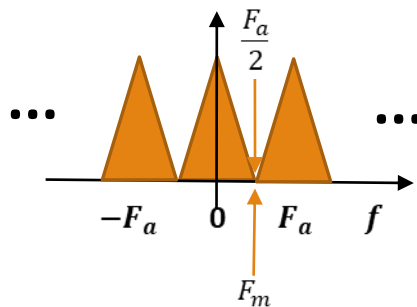
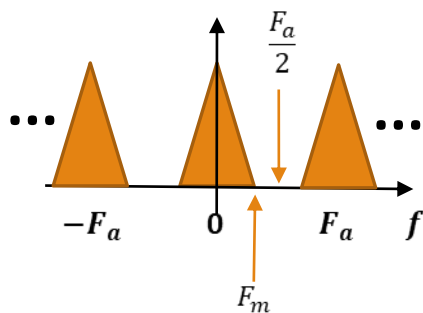
- Multiplicação no tempo \Leftrightarrow Convolução na frequência



Conversores AD e DA

Amostragem

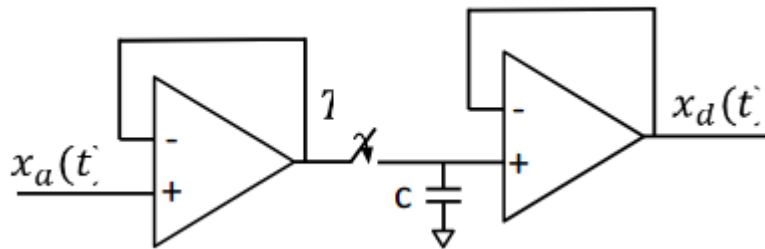
- Teorema da amostragem de Nyquist-Shannon
 - Um sinal analógico, limitado em banda, que foi amostrado, pode ser recuperado a partir de uma sequência infinita de amostras se a frequência de amostragem (F_a) for maior do que o dobro da maior frequência do sinal (F_m).
 - Graficamente:



Conversores AD e DA

Amostragem

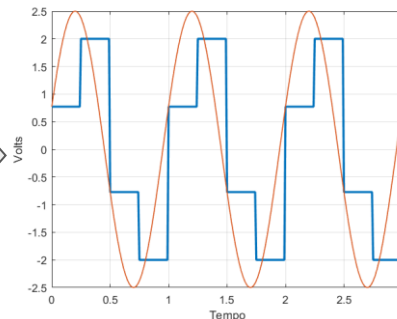
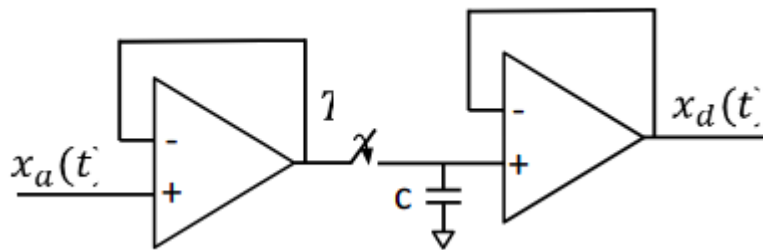
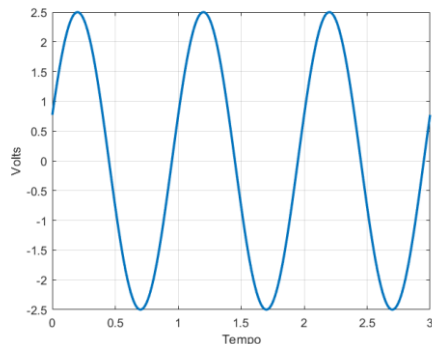
- Exemplo de circuito eletrônico para amostragem (sample and hold)
 - Seguidor de tensão de entrada → alta impedância para isolar este circuito da fonte do sinal
 - Uma chave (transistor) é fechada periodicamente pelo clock de amostragem do conversor
 - Com a chave fechada, o capacitor C é carregado e retém o valor de tensão do sinal de entrada
 - O segundo seguidor de tensão possui alta impedância e evita que o capacitor descarregue, mantendo o valor de tensão amostrado.



Conversores AD e DA

Amostragem

- Exemplo de circuito eletrônico para amostragem (sample and hold)
 - Seguidor de tensão de entrada → alta impedância para isolar este circuito da fonte do sinal
 - Uma chave (transistor) é fechada periodicamente pelo clock de amostragem do conversor
 - Com a chave fechada, o capacitor C é carregado e retém o valor de tensão do sinal de entrada
 - O segundo seguidor de tensão possui alta impedância e evita que o capacitor descarregue, mantendo o valor de tensão amostrado.



Conversores AD e DA

Amostragem

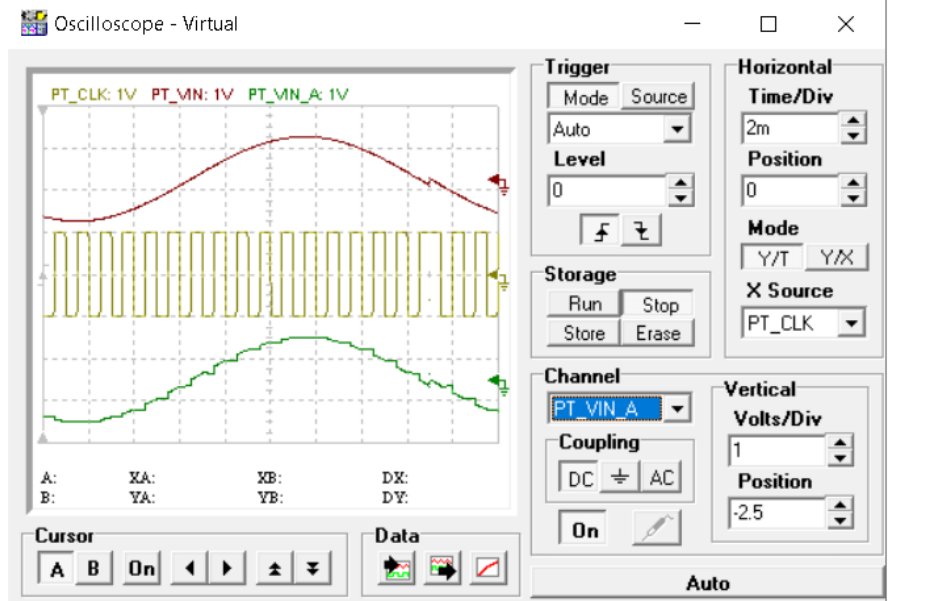
- Exemplo de circuito eletrônico para amostragem (sample and hold)
 - Seguidor de tensão de entrada → alta impedância para isolar este circuito da fonte do sinal
 - Uma chave (transistor) é fechada periodicamente pelo clock de amostragem do conversor
 - Com a chave fechada, o capacitor C é carregado e retém o valor de tensão do sinal de entrada
 - O segundo seguidor de tensão possui alta impedância e evita que o capacitor descarregue, mantendo o valor de tensão amostrado.

EXEMPLO NO TINA

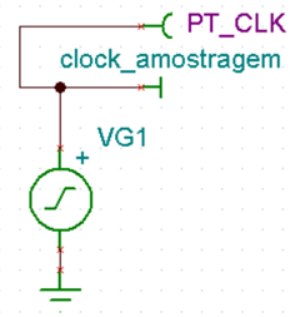
Conversores AD e DA

Amostragem

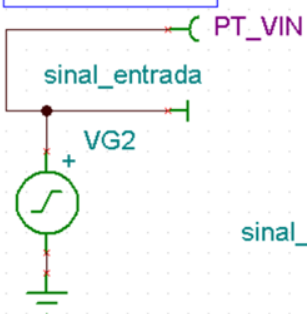
- Exemplo de circuito eletrônico para amostragem (sample and hold) \Rightarrow TINA



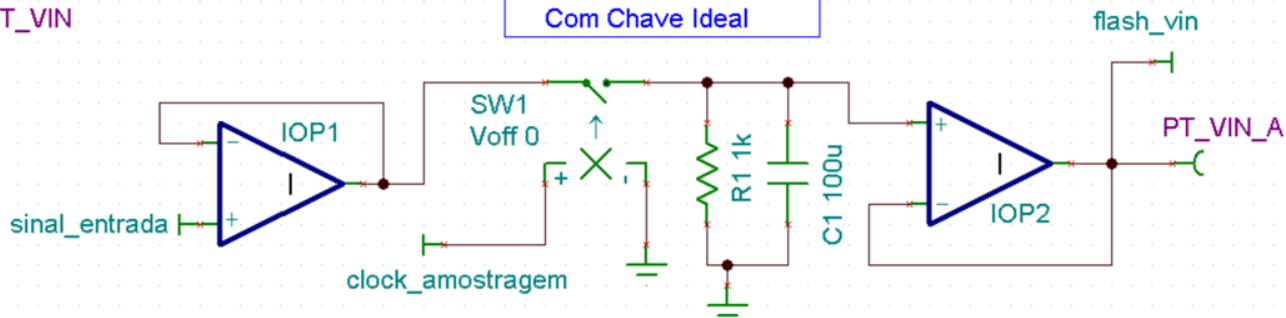
Circuito gerador de clock
(Oscilador)



Sinal de Entrada



Circuito Sample and Hold
Com Chave Ideal



Conversores AD e DA

Quantização e codificação

Conversores AD e DA

Quantização e codificação

- É o processo de mapeamento das tensão do sinal amostrado $x_d(nT_a)$ em valores de tensão específicos e, então, em valores binários
 - Pela definição de livros didáticos, um **sinal digital** é um sinal **de tempo e amplitude discretos**
 - $x_d(nT_a)$ é de tempo discreto, mas sua amplitude pode assumir qualquer valor de tensão (ou corrente)
- Quantização gera o sinal digital $x_d[n]$
 - Sinal digital indicado com $[]$ ao invés de $()$ e T_a foi omitido.
 - Quantização tem valores de tensão pré-definidos e máximos e mínimos

Conversores AD e DA

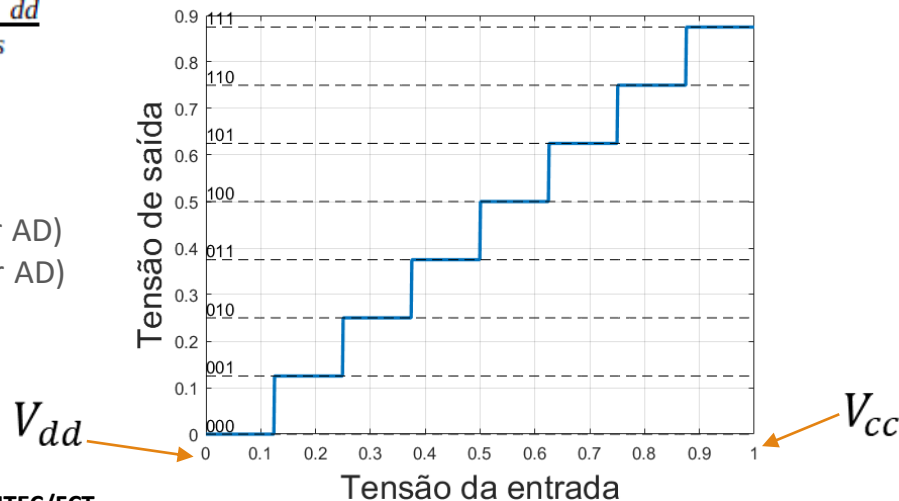
Quantização e codificação

- É o processo de mapeamento das tensão do sinal amostrado $x_d(nT_a)$ em valores de tensão específicos e, então, em valores binários
 - Cada valor binário corresponde a um dos níveis de tensão pré-estabelecidos

$$\Delta = \frac{V_{cc} - V_{dd}}{2^{\#bits}}$$

Exemplo

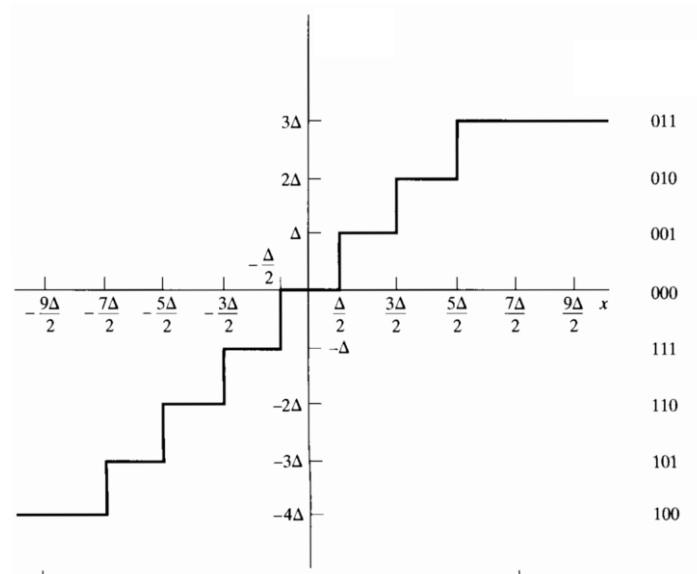
- $V_{cc}=1V$ (máxima tensão permitida na entrada do conversor AD)
- $V_{dd}=0V$ (mínima tensão permitida na entrada do conversor AD)
- $\#bits = 3$
- $\Delta=0.125V$



Conversores AD e DA

Quantização e codificação

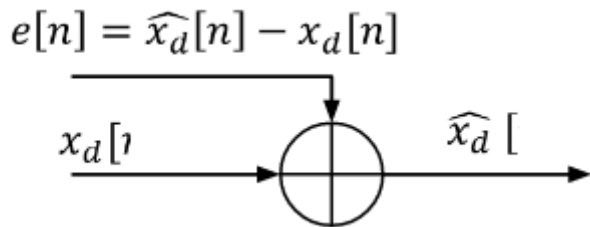
- É o processo de mapeamento das tensão do sinal amostrado $x_d(nT_a)$ em valores de tensão específicos e, então, em valores binários
- Outro exemplo
 - Valores múltiplos de $\Delta/2$ são limiares
 - Suportados sinais com níveis de tensão positivos ou negativos
 - Codificação em complemento a 2: -4 a 3 em binário



Conversores AD e DA

Quantização e codificação

- Relação sinal-ruído de quantização
- Aproximação de $x_d(nT_a)$ por $Q\{x_d(nT_a)\}$, onde $Q\{.\}$ indica a quantização do argumento
 - Resulta em um erro
 - Em geral uniformemente distribuído em $-\Delta/2$ a $\Delta/2$
 - Relação sinal-ruído $RSR_q = P_{xa} / P_e$ (potência do sinal pela potência do erro)
 - Potência do erro: $P_e = \Delta^2/12$

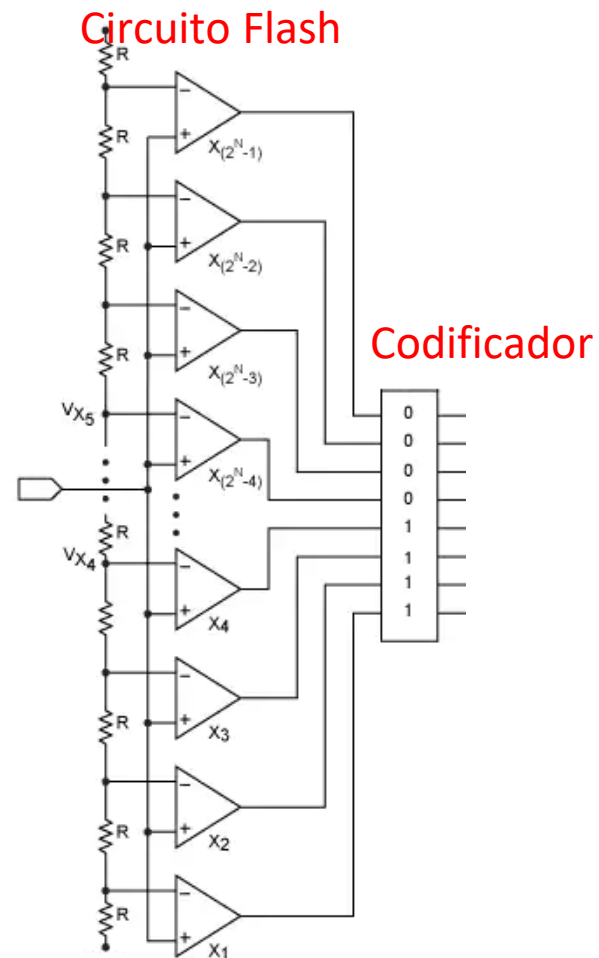


Conversores AD e DA

Quantização e codificação

- Circuito Flash para quantização de sinais amostrados
- Conversor AD Flash
 - Utiliza $2^{n_{\text{Bits}}}$ comparadores analógicos
 - Quanto maior a amplitude do sinal, mais comparadores apresentarão nível lógico alto na sua saída
 - A comparação é feita com tensões fornecidas por resistores em série conectados entre V_{cc} e V_{dd}
 - Exemplo: 4 bits
 - $(V_{cc} - V_{dd})/8$
 - $(V_{cc} - V_{dd})3/8$
 - $(V_{cc} - V_{dd})5/8$
 - $(V_{cc} - V_{dd})7/8$

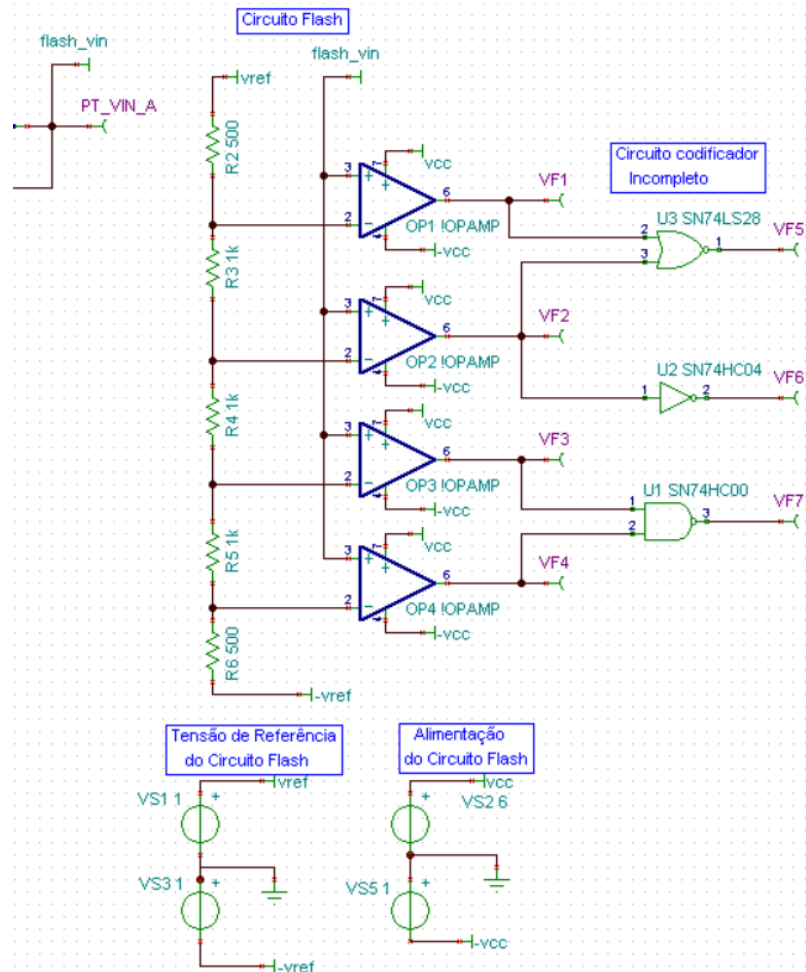
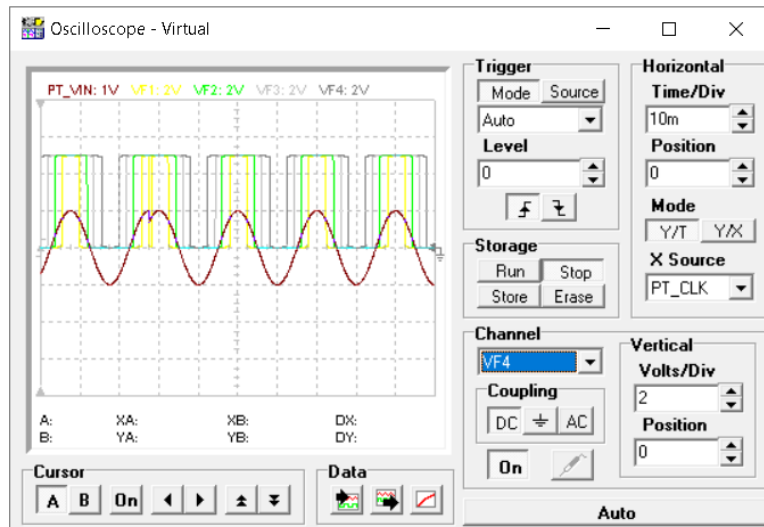
EXEMPLO NO TINA



Conversores AD e DA

Quantização e codificação

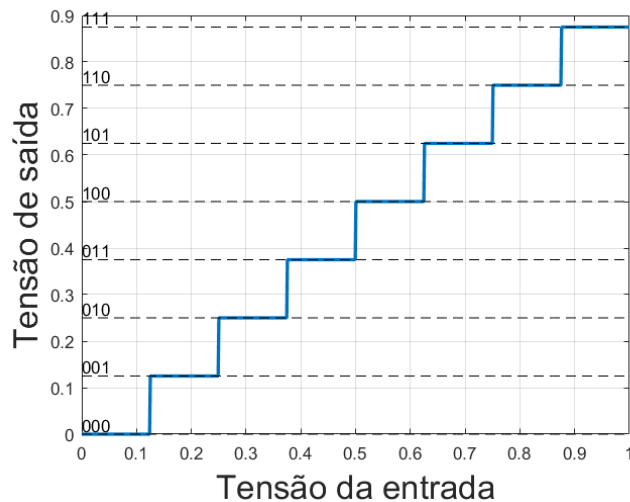
- Circuito Flash para quantização de sinais amostrados
- Conversor AD Flash



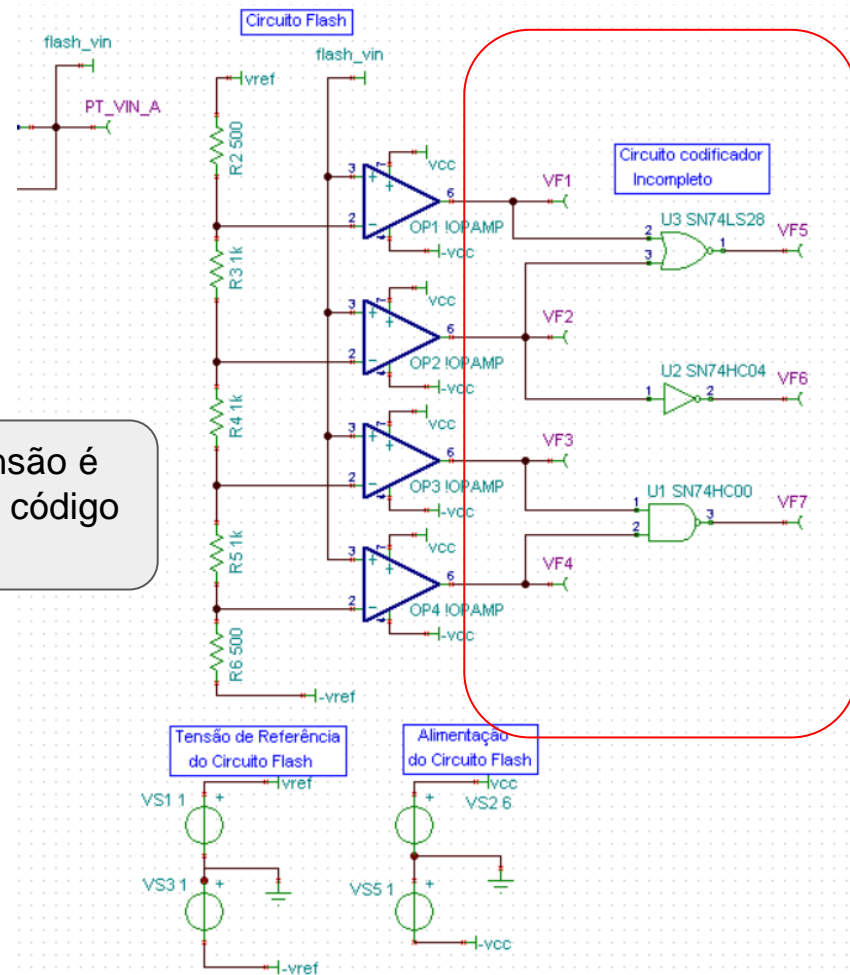
Conversores AD e DA

Quantização e codificação

- Codificação



Cada nível de tensão é mapeado para um código binário



Conversores AD e DA

Saída do circuito Flash para 3 bits \Rightarrow 8 níveis, e seu código

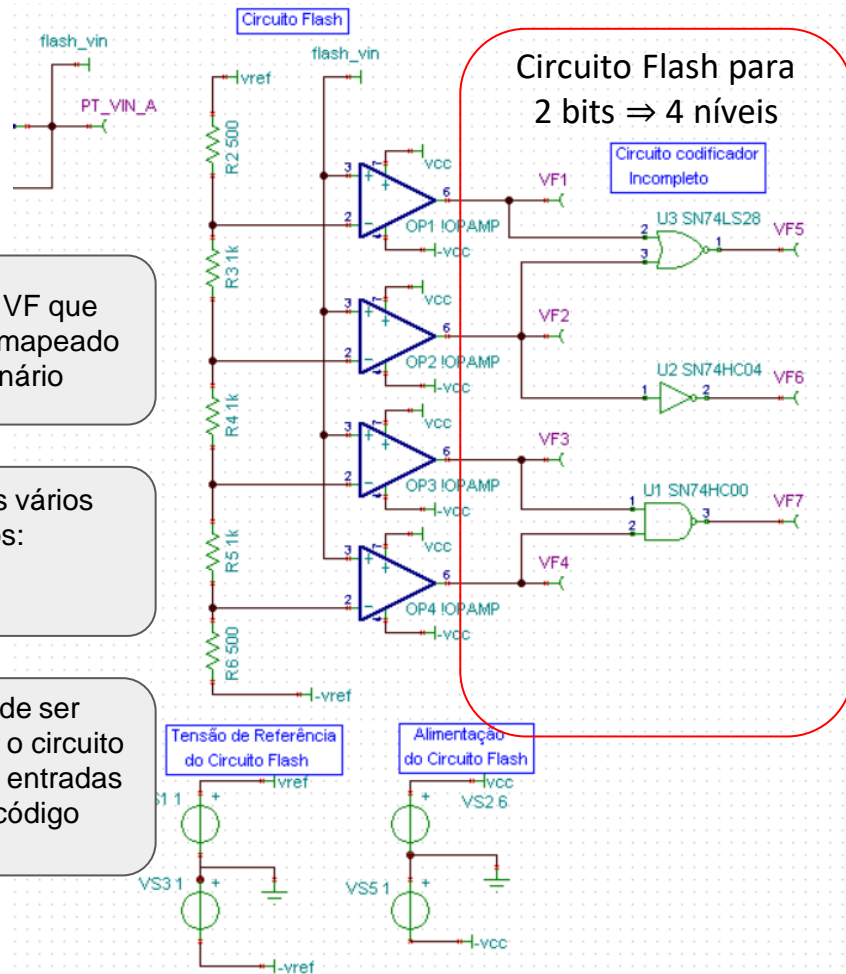
VF								Código binário #1	Código binário #2
8	7	6	5	4	3	2	1		
0	0	0	0	0	0	0	0	X	X
0	0	0	0	0	0	0	1	000	100
0	0	0	0	0	0	1	1	001	101
0	0	0	0	0	1	1	1	010	110
0	0	0	0	1	1	1	1	011	111
0	0	0	1	1	1	1	1	100	000
0	0	1	1	1	1	1	1	101	001
0	1	1	1	1	1	1	1	110	010
1	1	1	1	1	1	1	1	111	011

Prof. Ilan Correa

O número de saídas VF que apresenta nível alto é mapeado para um código binário

Podem ser utilizados vários códigos binários:
#1 numeração natural
#2 complemento a 2

Mapa Karnaugh pode ser utilizado para construir o circuito lógico que converte as entradas VF em nos bits do código adotado



Conversores AD e DA

Introdução;

ADC: Amostragem; Quantização e codificação

DAC: Reconstrução ideal de sinais amostrados; Reconstrução prática de sinais amostrados; Circuito exemplo; Exemplo no Tina

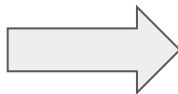
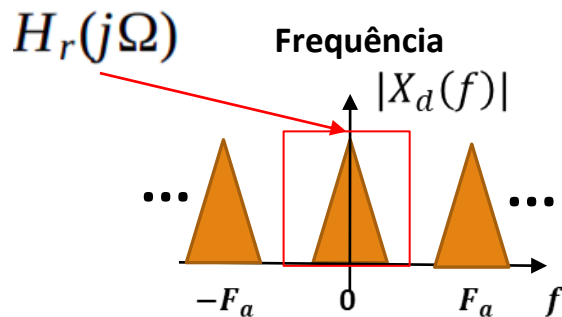
Conversores AD e DA

Reconstrução ideal de sinais amostrados

Conversores AD e DA

Reconstrução ideal de sinais amostrados

- Reconstrução de um sinal de banda limitada a partir de suas amostras
 - As amostras de um sinal de tempo contínuo com banda limitada tomadas a uma frequência adequada são suficientes para representar o sinal com exatidão
 - O sinal pode ser recuperado a partir das amostras conhecendo-se o período de amostragem
 - A amostragem gera réplicas do sinal deslocadas na frequência
 - O sinal analógico $x_a(t)$ pode ser recuperado a partir de $x_d(nT_a)$ com um filtro passa-baixas ideal



Reconstrução de X_a a partir de X_d

Multiplicação na frequência

Convolução no tempo

$$X_d(j\Omega) \times H_r(j\Omega) \quad \text{Frequência}$$

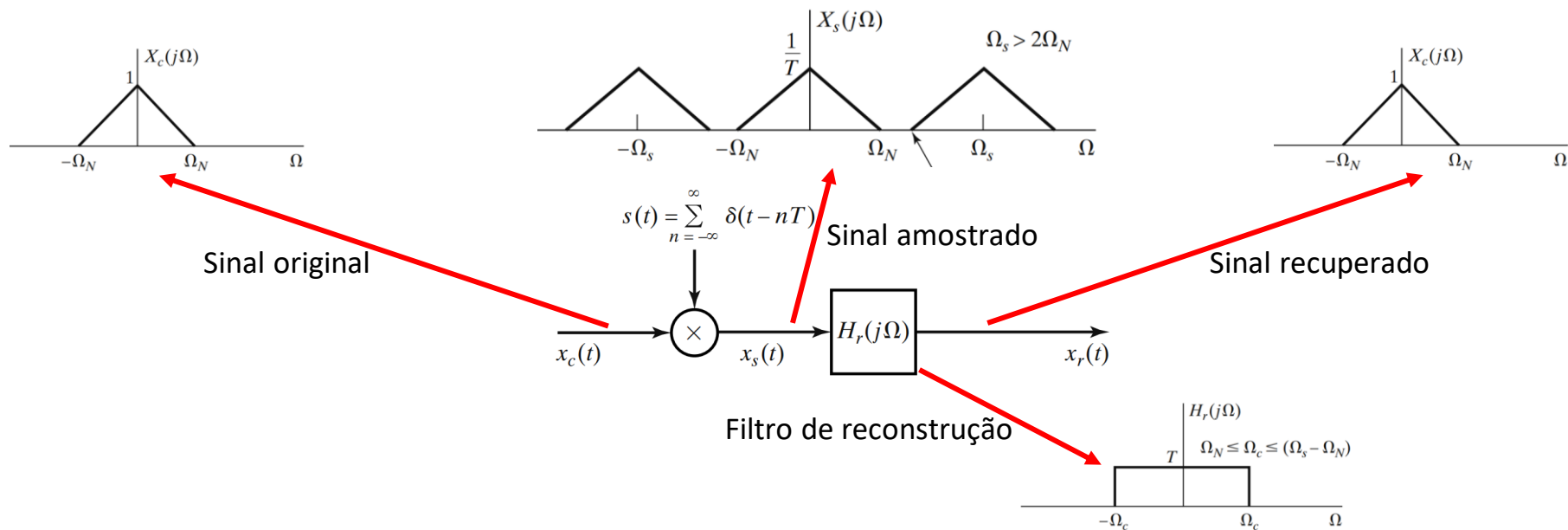
$$x_d(t) * h_r(t) \quad \text{Tempo}$$

Conversores AD e DA

Domínio da frequência

Reconstrução ideal de sinais amostrados

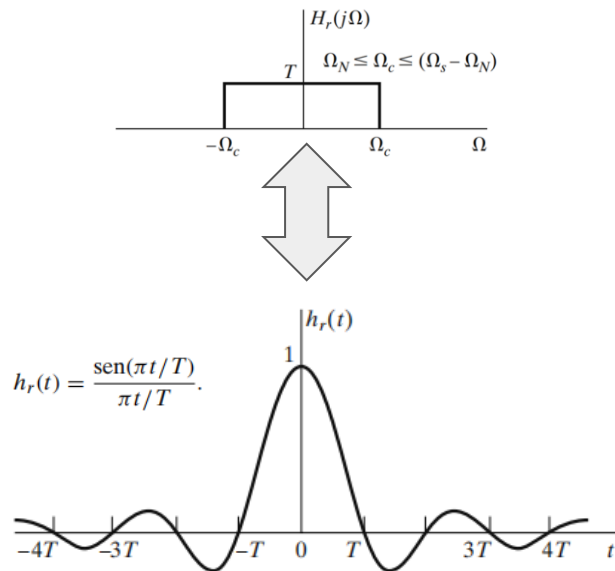
- Reconstrução de um sinal de banda limitada a partir de suas amostras



Conversores AD e DA

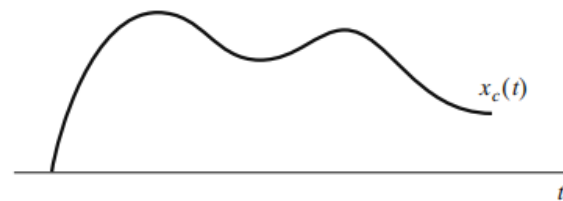
Reconstrução ideal de sinais amostrados

- Reconstrução de um sinal de banda limitada a partir de suas amostras



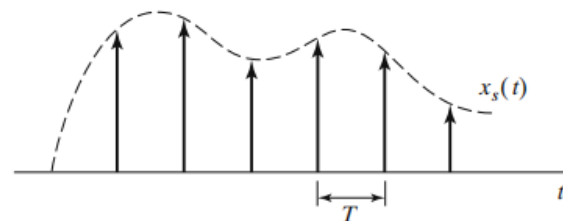
$$x_r(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x[n]h_r(t - nT).$$

Sinal original



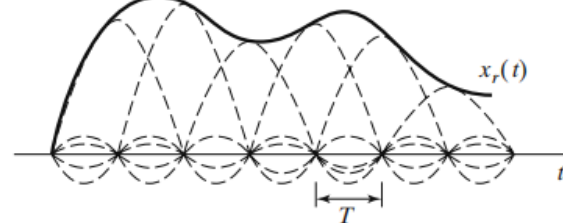
(a)

Sinal amostrado



(b)

Sinal reconstruído

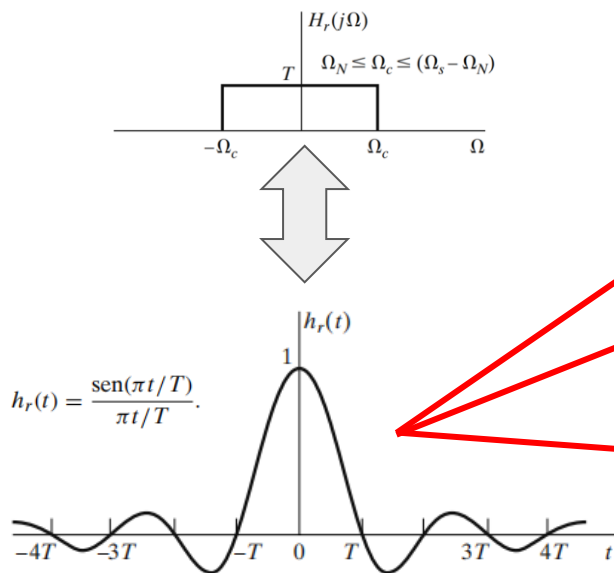


(c)

Conversores AD e DA

Reconstrução ideal de sinais amostrados

- Reconstrução de um sinal de banda limitada a partir de suas amostras



Duração infinita

Não causal

Não realizável

Conversores AD e DA

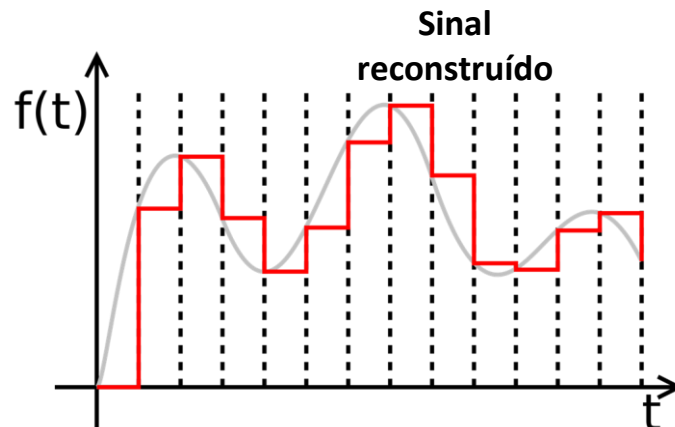
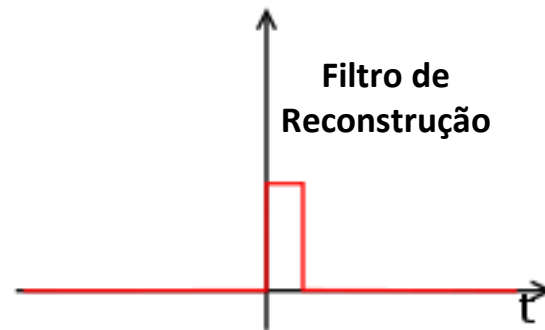
Reconstrução prática de sinais amostrados

Conversores AD e DA

Reconstrução prática de sinais amostrados

- Retentor de ordem zero
 - Zero-order hold
 - Convolução com uma função rect no domínio do tempo
 - Contrastando com a reconstrução ideal, na qual utiliza-se uma função rect no domínio da frequência

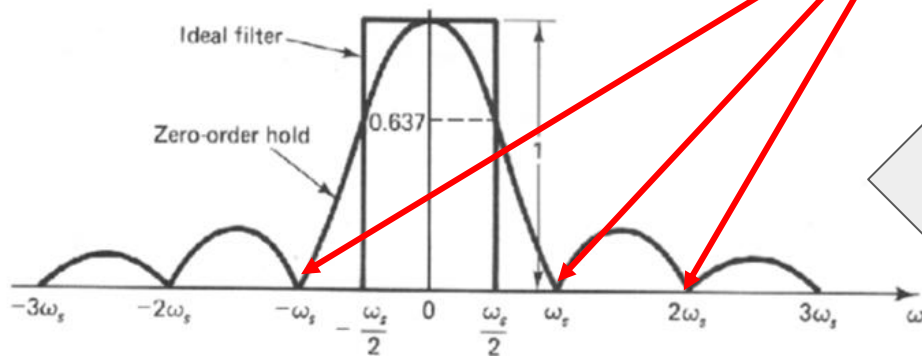
$$x_{\text{ZOH}}(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x[n] \cdot \text{rect}\left(\frac{t - T/2 - nT}{T}\right)$$



Conversores AD e DA

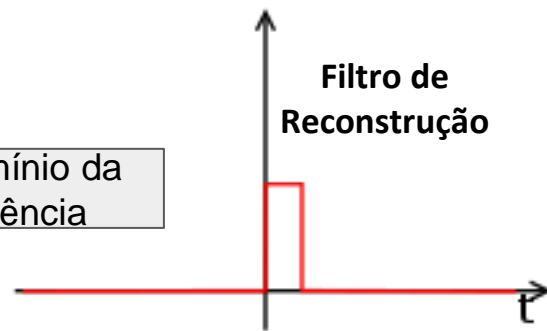
Reconstrução prática de sinais amostrados

- Retentor de ordem zero
 - Zero-order hold
 - Convolução com uma função rect no domínio do tempo
 - Contrastando com a reconstrução ideal, na qual utiliza-se uma função rect no domínio da frequência



Imagens adicionais não são eliminadas completamente

No domínio da frequência



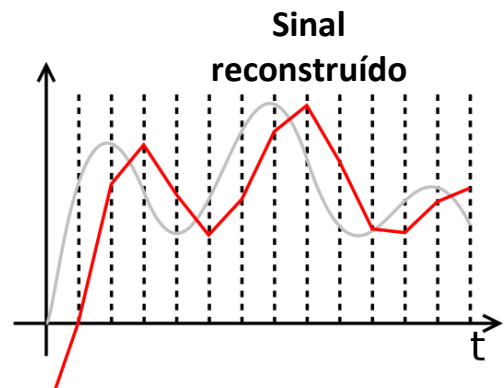
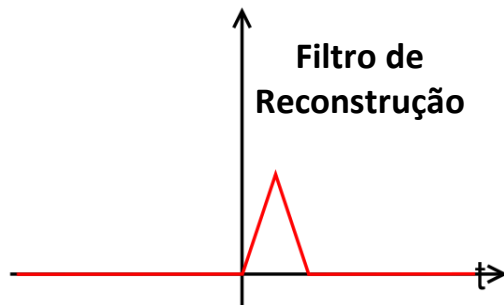
Conversores AD e DA

Reconstrução prática de sinais amostrados

- Retentor de primeira ordem
 - Convolução com uma função triangular no domínio do tempo
 - Contrastando com a reconstrução ideal, na qual utiliza-se uma função rect no domínio da frequência

$$h_{\text{FOH}}(t) = \frac{1}{T} \text{tri} \left(\frac{t}{T} \right) = \begin{cases} \frac{1}{T} \left(1 - \frac{|t|}{T} \right) & \text{if } |t| < T \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

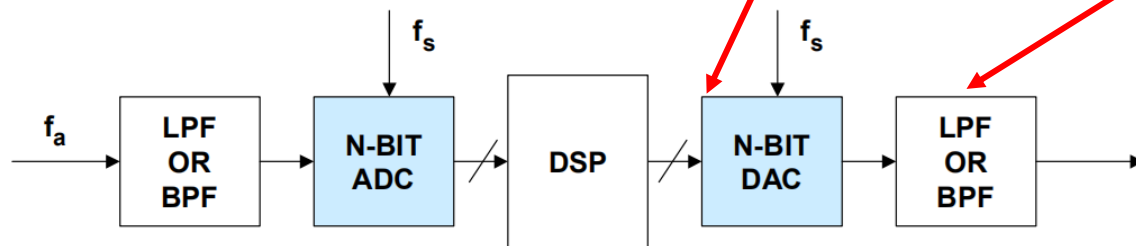
$$x_{\text{FOH}}(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(nT) \text{tri} \left(\frac{t - nT}{T} \right)$$



Conversores AD e DA

Reconstrução prática de sinais amostrados

- Retentor de ordem zero
 - Aplicações
 - Processamento digital de sinais analógicos;
 - Sensoriamento, telecomunicações, áudio, etc.
- Processamento digital de sinais analógicos



**Mapeamento binário para tensão +
Circuito ZOH**

**Filtro adicional para maior
atenuação das imagens (opcional)**

Conversores AD e DA

Circuito exemplo

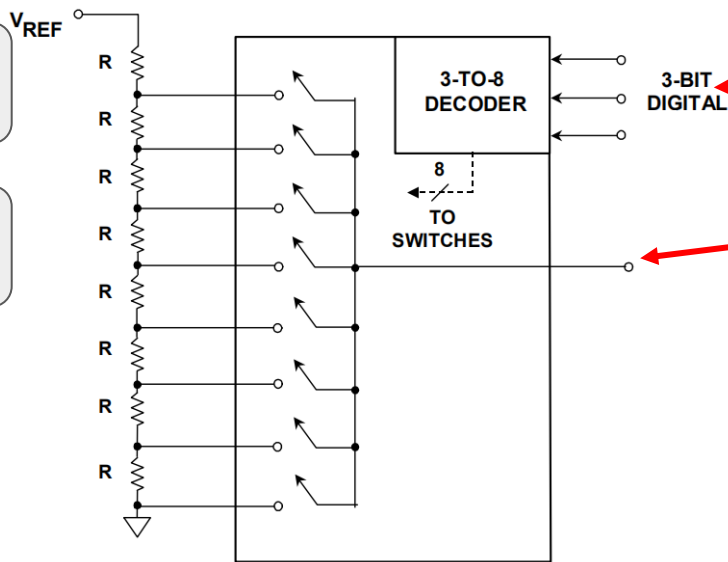
Conversores AD e DA

Circuito exemplo

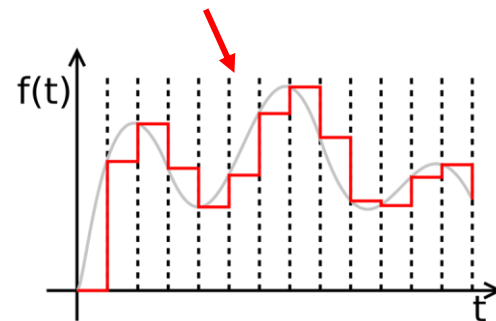
- Divisor Kelvin → “String DAC”

A cada ciclo de clock uma palavra binária é consumida pelo decodificador

Clock não mostrado na figura

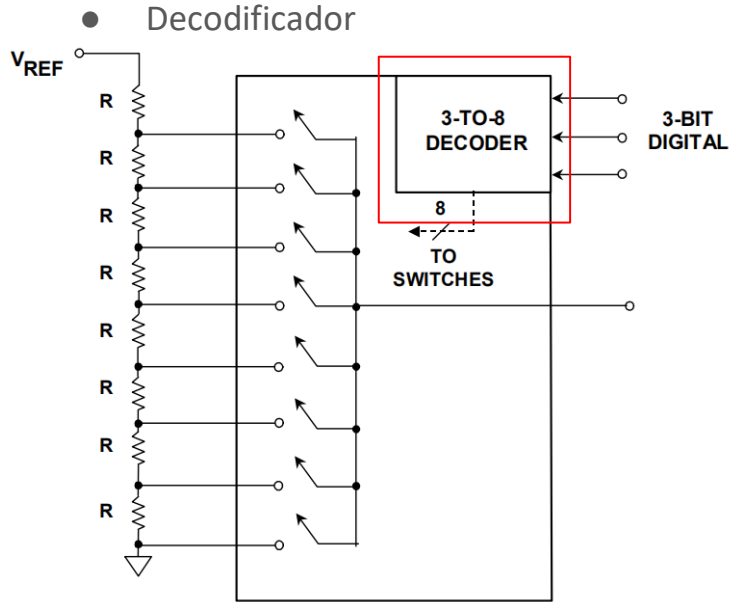


Entrada
Palavra binária



Conversores AD e DA

Circuito exemplo



Código binário #1	Código binário #2	SAÍDA DO DECODIFICADOR							
		8	7	6	5	4	3	2	1
X	X	0	0	0	0	0	0	0	0
000	100	0	0	0	0	0	0	0	1
001	101	0	0	0	0	0	0	1	0
010	110	0	0	0	0	0	1	0	0
011	111	0	0	0	0	1	0	0	0
100	000	0	0	0	1	0	0	0	0
101	001	0	0	1	0	0	0	0	0
110	010	0	1	0	0	0	0	0	0
111	011	1	0	0	0	0	0	0	0

Conversores AD e DA

Exemplo no Tina

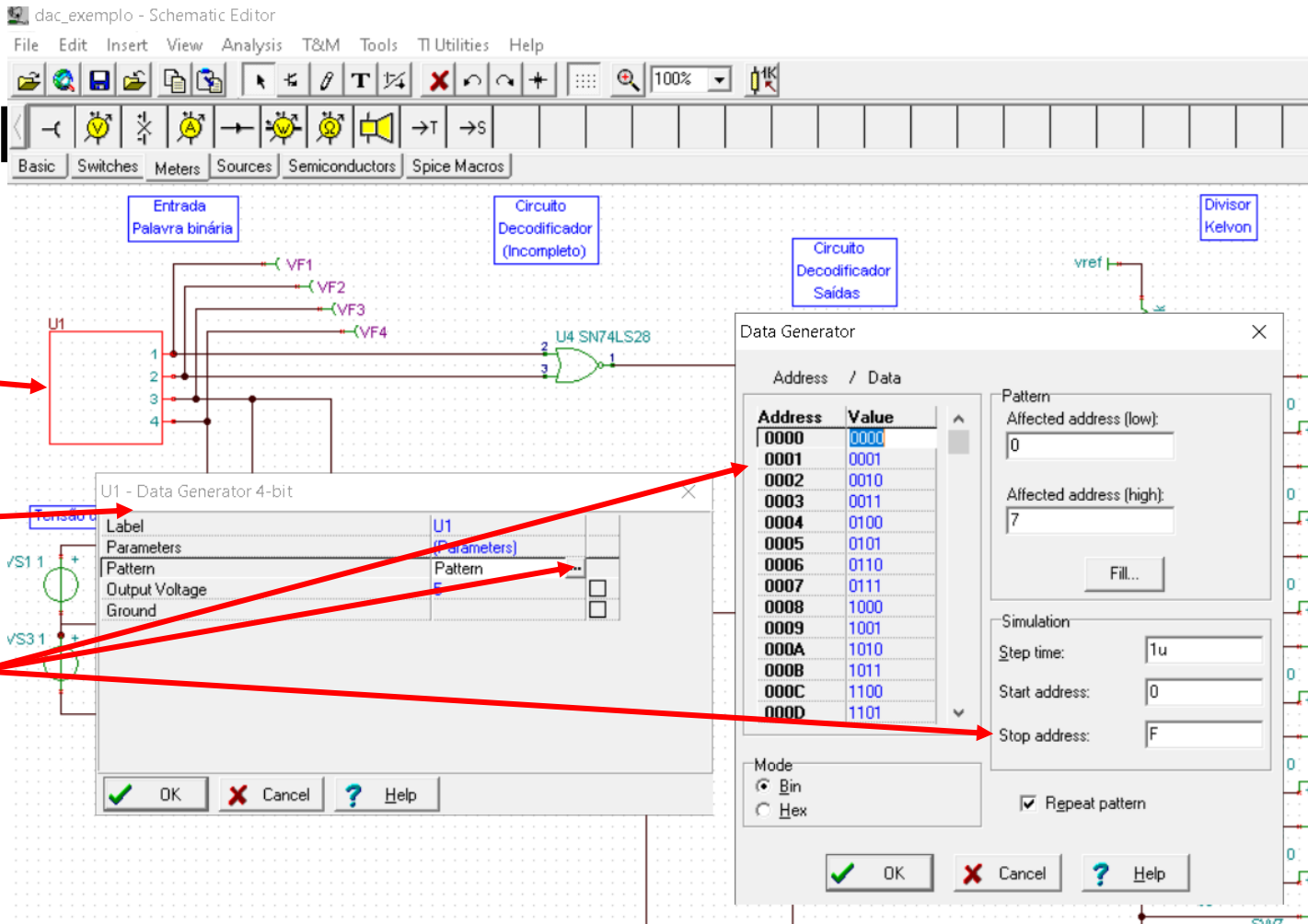
Conversores AI

Exemplo no Tina

Data Generator

Propriedades do Data Generator

Alteração do padrão de saída

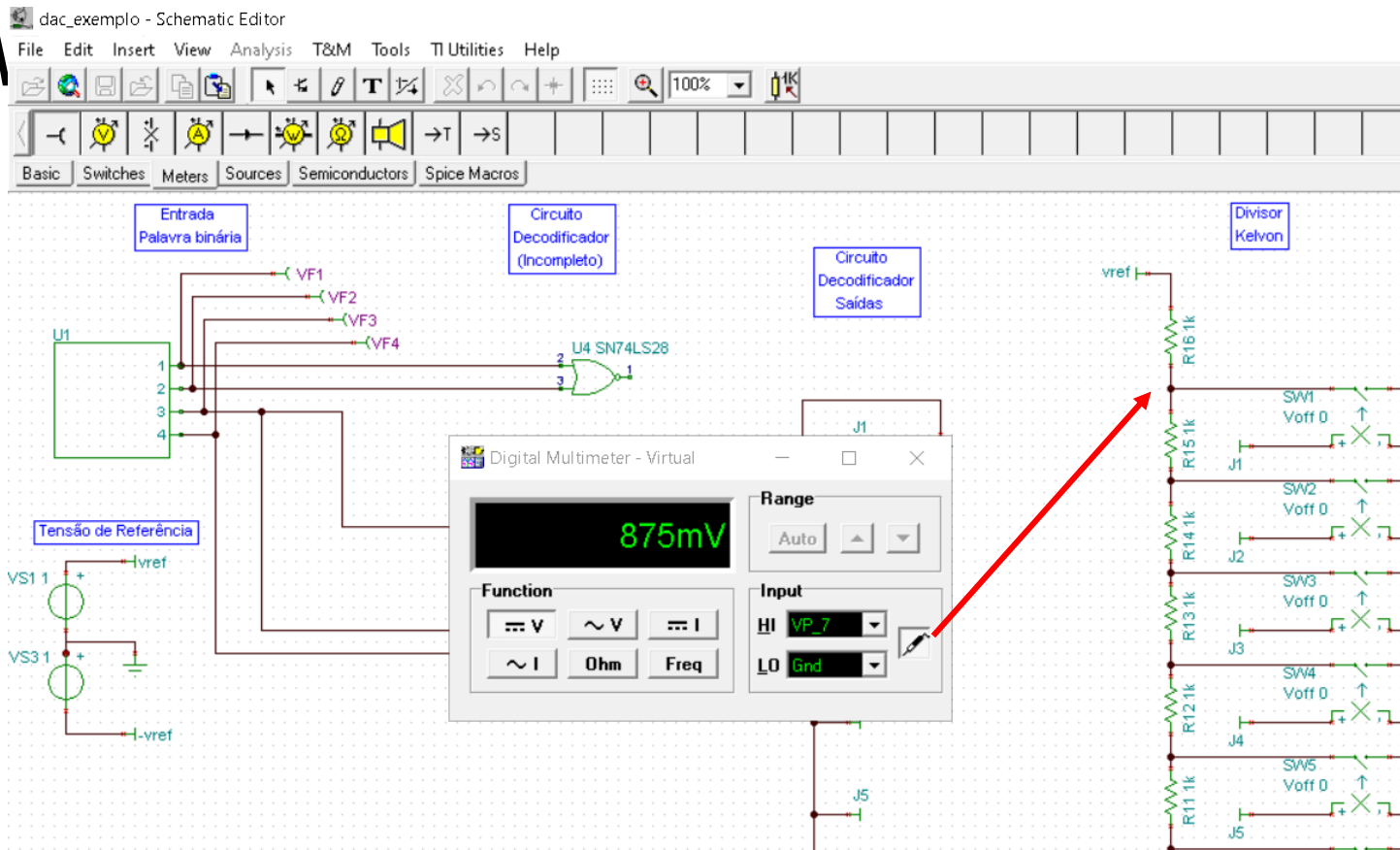


Conversores A

Exemplo no Tina

Usar multímetro para descobrir a tensão de conversão

A análise do circuito divisor de tensão também pode ser usada



Dúvidas?