





ESCOLA POLITÉCNICA DA  
UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Departamento de Engenharia de Sistemas Eletrônicos  
PSI - EPUSP

**PSI 3214**  
**LABORATÓRIO DE INSTRUMENTAÇÃO ELÉTRICA**

**Experiência 02:**  
**CONVERSÃO ANALÓGICA-DIGITAL (A/D)**

Profa. Elisabete Galeazzo  
Antonio Sandro Verri  
Dennis Cabrera

# Objetivos

Efetuar simulação de medidas elétricas através de instrumentos digitais (conversores A/D) e verificar:

- 1) Os princípios envolvidos no processo de conversão dos sinais analógicos para digitais
- 2) Algumas características da conversão A/D (LSB, amostragem, etc...)

# Onde os conversores A/D são utilizados?

---

- Câmeras (8MP (frontal) / 13 MP)
- Sensor de retroiluminação
- Microfone
- Bússola (magnetômetro)
- Giroscópio
- Acelerômetro
- Barômetros
- Sensor *multitouch*



## Sinais analógicos

Podem assumir infinitos valores de amplitude dentro de um intervalo:

(A natureza é “analógica”)

Som, audição

Imagem, visão

Temperatura, tato

Odores ou cheiros, olfato

Radiação eletromagnética

Características básicas dos sinais analógicos

Variação contínua do sinal em função do tempo

Representação elétrica dos sons ou sinais acústicos.

## Sinais Discretos

Podem assumir uma sequência discreta (descontínua) no tempo e em amplitude (sinais definidos em instantes de tempo pré-estabelecidos)

## Sinais Digitais

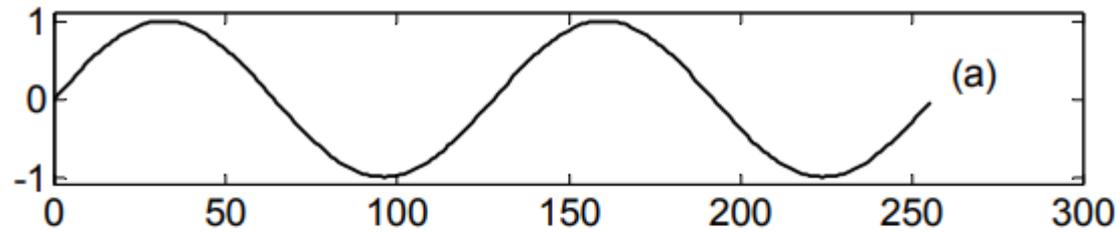
É quando os sinais discretizados assumem apenas determinados valores de amplitude (valores finitos)

Características básicas dos sinais digitais

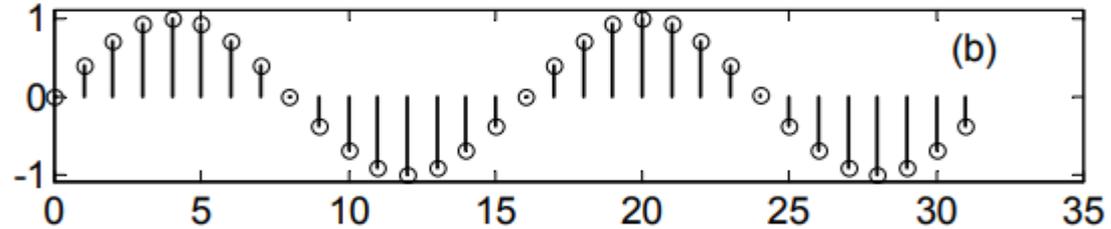
Variação do sinal assumindo apenas determinados valores em função do tempo

Exemplos típicos são o armazenamento digital de sons e imagens

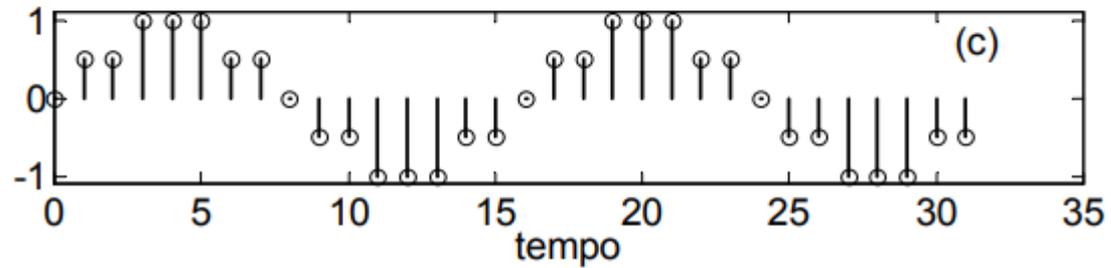
Sinal contínuo



Sinal discreto ou amostrado



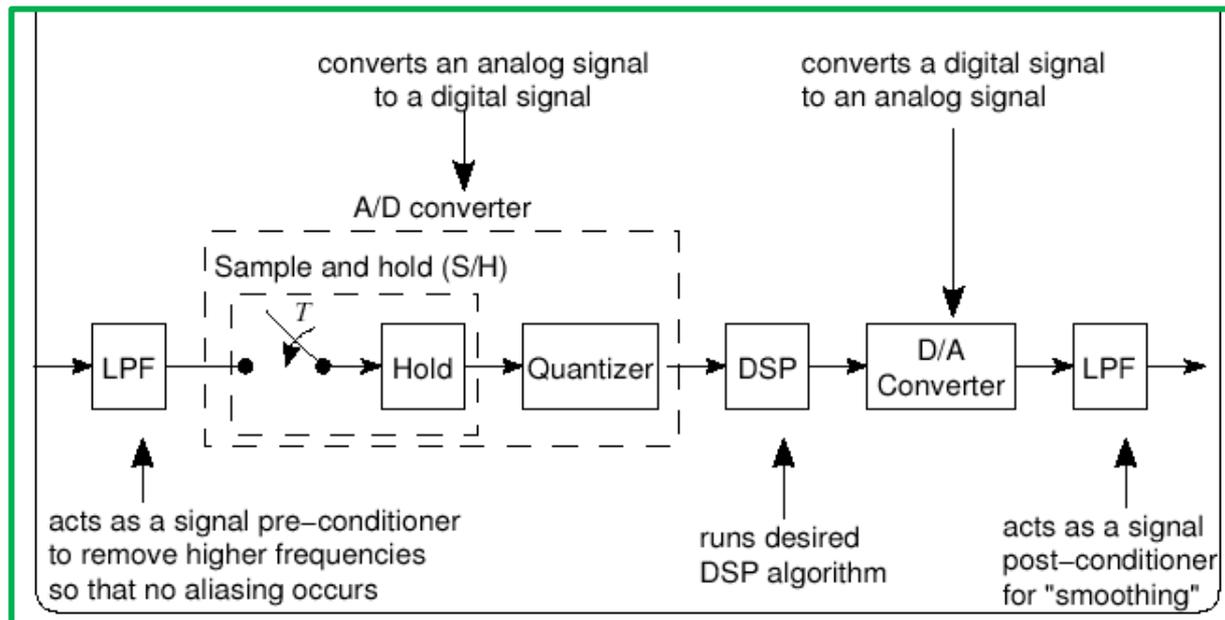
Sinal digital



# Processo de conversão de sinais analógicos para digitais:



**sinal contínuo; idealmente amostrado; amostrado com circuito “Sample and Hold”**



# Principais características da Conversão AD

- **RESOLUÇÃO (nº de bits)**
- **ESPECIFICAÇÃO DO SINAL DE ENTRADA (modo de operação *UNIPOLAR* ou *BIPOLAR*)**
- **TENSÃO DE SATURAÇÃO MÍNIMA E MÁXIMA**
- **TENSÃO DE FUNDO DE ESCALA ( VFS )**
- **FREQUÊNCIA DE AMOSTRAGEM (amostras/segundo)**

# Resolução de Conversor A/D

Conversor A/D ideal de “n” bits tem:

$2^n$  códigos digitais possíveis;

$(2^n - 1)$  transições;

> número de bits, > resolução;

Largura do passo (step) (LSB: Least significant bit):

$$1 \text{ LSB} = \frac{V_{FS}}{2^n}$$

( $V_{FS}$  = tensão de fundo de escala do conversor)

# Especificação do sinal de entrada do conversor:

## UNIPOLAR:

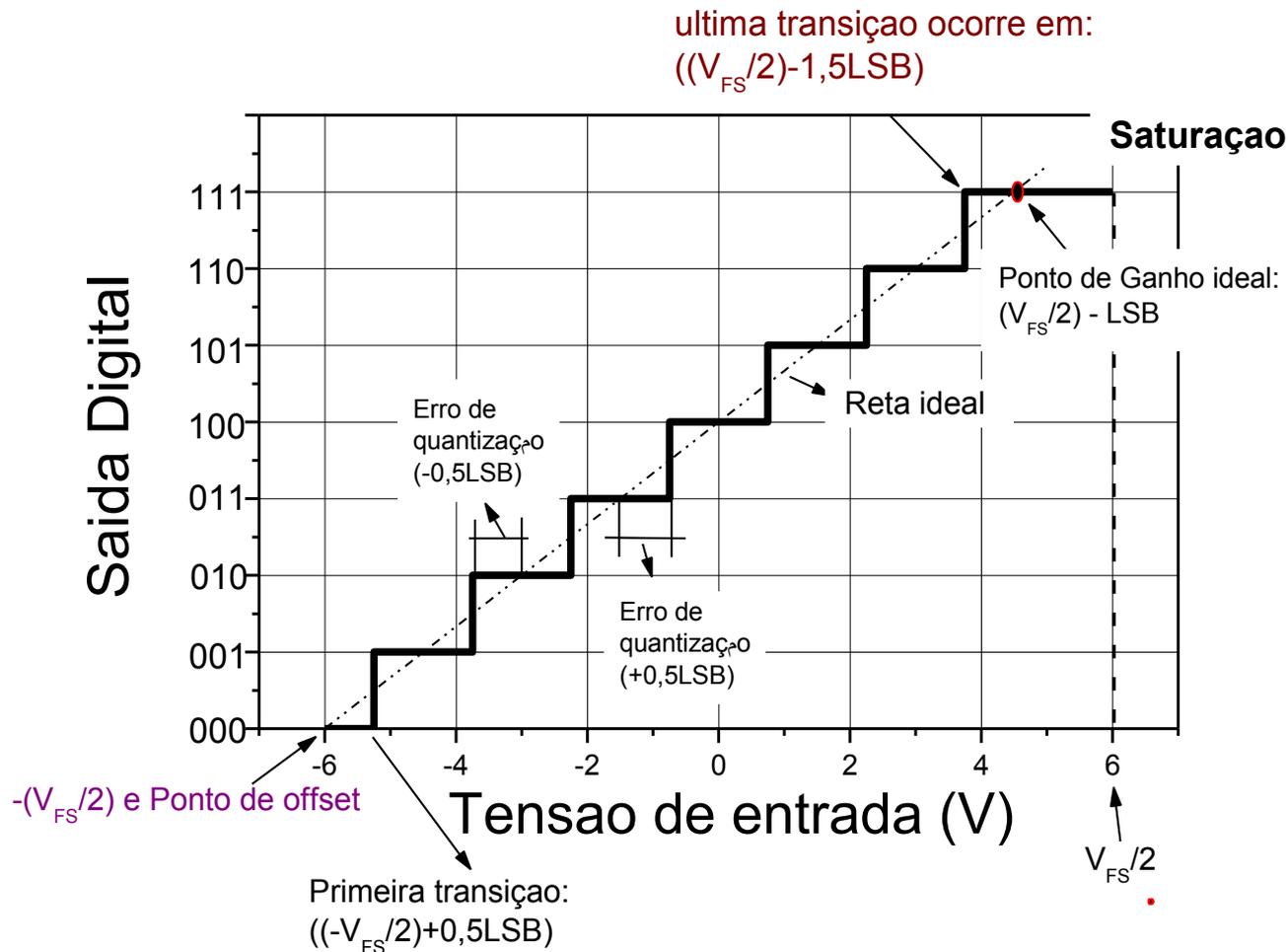
o sinal varia de 0 a " $V_{FS}$ " volts  
( $V_{FS}$  = tensão de fundo de escala)



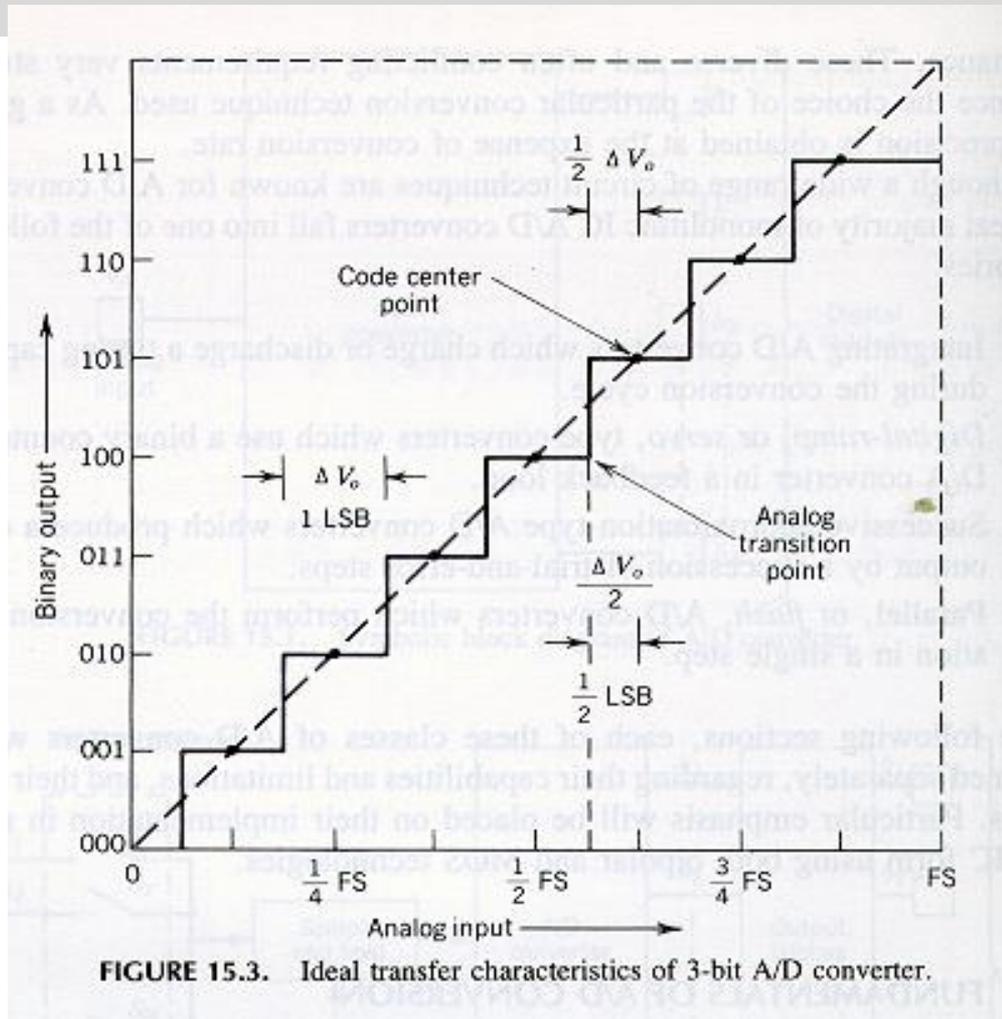
## BIPOLAR:

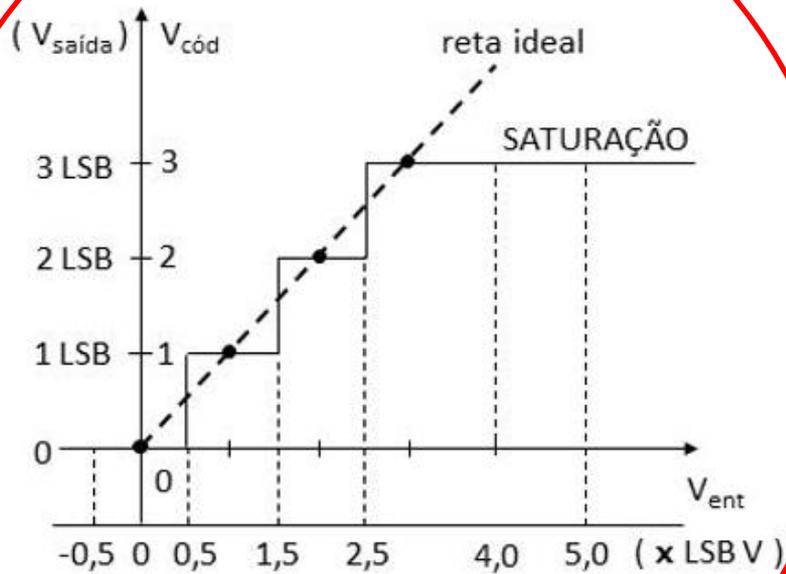
o sinal de entrada varia de  $-V_{FS}/2$  a  $V_{FS}/2$  volts  
(aceita sinais de duas polaridades)

# Função de transferência de conversores AD (bipolar)

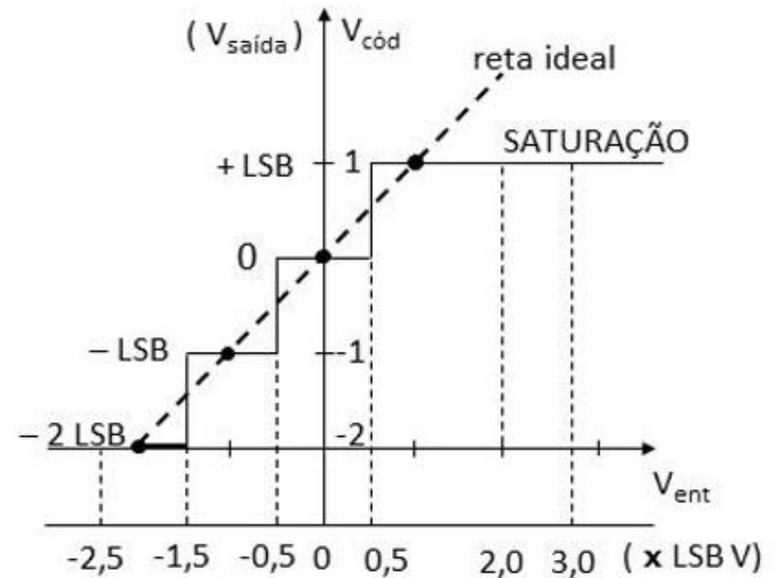


# Exemplo Conversor Unipolar:





(a) unipolar



(b) bipolar

**Figura 5** – Características de transferência de conversores A/D de 2 bits.

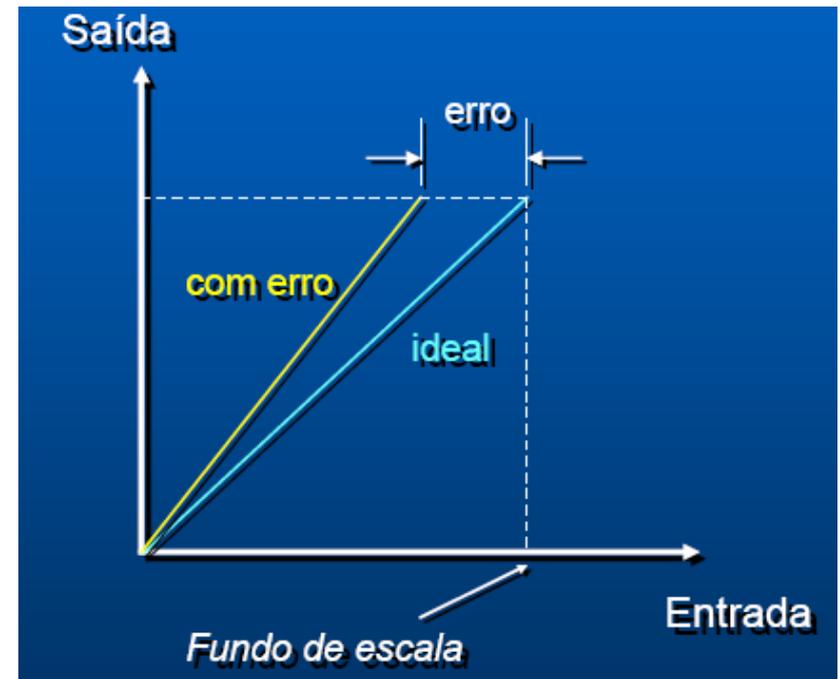
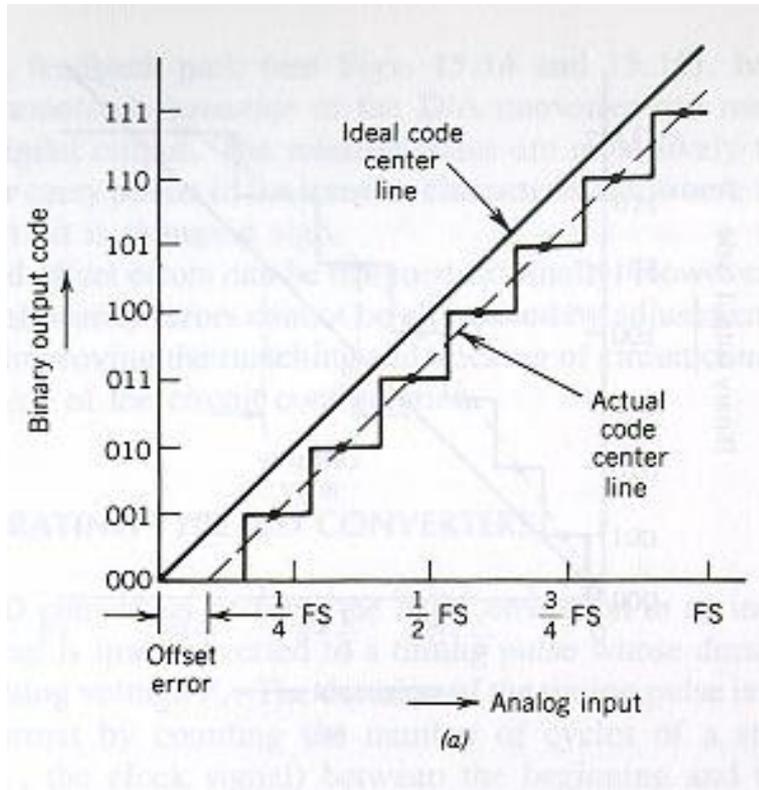
# Fontes de erros no processo de conversão A/D:

➔ **ERRO DE QUANTIZAÇÃO**

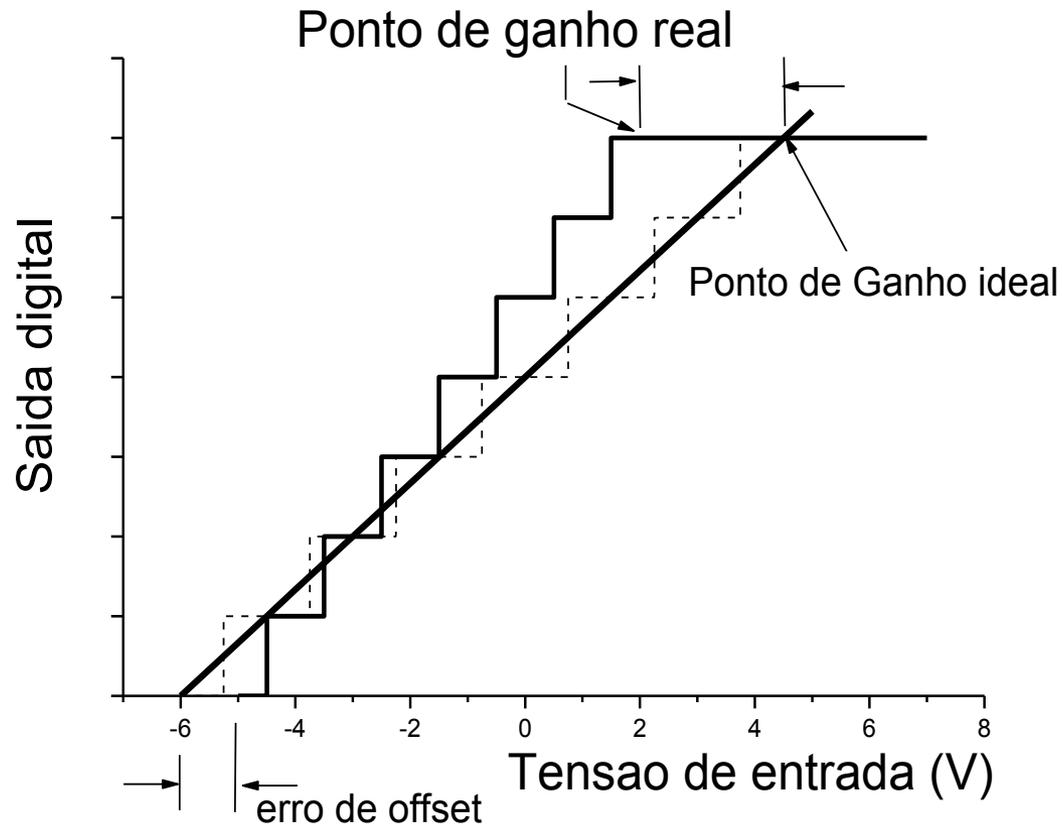
➔ **ERRO DE OFFSET (ERRO DE DESLOCAMENTO)**

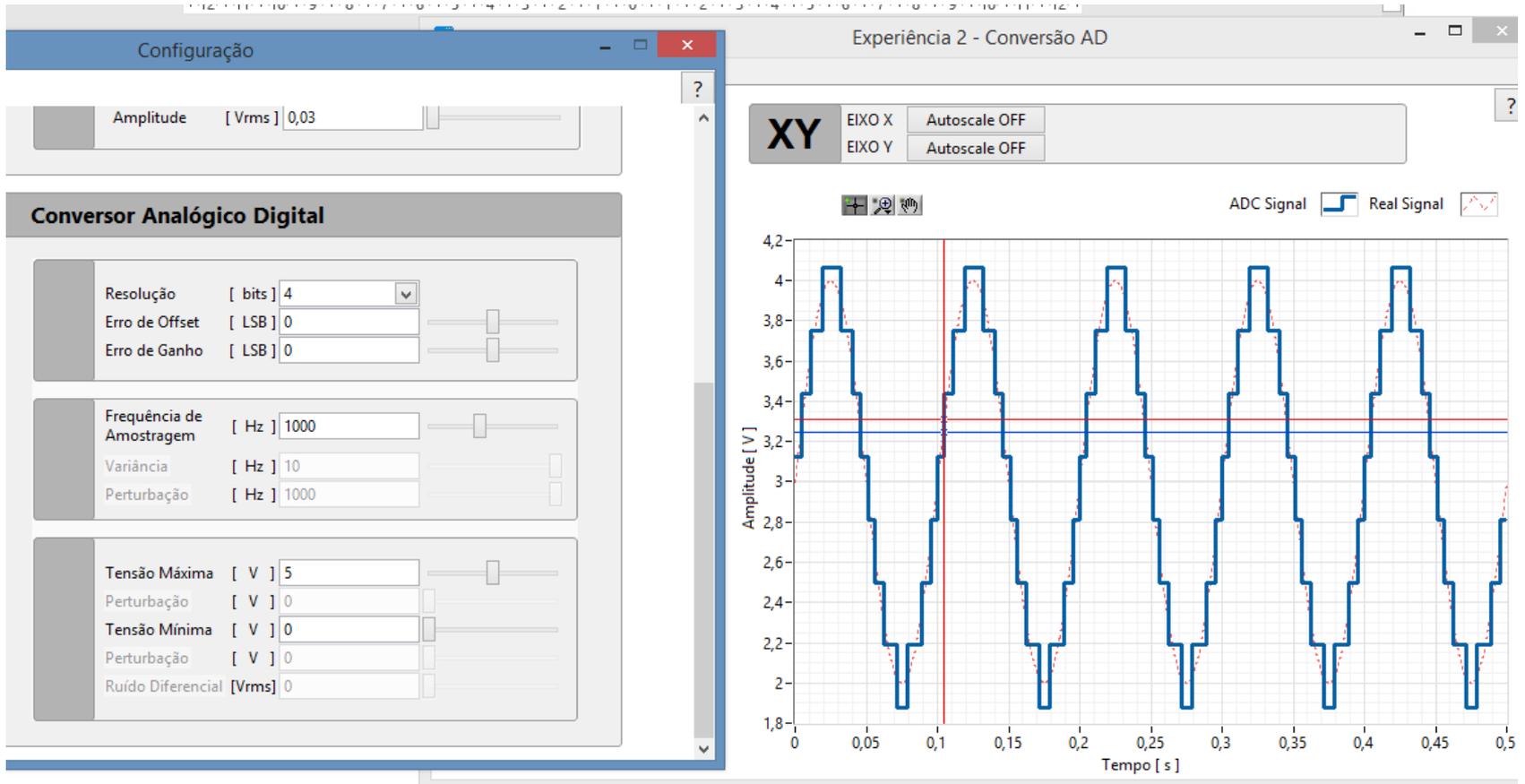
➔ **ERRO DE GANHO**

# Erros durante o processo de conversão, exemplos:



# Erro de offset e ganho juntos:





### Configuração

Amplitude [ Vrms ] 0,03

---

#### Conversor Analógico Digital

Resolução [ bits ] 8

Erro de Offset [ LSB ] 0

Erro de Ganho [ LSB ] 0

---

Frequência de Amostragem [ Hz ] 1000

Variância [ Hz ] 10

Perturbação [ Hz ] 1000

---

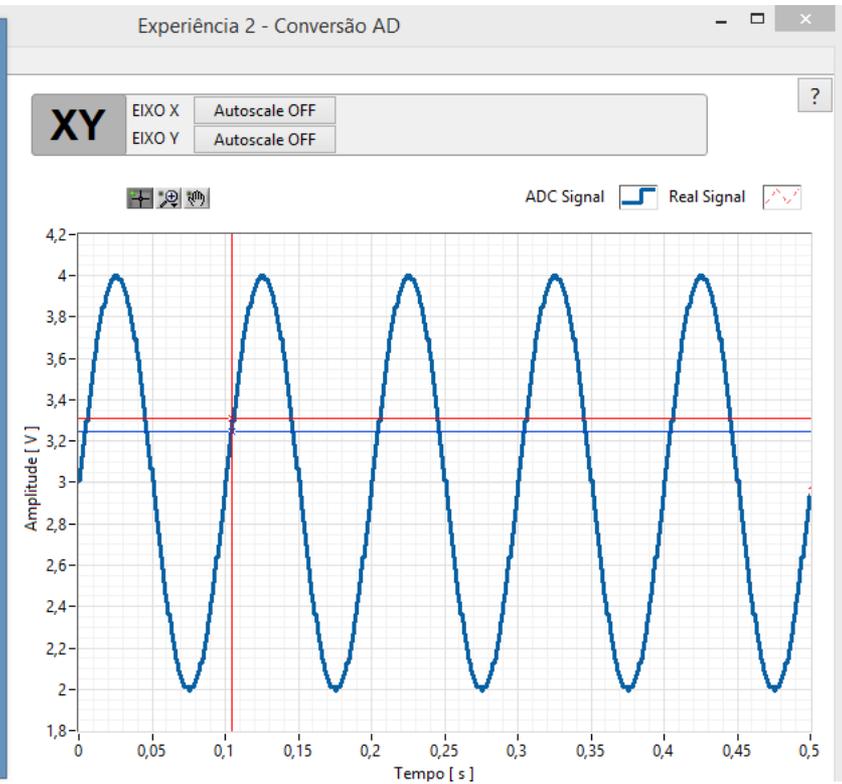
Tensão Máxima [ V ] 5

Perturbação [ V ] 0

Tensão Mínima [ V ] 0

Perturbação [ V ] 0

Ruído Diferencial [ Vrms ] 0



### Configuração

Forma de Onda: Sawtooth Wave

Frequência [ Hz ]: 10

Amplitude [ V ]: 1

Offset [ V ]: 0

Fase [ ° ]: 0

Duty Cycle [ % ]: 50

---

Tipo de Ruído: No Noise

Amplitude [ Vrms ]: 0,03

---

### Conversor Analógico Digital

Resolução [ bits ]: 10

Erro de Offset [ LSB ]: 0

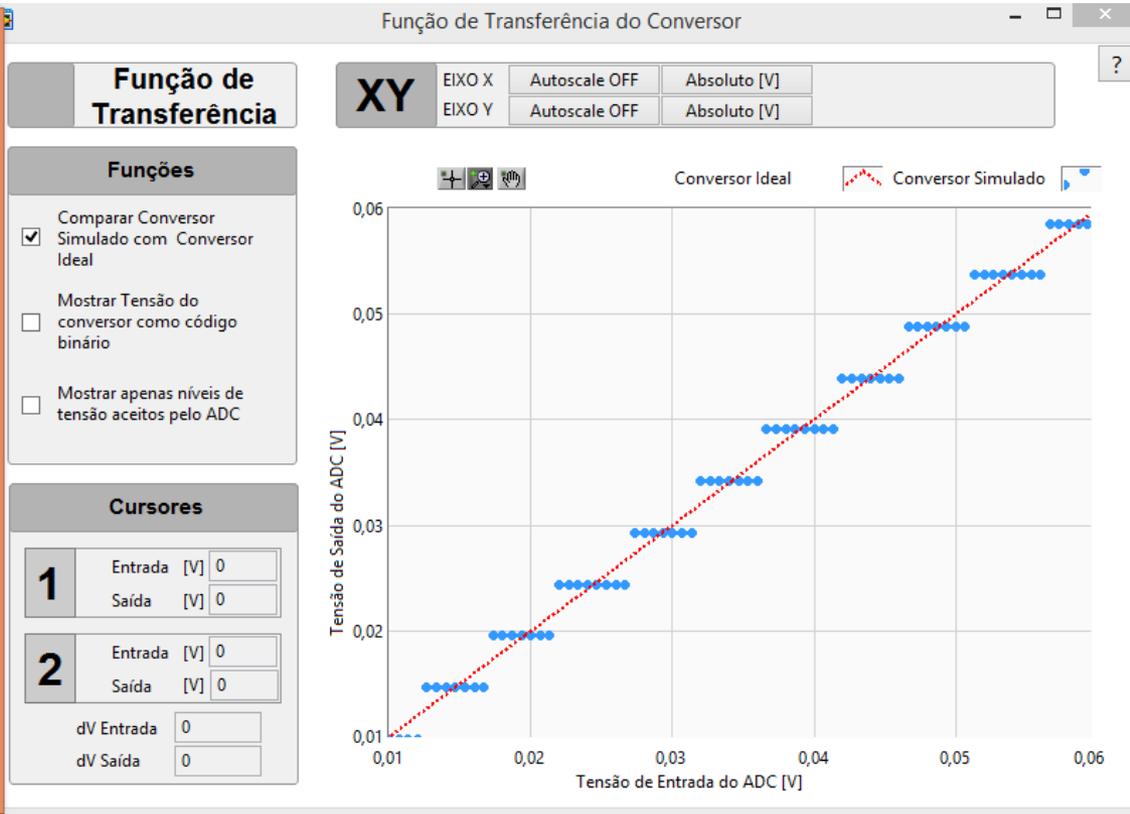
Erro de Ganho [ LSB ]: 0

---

Frequência de Amostragem [ Hz ]: 30000

Variância [ Hz ]: 10

Perturbação [ Hz ]: 1000







# Frequência de Amostragem do sinal ( $f_s$ )

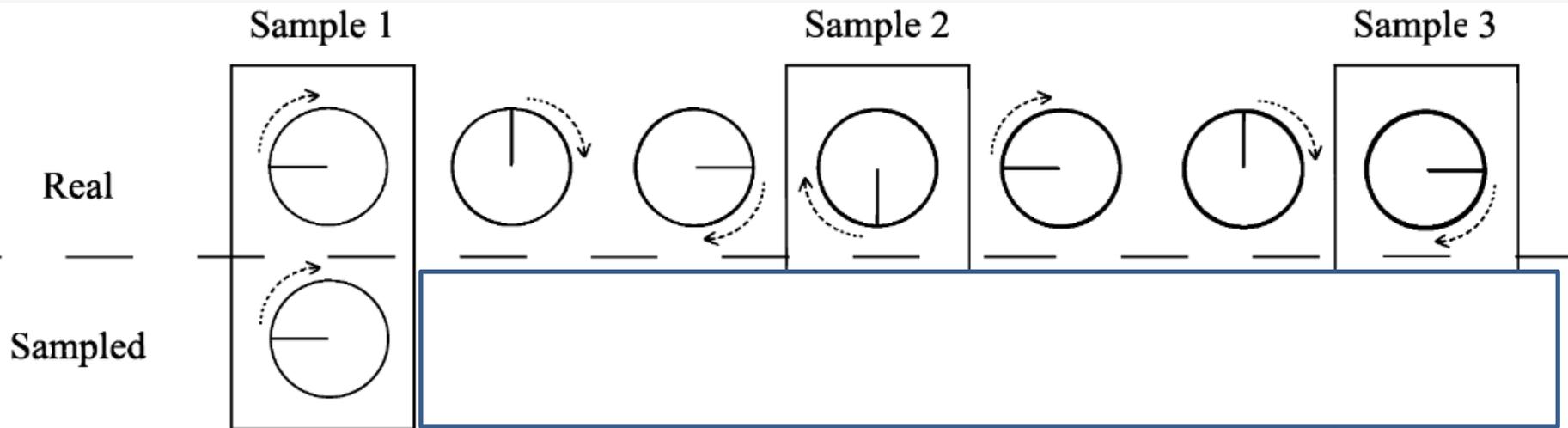
- **Critério de Nyquist:**

$f_s > 2$  vezes a frequência máxima do sinal analógico  
( $f_{\max}$ )

**Caso contrário:** haverá o efeito de subamostragem  
(ou rebatimento)

Exemplos nos slides a seguir.....

# Conceito de subamostragem exemplo: efeito da roda de carro



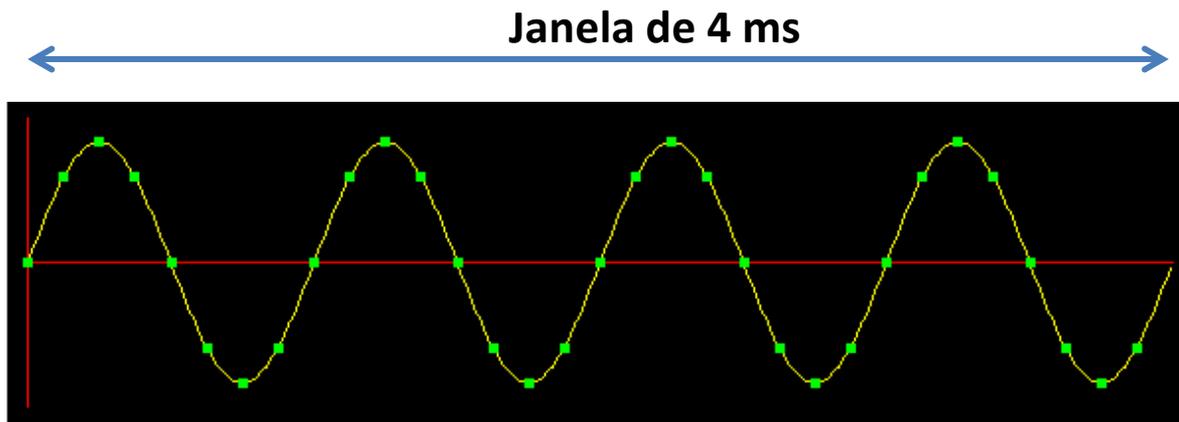
# Exemplo 1:

- Sinal senoidal,  $f_{\text{sinal}} = 250 \text{ Hz}$  e  $f_{\text{amostragem}} = 8000 \text{ amostras/segundo}$  ( **8 kS/s**):



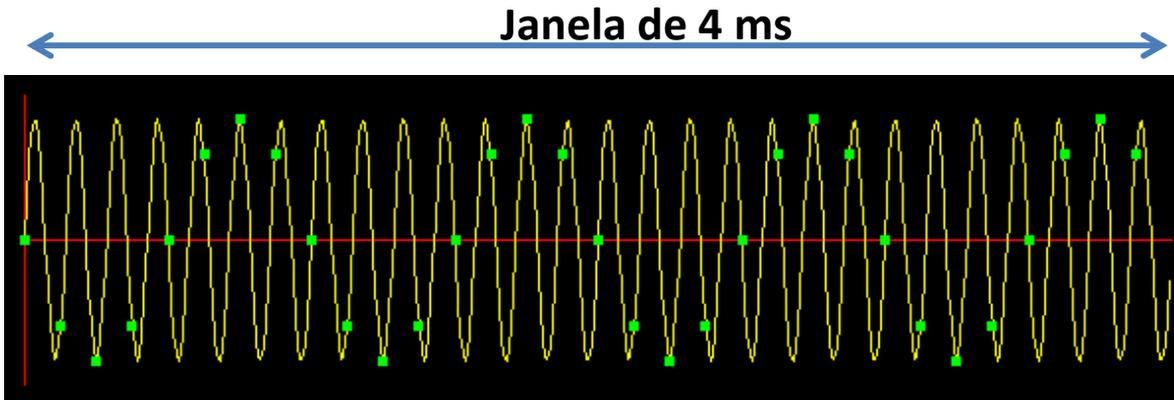
*Período = 4 ms; 1 amostra a cada 0,125 ms  $\rightarrow$  32 amostras num T.*

Sinal de **1 kHz**, e  $f_{\text{amostragem}} = \mathbf{8 \text{ kS/s}}$

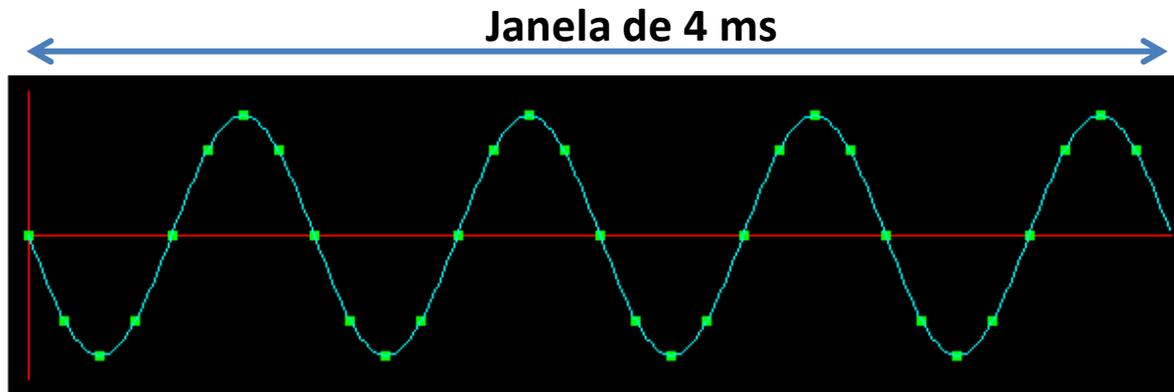


*Período do sinal= 1 ms; 1 amostra a cada 0,125 ms, 8 amostras num T*

Sinal de **7 kHz**, e  $f_{\text{amostragem}} = 8 \text{ kS/s}$



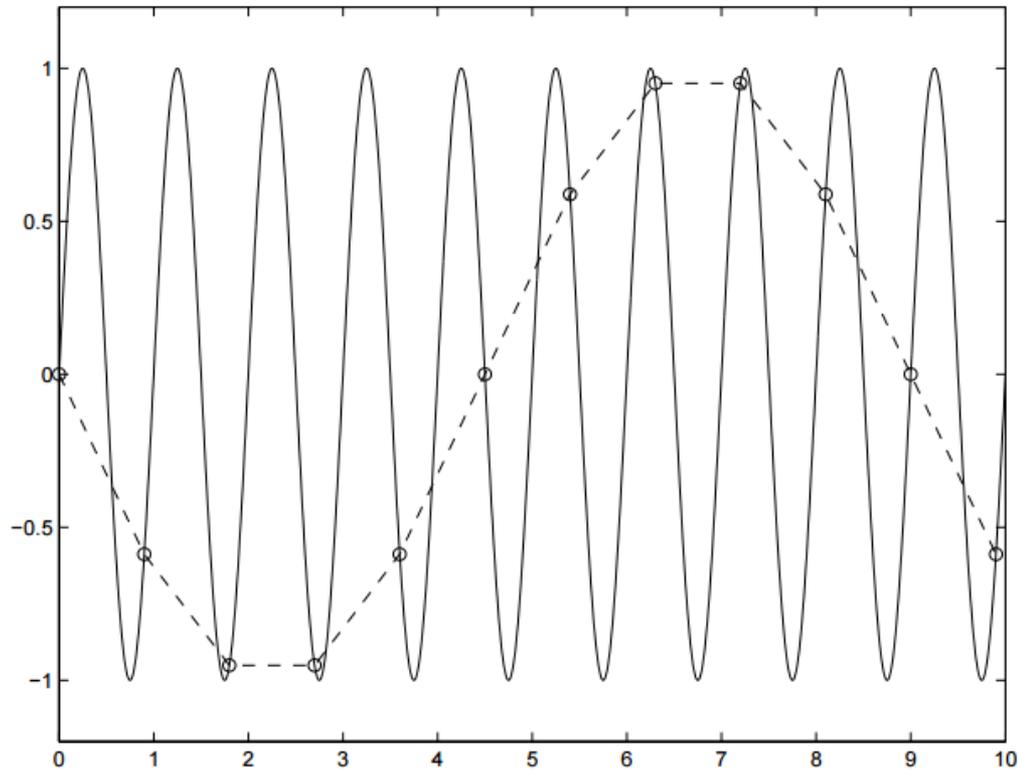
*Período do sinal = 142,9  $\mu\text{s}$ ;  
1 amostra a cada 125  $\mu\text{s}$ , menos que 2 amostras num período, em média.*



*Sinal reconstruído após amostragem.*

# Erro de Rebatimento

OCORRE → SUBAMOSTRAGEM DO SINAL



enquanto  $f_{\text{amostragem}} > 2 \times f_{\text{max}}$  do sinal,  
a informação poderá ser recuperada a partir das suas amostras

# Frequência espúria ( $f_e$ ):

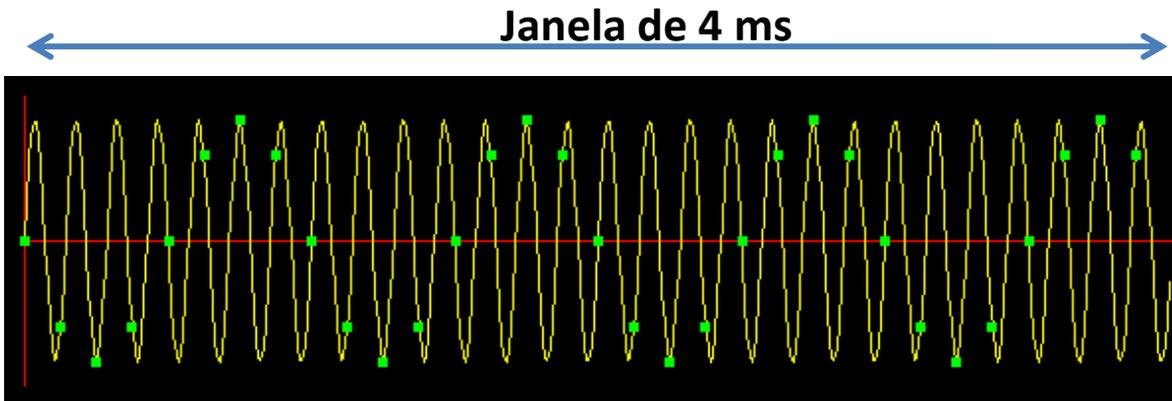
Se a frequência ( $f$ ) do sinal estiver entre

$f_s/2$  e  $f_s$ ,

a frequência espúria ( $f_e$ ) será:

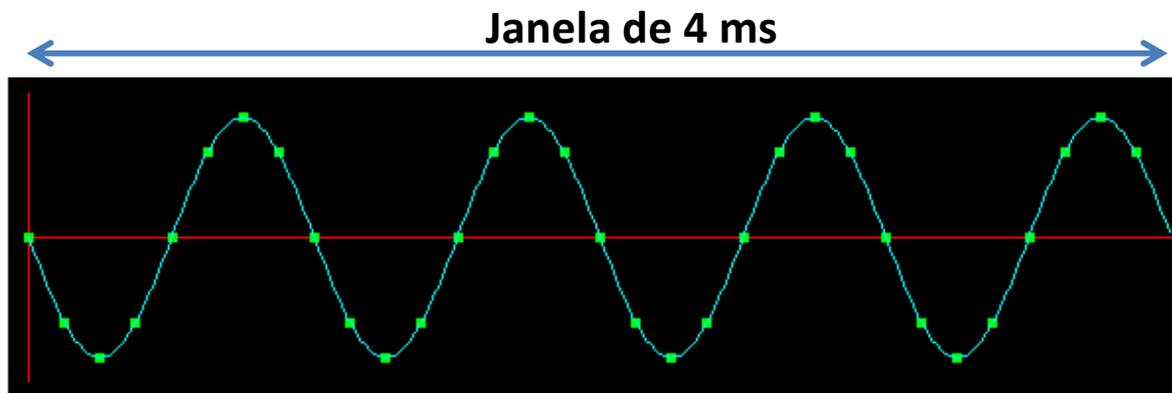
$$f_e = f_s - f$$

Qual é a frequência espúria resultante dessa amostragem, onde o sinal é de **7 kHz**, e  $f_{\text{amostragem}} = \mathbf{8 \text{ kS/s}}$  ?



*Período do sinal = 142,9  $\mu\text{s}$ ;*

*1 amostra a cada 125  $\mu\text{s}$ , menos que 2 amostras num período, em média.*



*Sinal reconstruído após amostragem.*

$$f_e = f_s - f$$

$$f_e = (8 - 7)\text{kHz}$$

$$f_e = 1 \text{ kHz}$$



# Softwares para as atividades remotas:

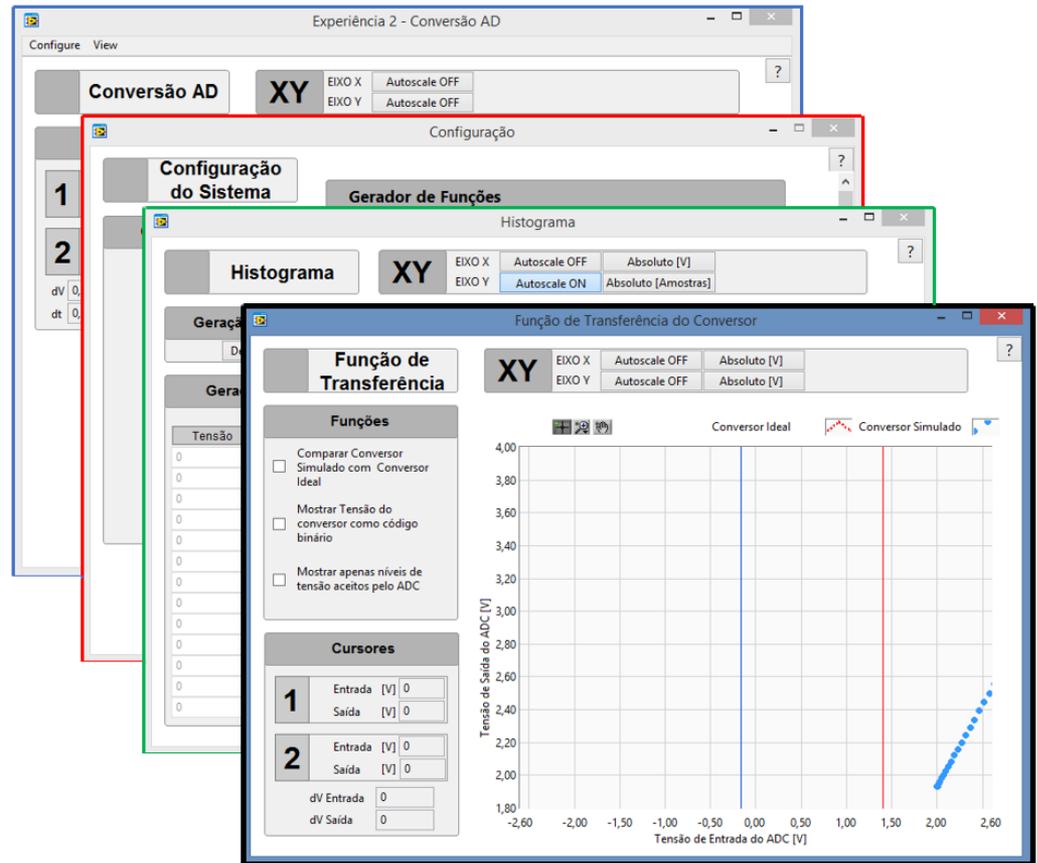
Tabela dos Valores do Conversor Analógico/Digital

Fundo de Escala (V) 5 LSB (V) 0,00488281 1/2 LSB (V) 0,00244141 SAIR

Total = 128 Pág. 105

Cód.(int16)	Tensão (V)	Cód.( hex)	Cód.(Binário)	Cód.(int16)	Tensão (V)	Cód.( hex)	Cód.(Binário)
840	4,10156250	00348	001101001000	848	4,14062500	00350	001101010000
841	4,10644531	00349	001101001001	849	4,14550781	00351	001101010001
842	4,11132812	0034A	001101001010	850	4,15039062	00352	001101010010
843	4,11621094	0034B	001101001011	851	4,15527344	00353	001101010011
844	4,12109375	0034C	001101001100	852	4,16015625	00354	001101010100
845	4,12597656	0034D	001101001101	853	4,16503906	00355	001101010101
846	4,13085937	0034E	001101001110	854	4,16992187	00356	001101010110
847	4,13574219	0034F	001101001111	855	4,17480469	00357	001101010111

# Softwares para as atividades remotas:



Vamos ver juntos o software Conversão\_AD\_2020?