

# MICROPROCESSADORES E MICROCONTROLADORES



# CONVERSÃO A/D

Números são representados digitalmente em uma quantidade FINITA de bits

Por exemplo, uma variável **unsigned char** representa valores entre 0 e 255.



# CONVERSÃO A/D

Grandezas analógicas podem atingir valores infinitos.

Por exemplo, entre 0 e 3 V existem infinitos valores (0,5 V, 0,5001 V, 0,500001 V etc.)

# CONVERSÃO A/D

**Como representar infinitos valores  
com um número finito de bits?**

# CONVERSÃO A/D

**Como representar infinitos valores  
com um número finito de bits?**

**Impossível!  
(Pelo menos até agora)**



# CONVERSÃO A/D

O melhor a se fazer é discretizar -  
aproximar o valor analógico a um valor  
finito.

Por exemplo, se tivermos tensões entre 0  
e 255 V, aproximamos estes valores ao  
inteiro mais próximo.

# CONVERSÃO A/D

Se a grandeza analógica for variável (no tempo, no espaço etc.), será necessário discretizar nesta dimensão também.

# CONVERSÃO A/D

Por exemplo, se obtivermos a tensão durante 2 segundos, precisaríamos de infinitas posições na memória para guardar todos os valores.



# CONVERSÃO A/D

Exemplo:  $V_i(t) = 3,5 * [1 - \cos(2 * \pi * t)]$

't' e ' $V_i(t)$ ' podem assumir infinitos valores

Obtendo valores de  $V_i(t)$  a cada 100 ms e arredondando este valores, obtemos:

# CONVERSÃO A/D

$$V_i(0) = 0,0 \text{ V}$$

$$V_i(0,1) = 0,66844 \text{ V}$$

$$V_i(0,2) = 2,41844 \text{ V}$$

$$V_i(0,3) = 4,58156 \text{ V}$$

$$V_i(0,4) = 6,33156 \text{ V}$$

$$V_i(0,5) = 7,0 \text{ V}$$

# CONVERSÃO A/D

$$V_i(0) = 0,0 \text{ V}$$

$$V_i(0) = 0$$

$$V_i(0,1) = 0,66844 \text{ V}$$

$$V_i(0,1) = 1$$

$$V_i(0,2) = 2,41844 \text{ V}$$

$$V_i(0,2) = 2$$

$$V_i(0,3) = 4,58156 \text{ V}$$

$$V_i(0,3) = 5$$

$$V_i(0,4) = 6,33156 \text{ V}$$

$$V_i(0,4) = 6$$

$$V_i(0,5) = 7,0 \text{ V}$$

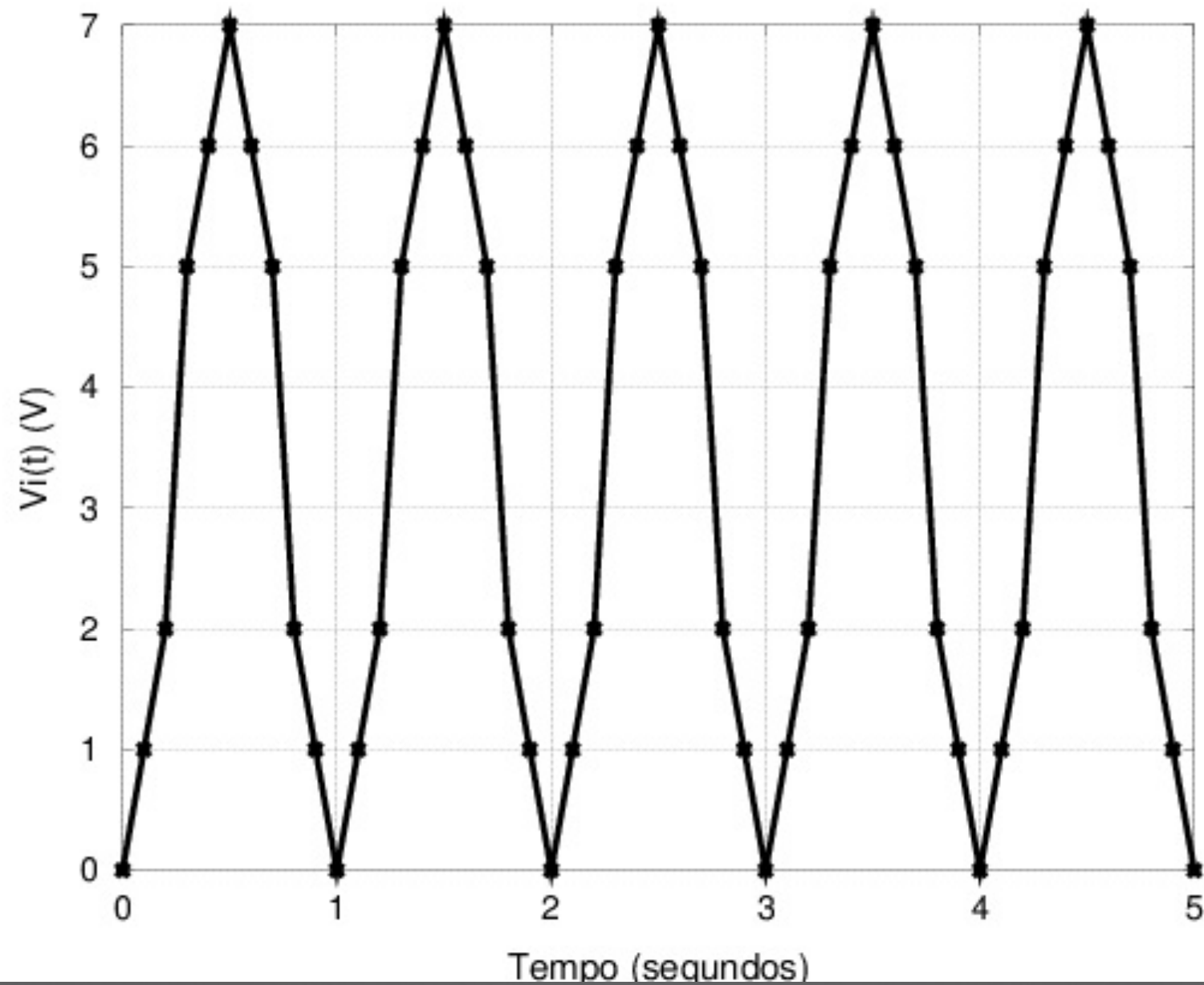
$$V_i(0,5) = 7$$



**round()**



# CONVERSÃO A/D

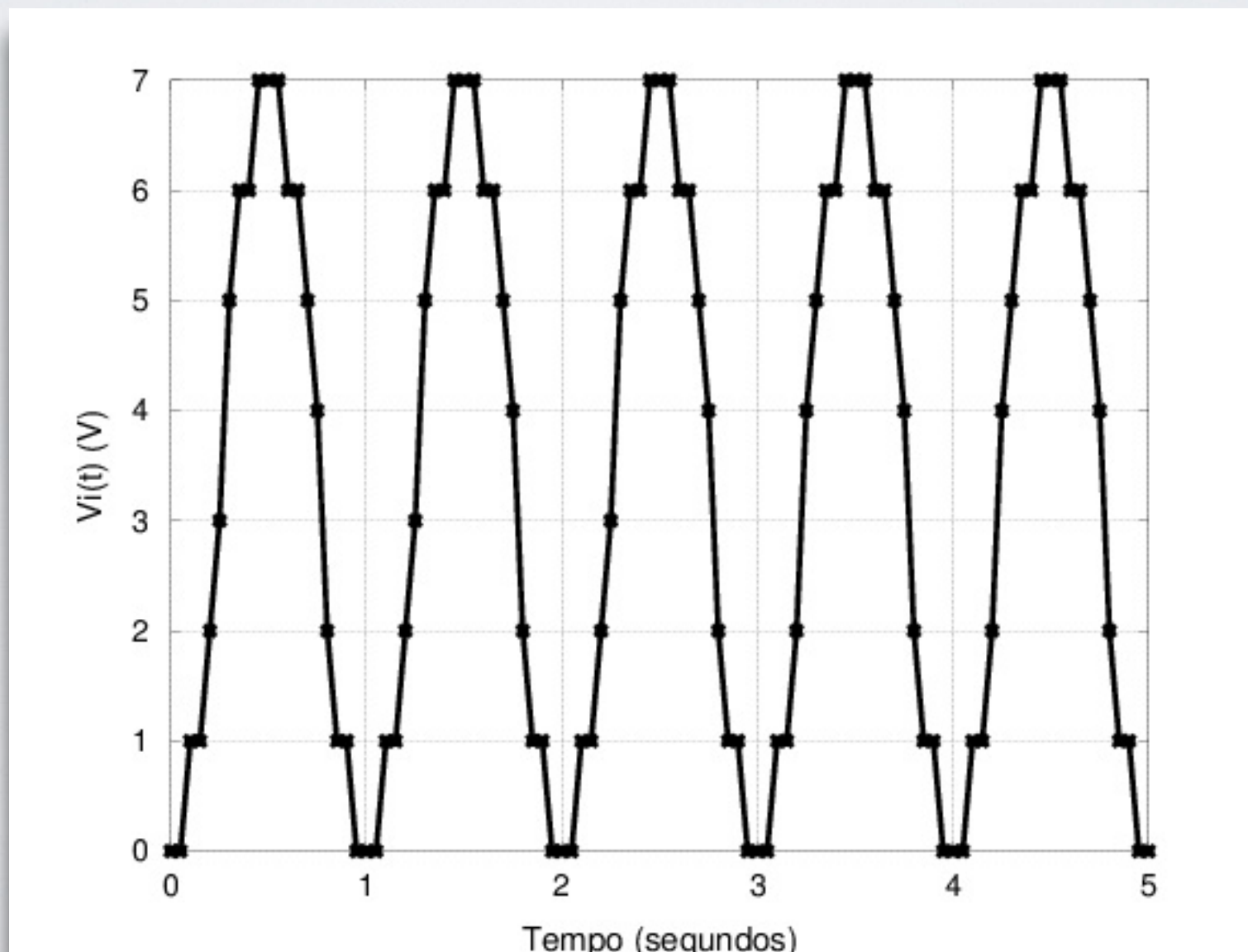


# CONVERSÃO A/D

E se pegássemos amostras a cada 50 ms?

# CONVERSÃO A/D

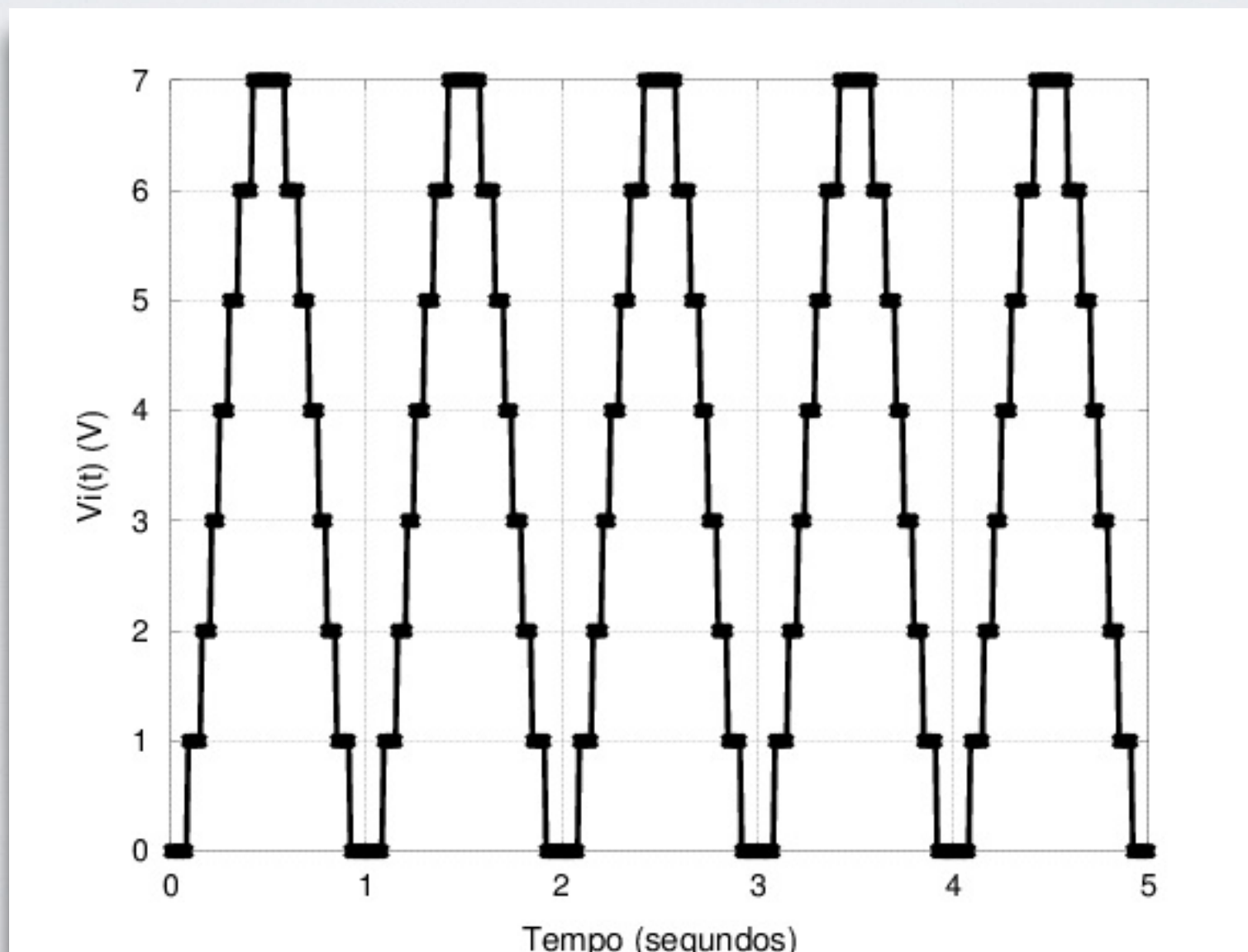
E se pegássemos amostras a cada 50 ms?





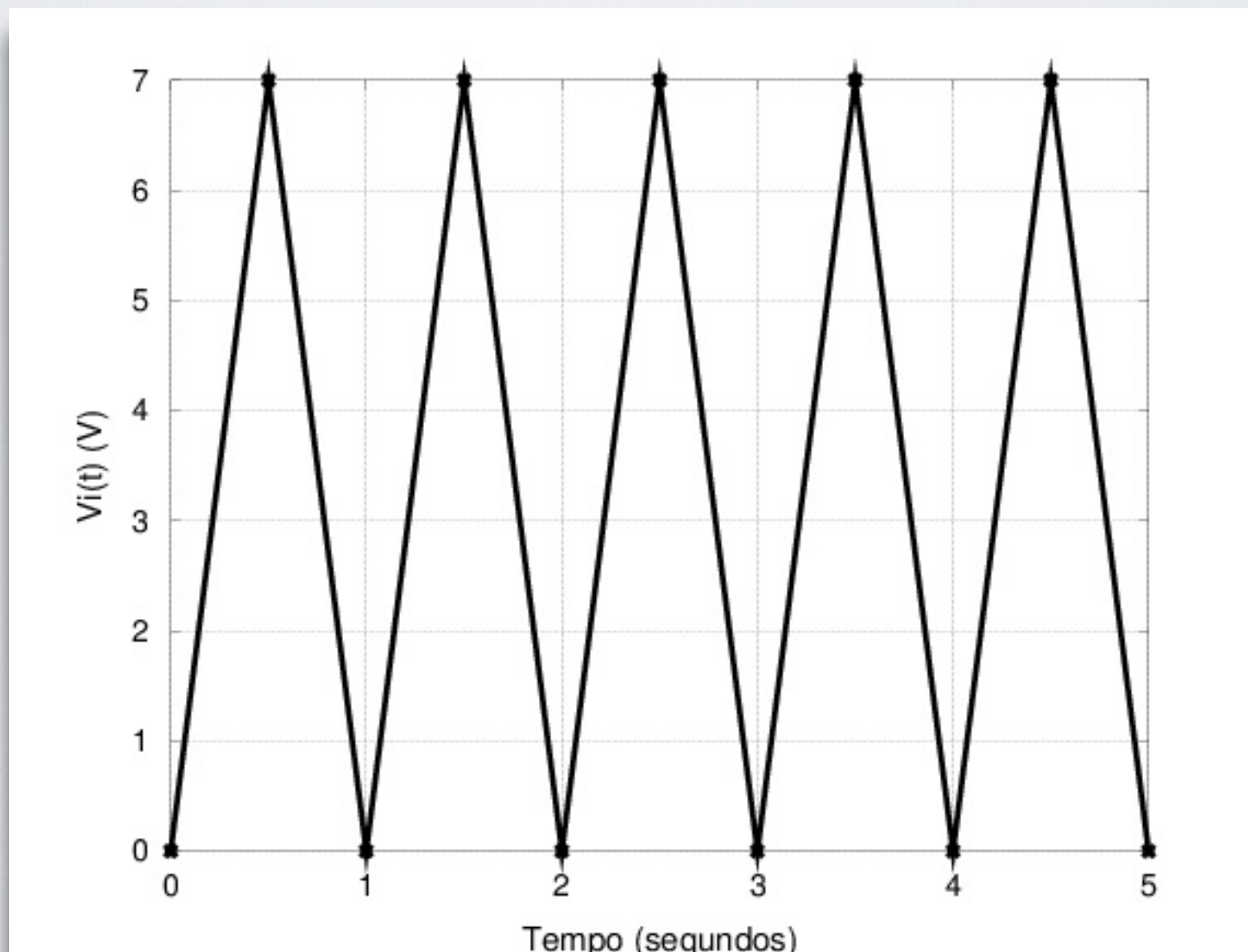
# CONVERSÃO A/D

E se pegássemos amostras a cada 10 ms?



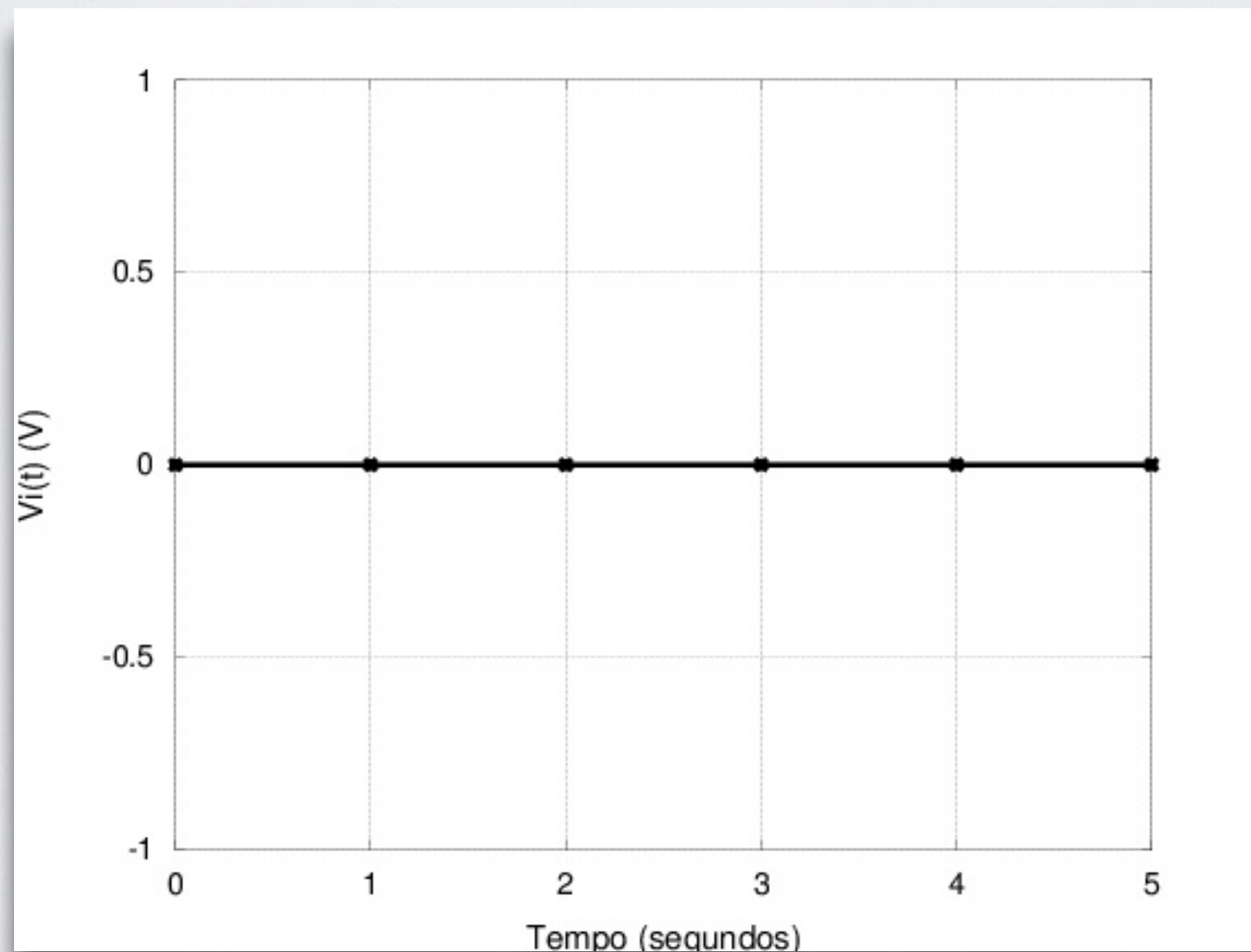
# CONVERSÃO A/D

E se pegássemos amostras a cada 0,5 s?



# CONVERSÃO A/D

E se pegássemos amostras a cada 1 s?





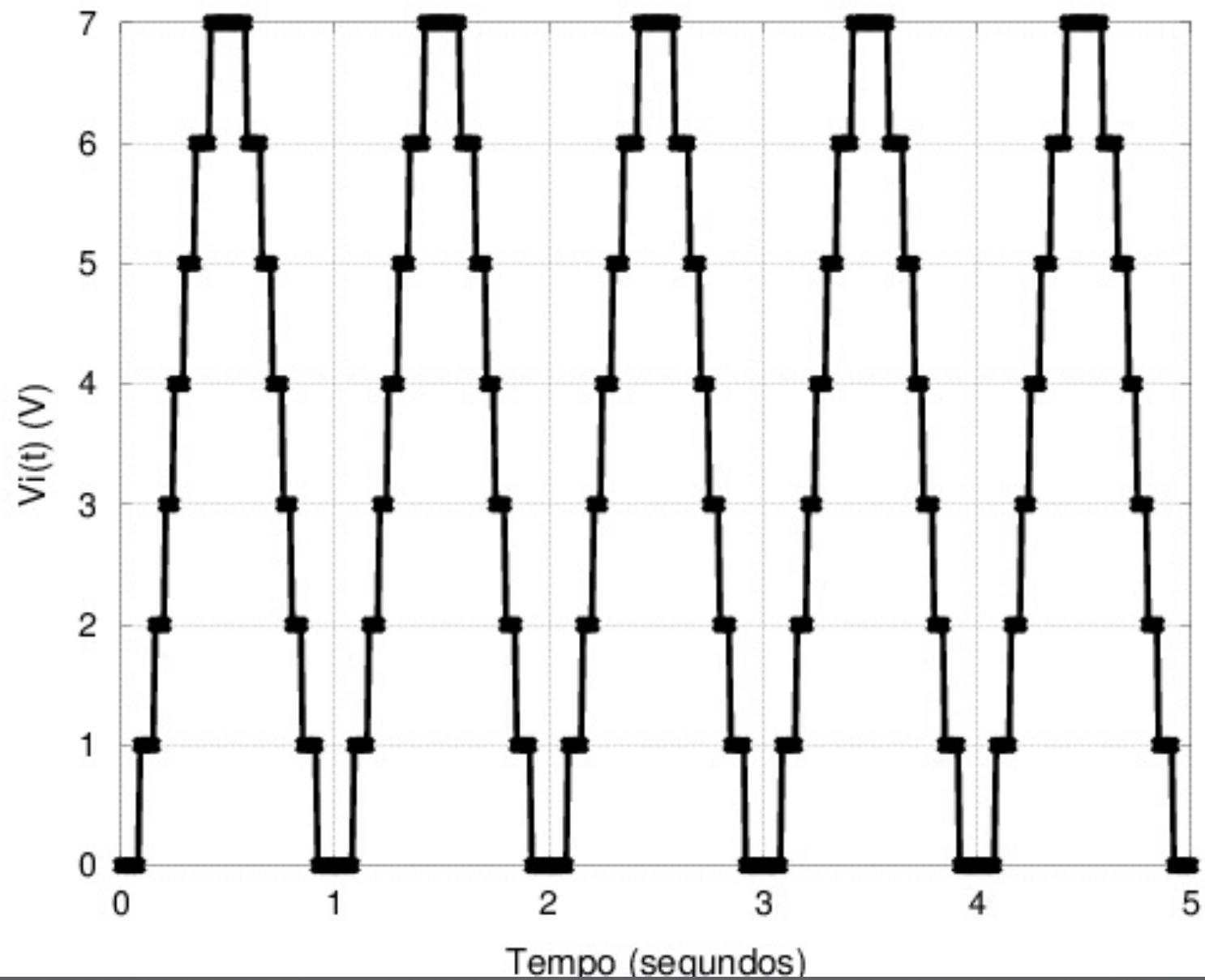
# CONVERSÃO A/D

Ou seja: a taxa de amostragem é fundamental para obter corretamente o sinal.

# CONVERSÃO A/D

E se arredondássemos os valores de  $V_i(t)$  mantendo mais casas decimais, com amostragem de 10 ms?

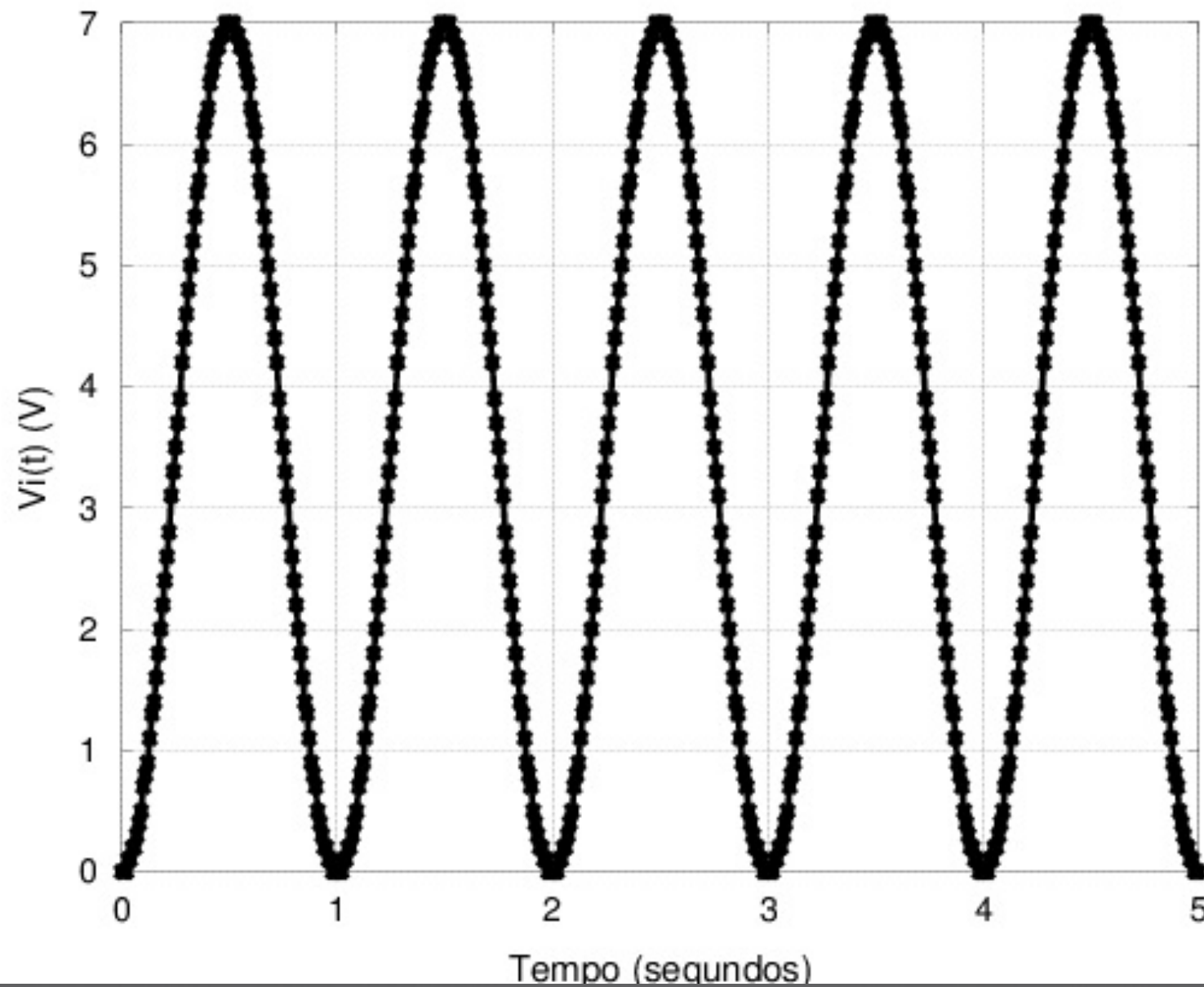
# CONVERSÃO A/D



0 casas decimais

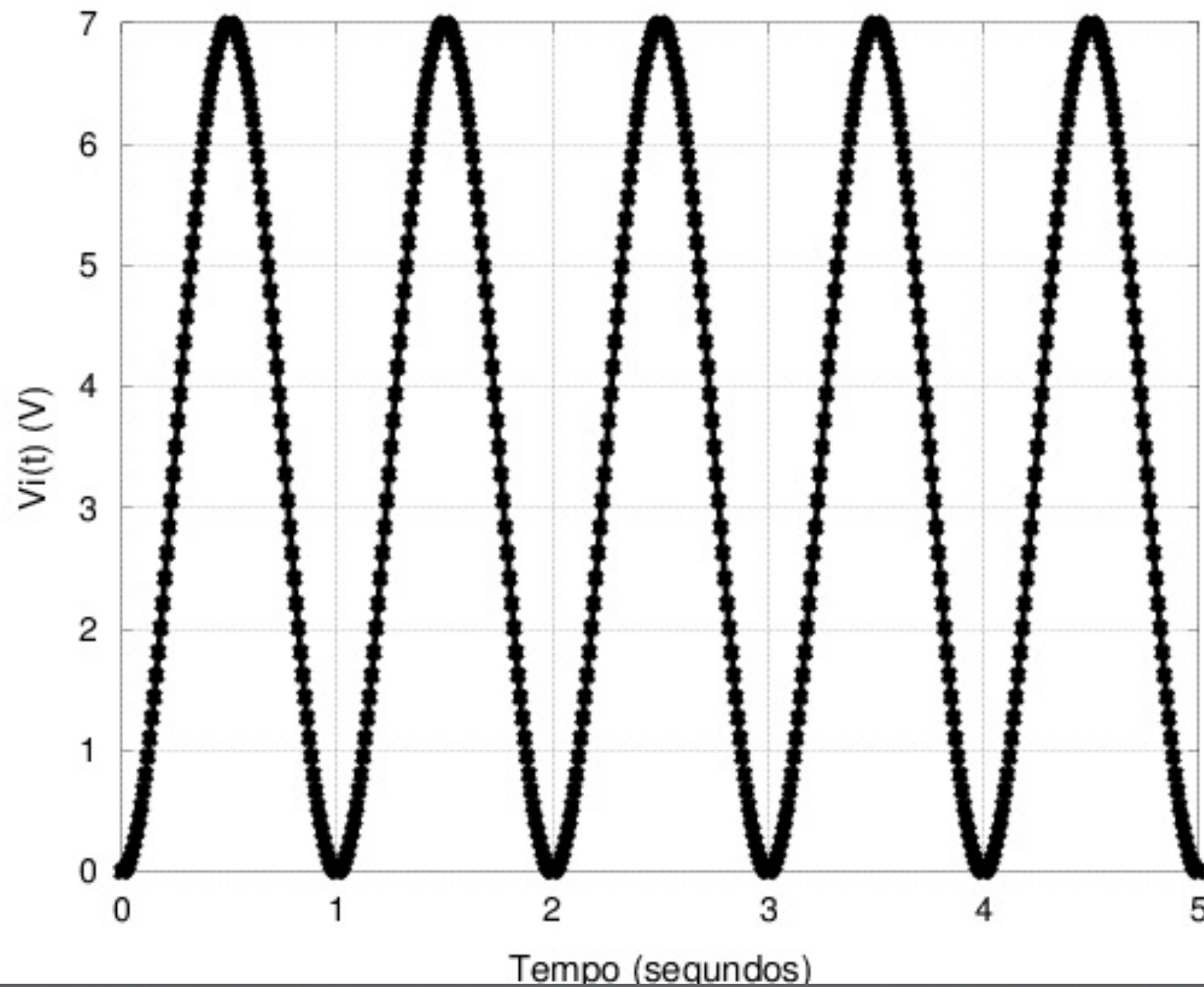


# CONVERSÃO A/D



1 casa decimal

# CONVERSÃO A/D



2 casas decimais

# CONVERSÃO A/D

Ou seja: o arredondamento é fundamental para obter corretamente o sinal.

Para números em formato digital, não importa o número de casas decimais, e sim a quantidade de bits para representação.



# CONVERSÃO A/D

É importante distinguir acurácia de precisão.

Acurácia - quanto próximo a medida está do valor real.

Precisão (ou resolução) - o número distinto de valores que podem ser representados.

# CONVERSÃO A/D

Por exemplo, um multímetro M1 fornece valores até a terceira casa decimal, e outro multímetro M2 fornece valores até a primeira casa decimal.

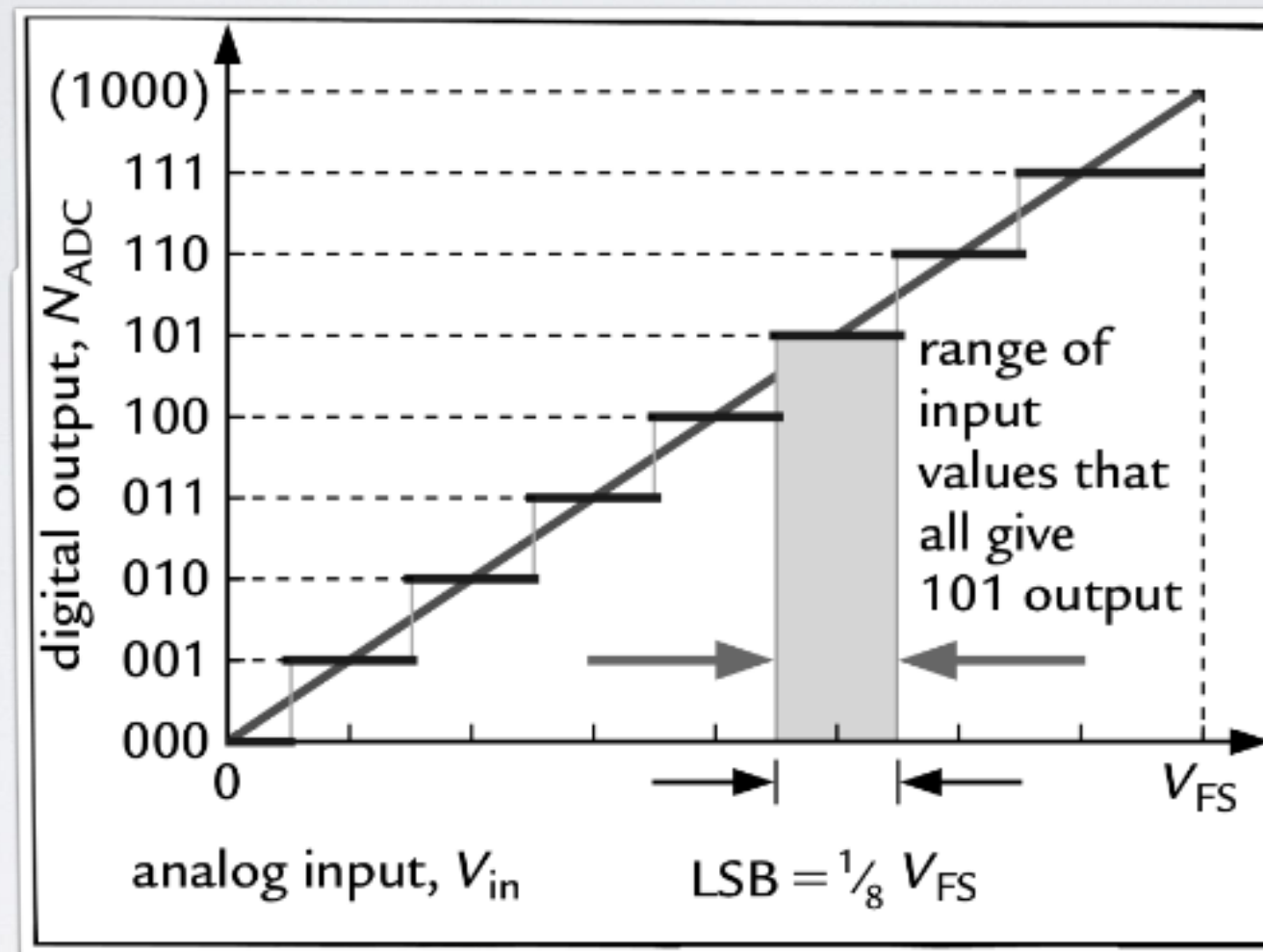
M1 tem maior precisão.

# CONVERSÃO A/D

Se M1 fornece 1,234 V e M2 fornece 1,3 V, e o valor real for de 1,301 V, então M1 tem menor acurácia do que M2.

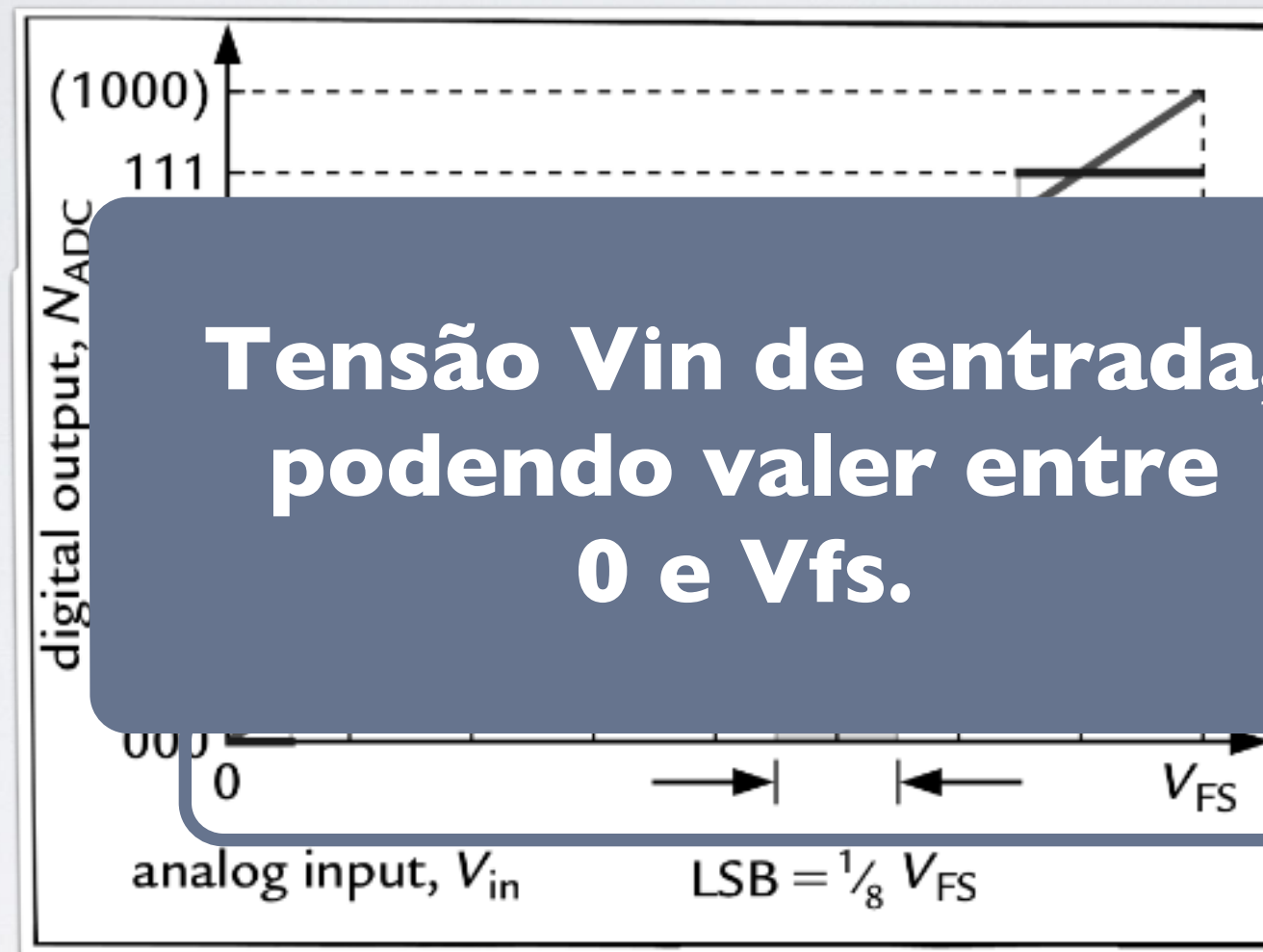


# CONVERSÃO A/D



Discretização da tensão

# CONVERSÃO A/D



Discretização da tensão

# CONVERSÃO A/D

(1000)	
digital output, $N_{ADC}$	111
	110
	101
	100
	011
	010
	001
	000
ana	

**Saída digital  $N_{adc}$ , podendo valer entre 000 e 111 (3 bits).**

Discretização da tensão



# CONVERSÃO A/D

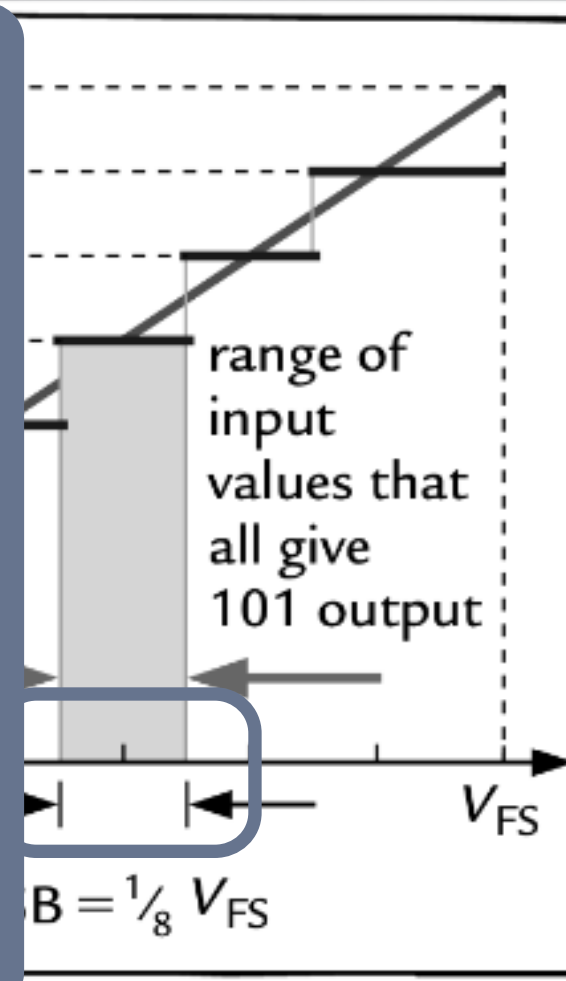
(1000)	
111	
110	
101	
100	
011	
010	
001	
000	
ana	

**A discretização é também chamada de quantização, ou escalonamento.**

Discretização da tensão

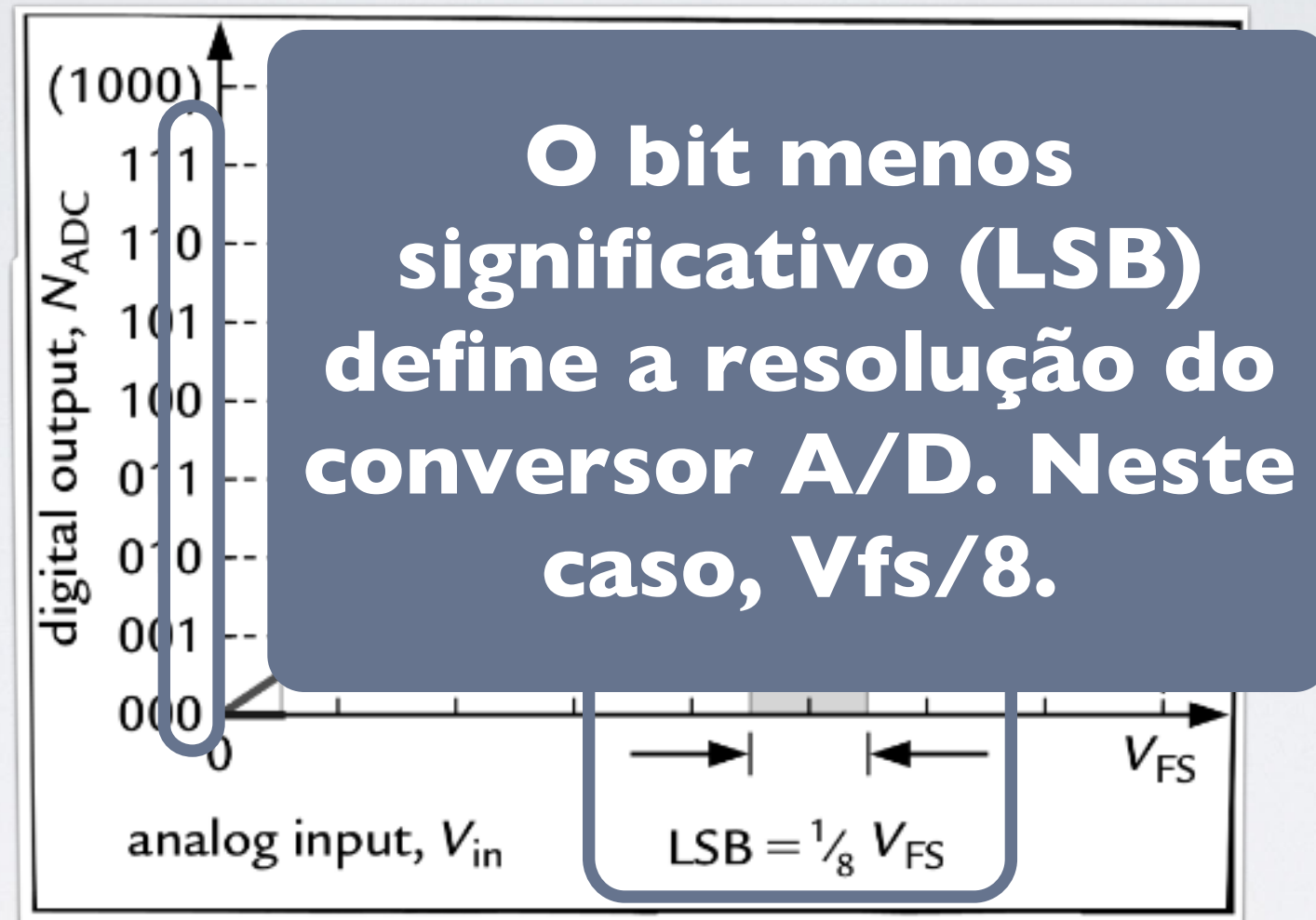
# CONVERSÃO A/D

**Valores de  $V_{in}$  que resultam em  $N_{adc}=101$**



Discretização da tensão

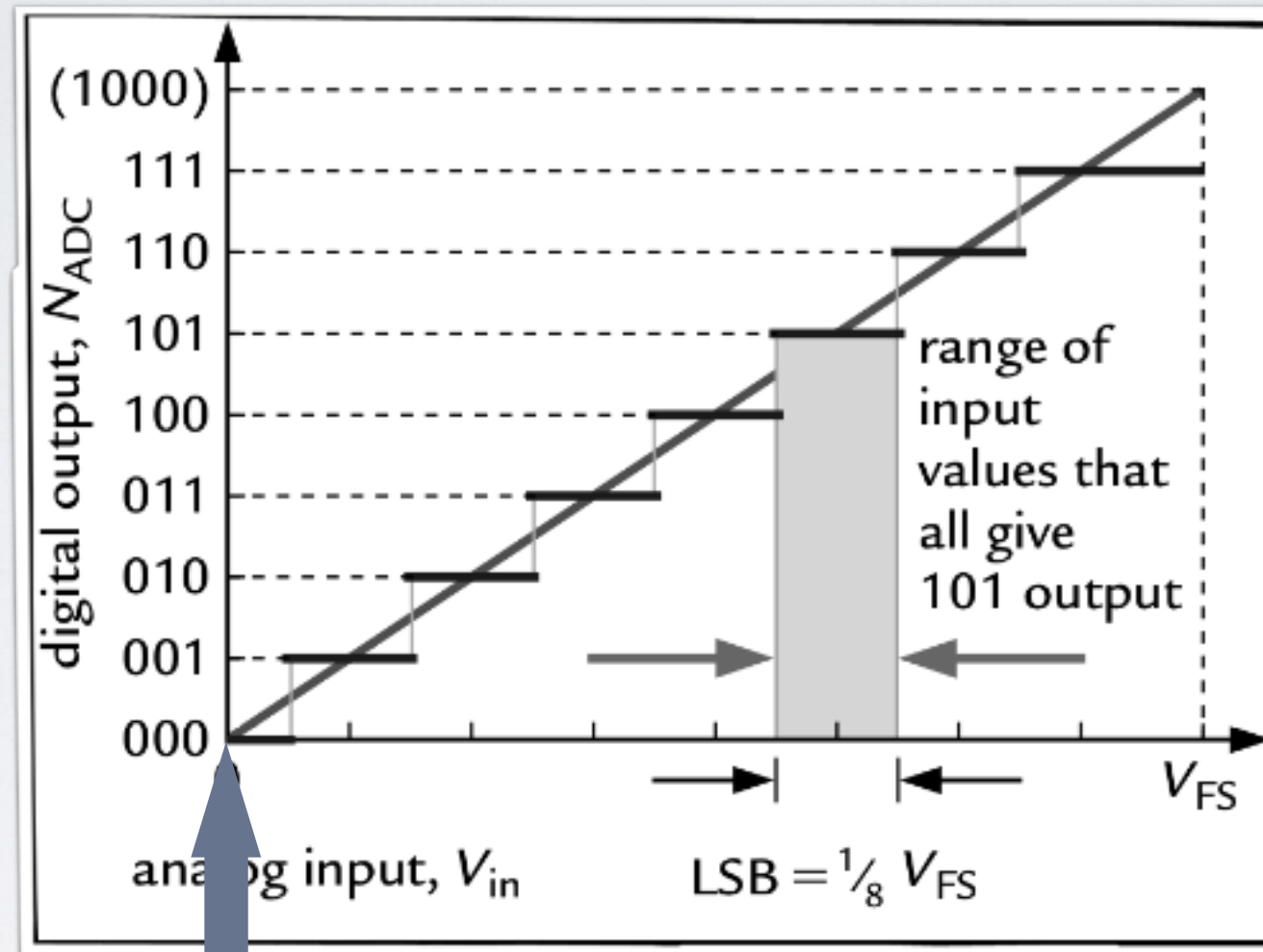
# CONVERSÃO A/D



Discretização da tensão

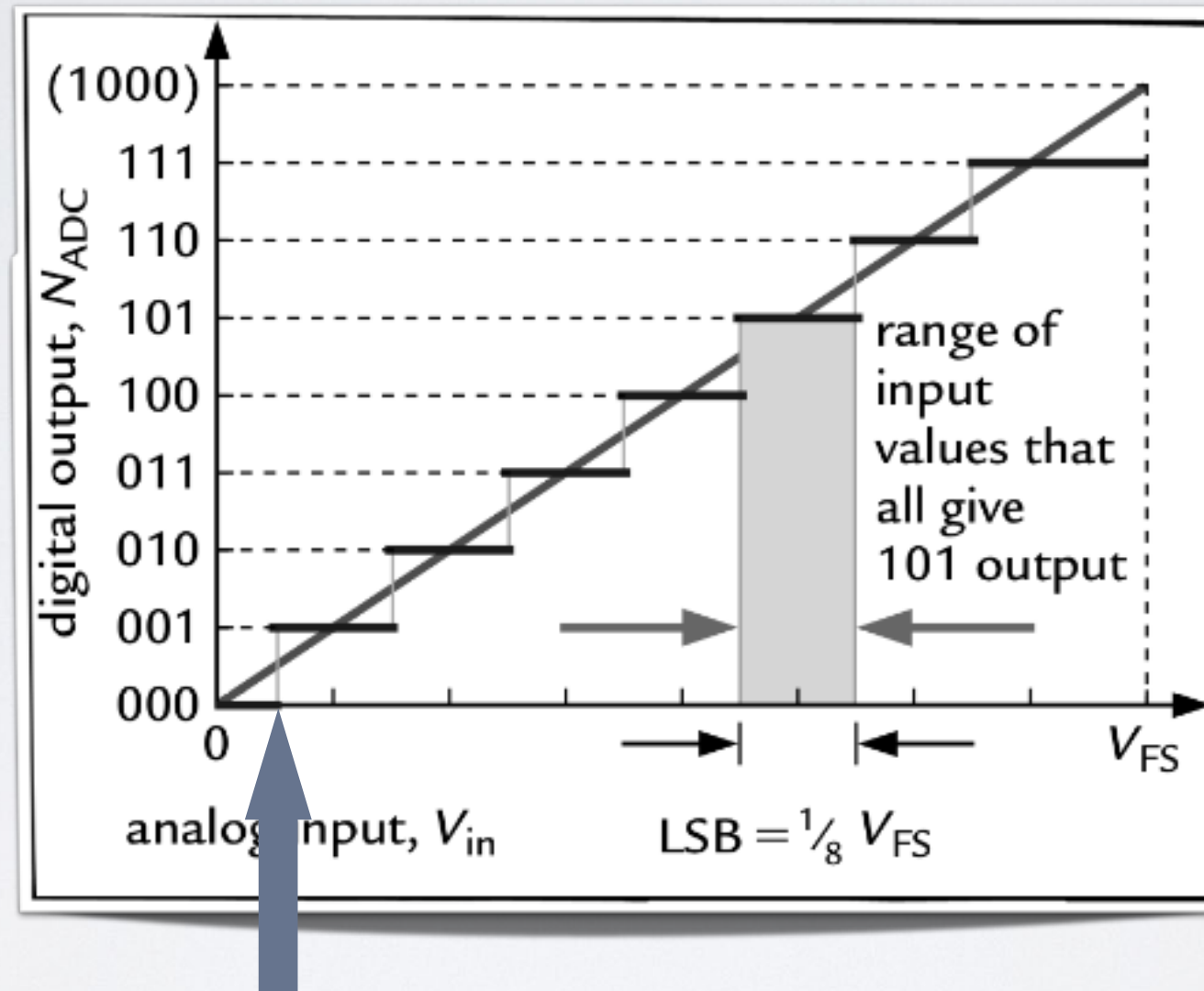


# CONVERSÃO A/D



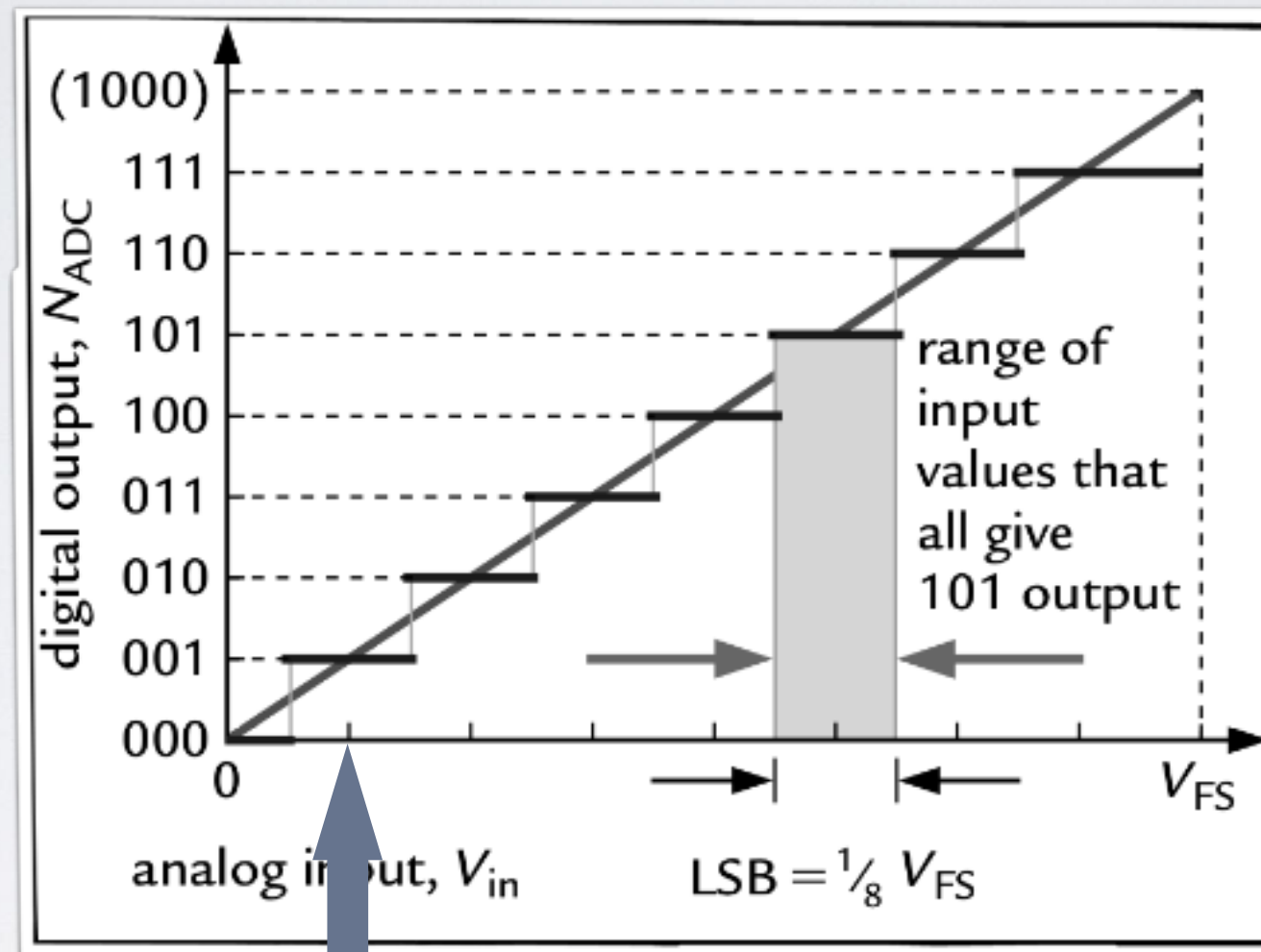
Se  $V_{in} = 0 \text{ V}$ , então  $N_{adc} = 000$

# CONVERSÃO A/D



Se  $V_{in}$  passa de  $V_{fs}/16$ , então  $N_{adc} = 001$

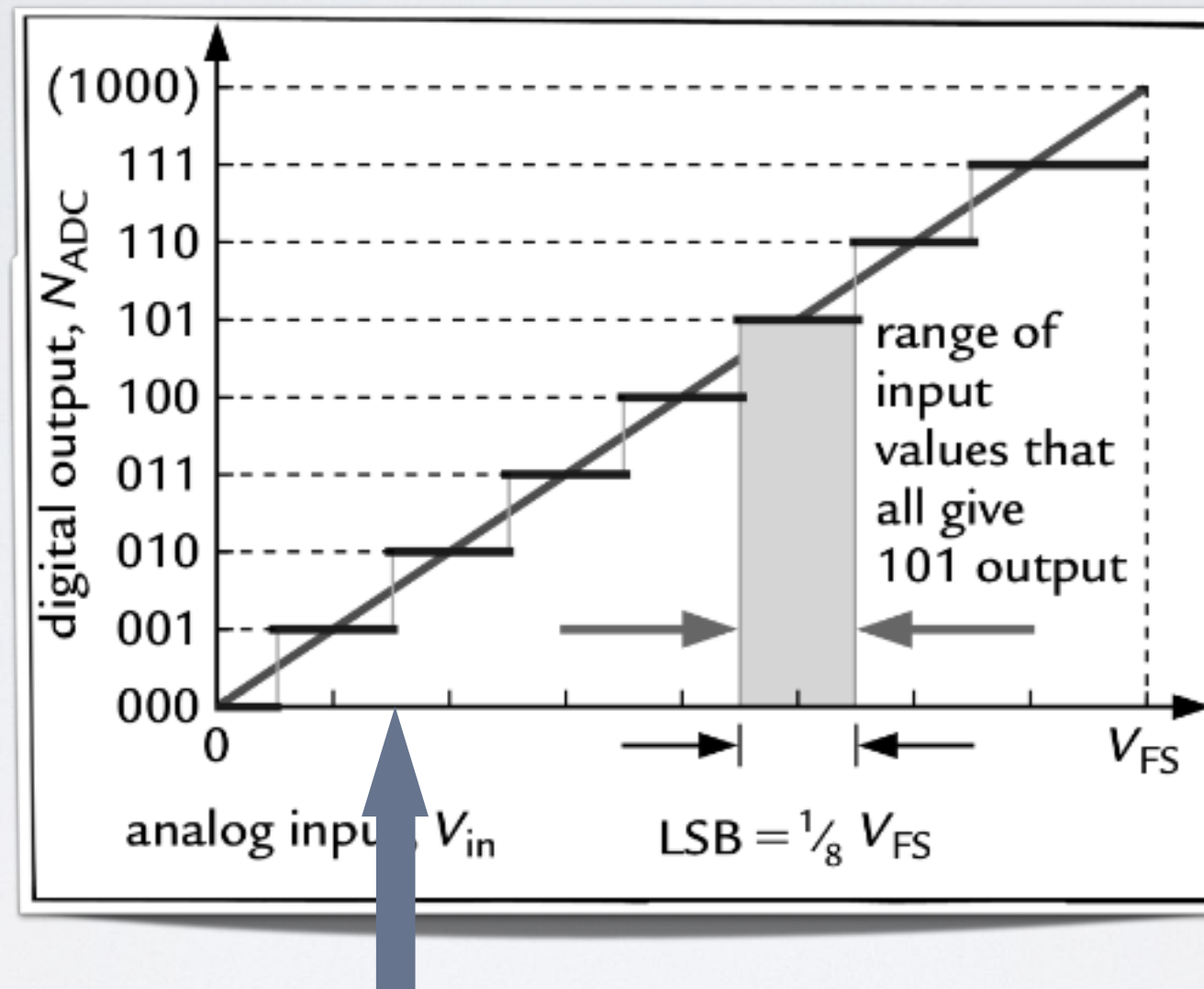
# CONVERSÃO A/D



Se  $V_{in} = V_{FS}/8$ , então  $N_{ADC} = 001$

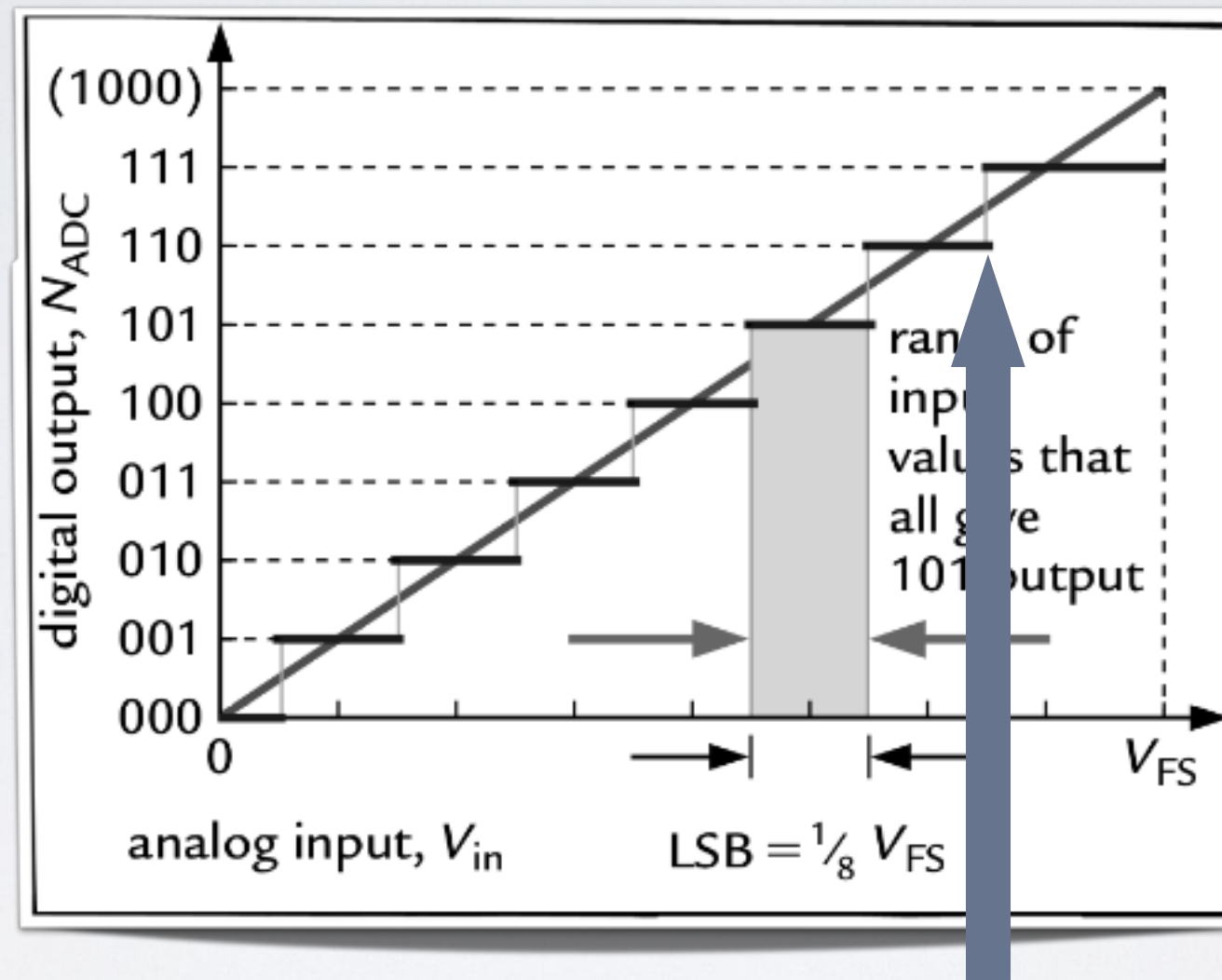


# CONVERSÃO A/D



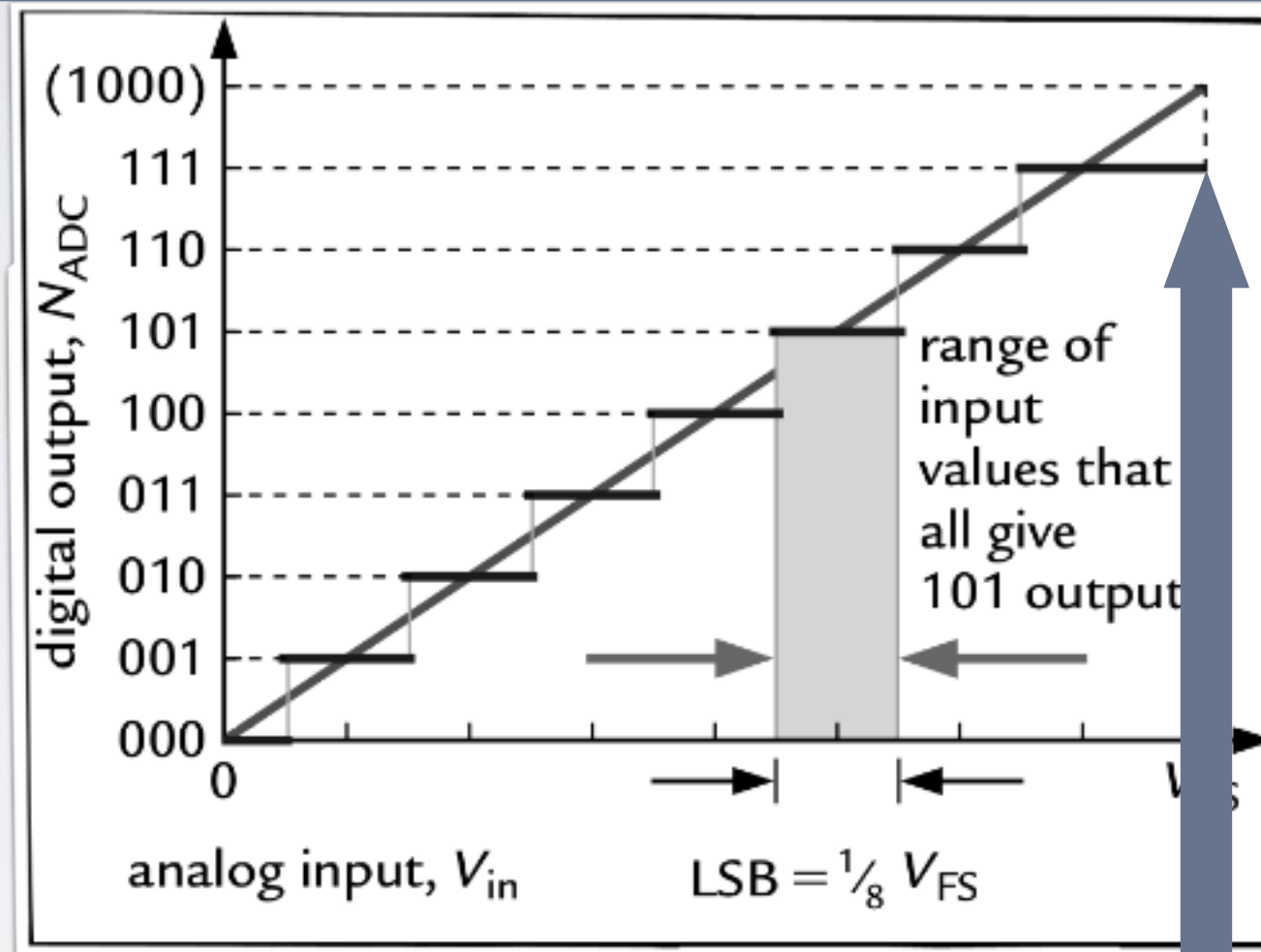
Se  $V_{in}$  passa de  $3V_{fs}/16$ , então  $N_{adc} = 010$

# CONVERSÃO A/D



Se  $V_{in}$  passa de  $13V_{fs}/16$ , então  $N_{adc} = 111$

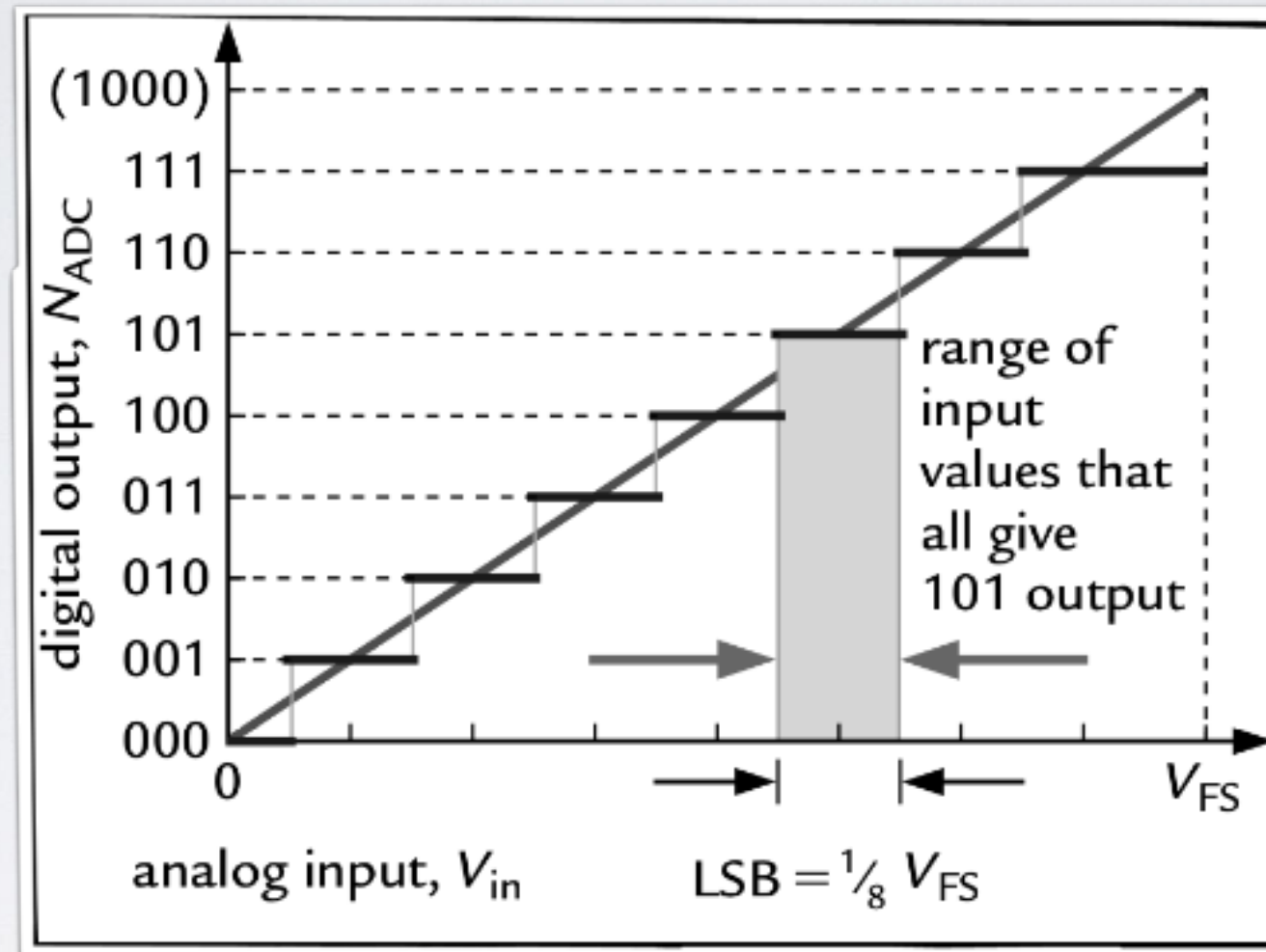
**Seriam necessários mais bits do que o conversor A/D possui; logo, ele satura.**



Se  $V_{in}$  passa de  $13V_{fs}/16$ , então  $N_{adc} = 111$

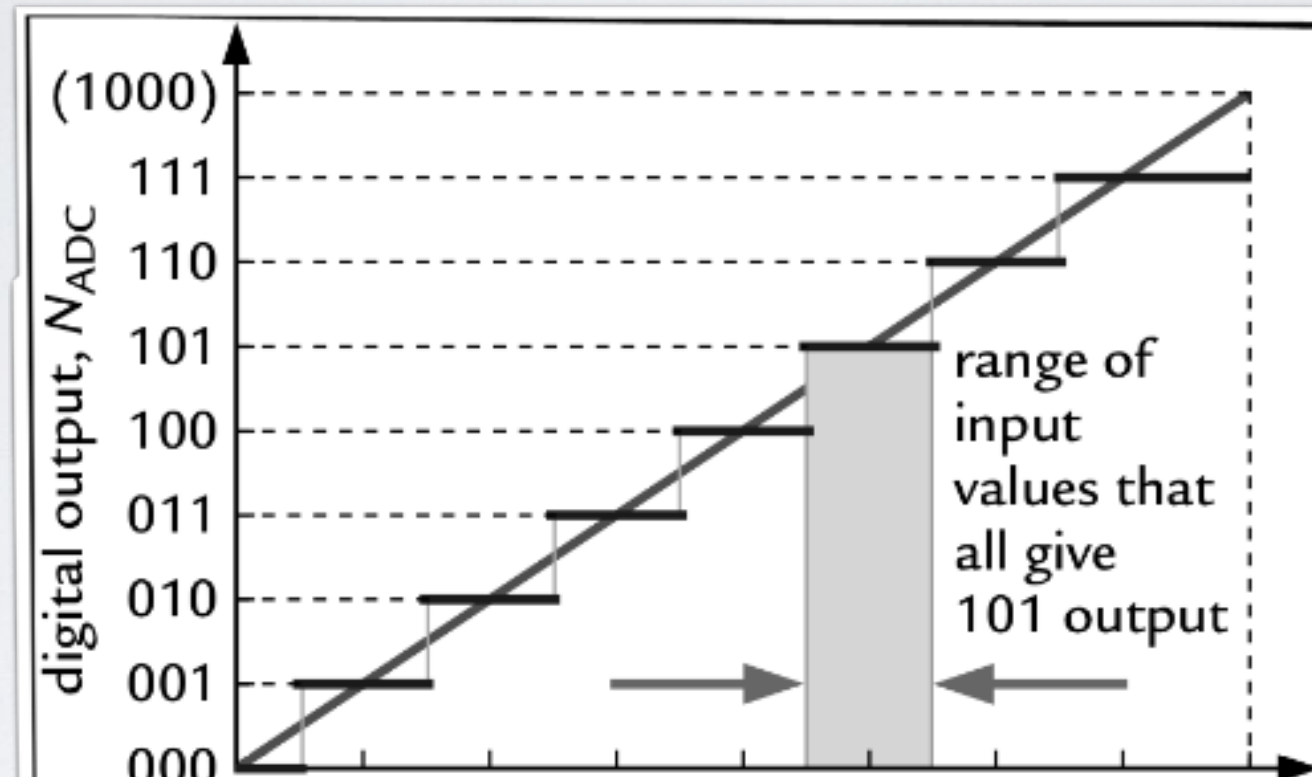


# CONVERSÃO A/D



$$N_{ADC} = \text{nint} \left( 2^N \frac{V_{in}}{V_{FS}} \right),$$

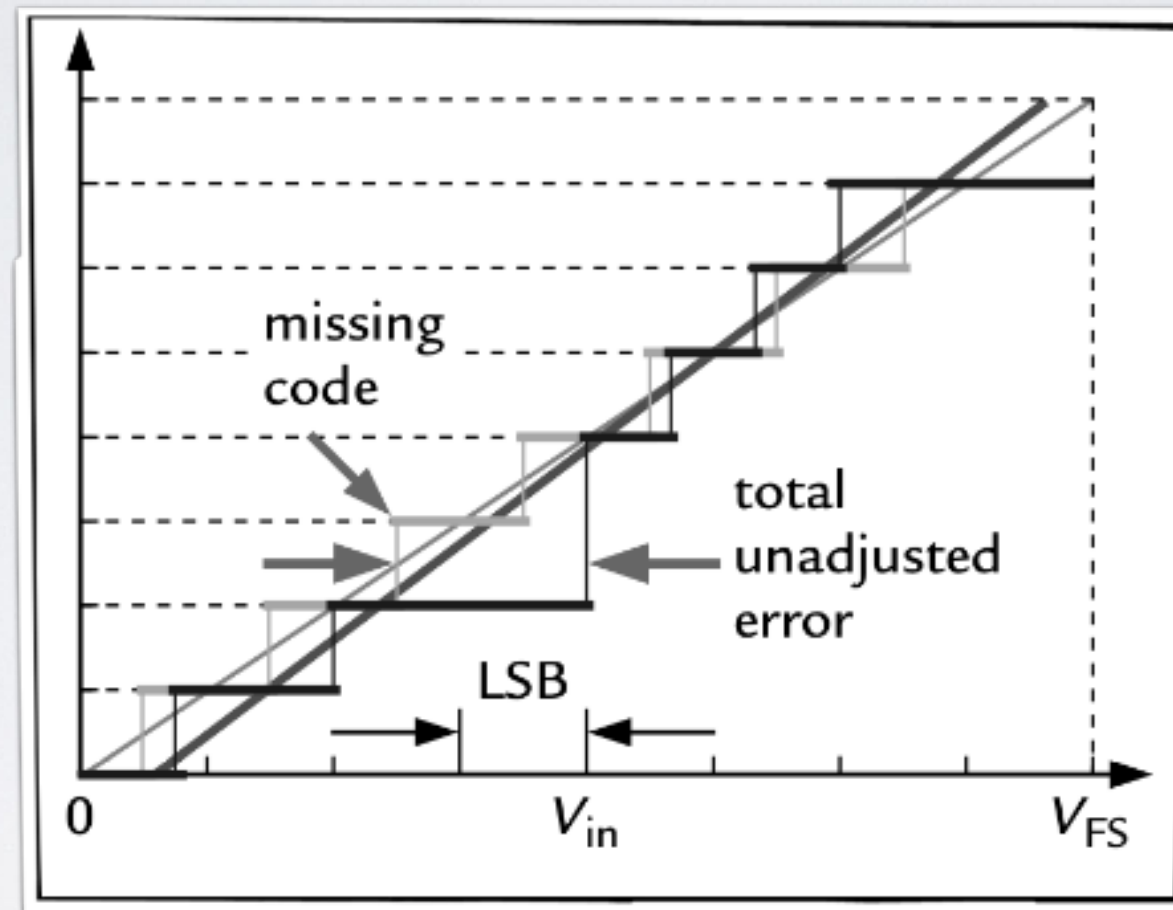
# CONVERSÃO A/D



**nint(x) - inteiro mais próximo a x**

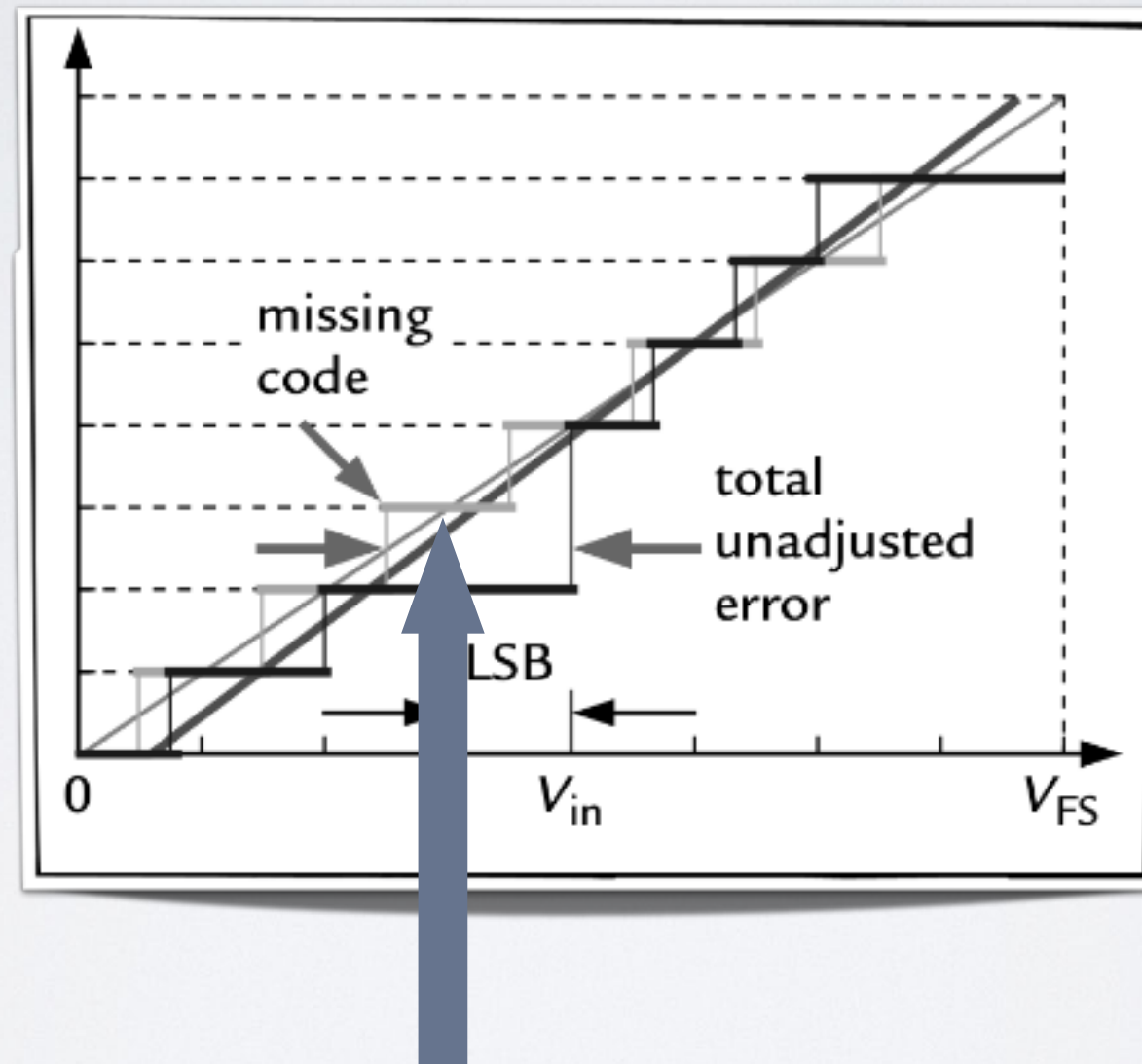
$$N_{ADC} = \text{nint} \left( 2^N \frac{V_{in}}{V_{FS}} \right),$$

# ERROS NA CONVERSÃO A/D



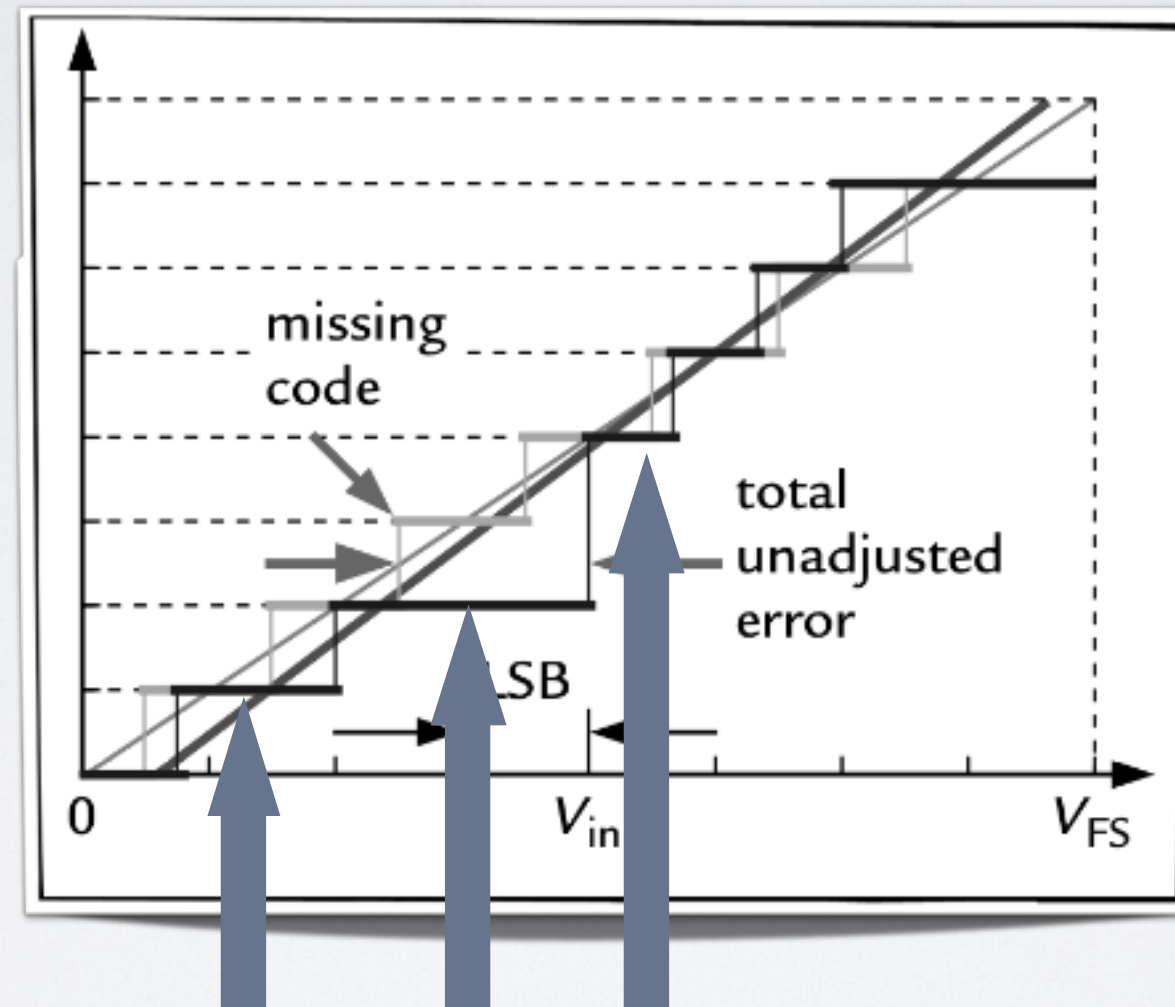


# ERROS NA CONVERSÃO A/D



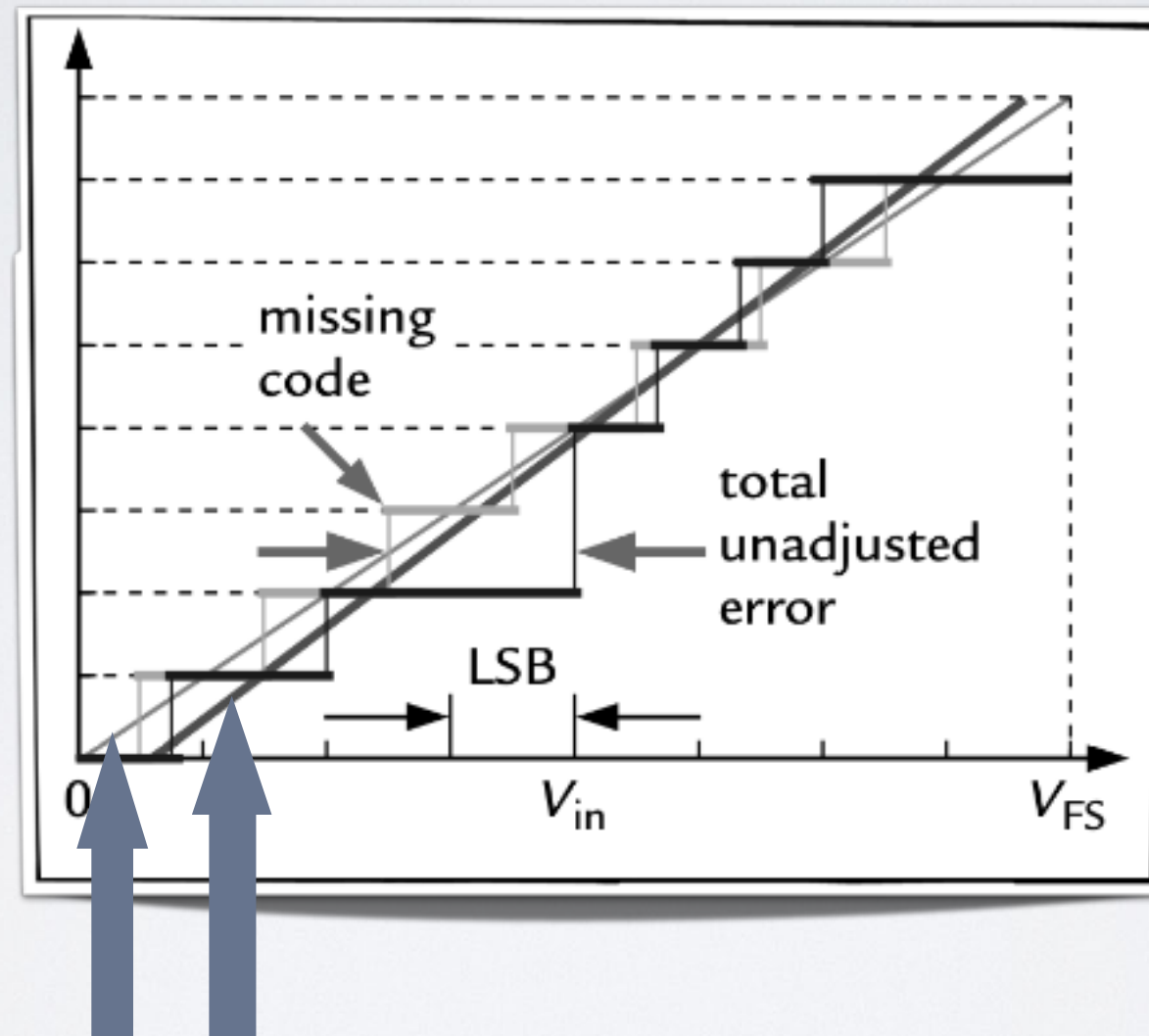
*Missing code* - o código 011 nunca é atingido.

# ERROS NA CONVERSÃO A/D



Não-linearidade diferencial - a largura das faixas para cada código são diferentes.

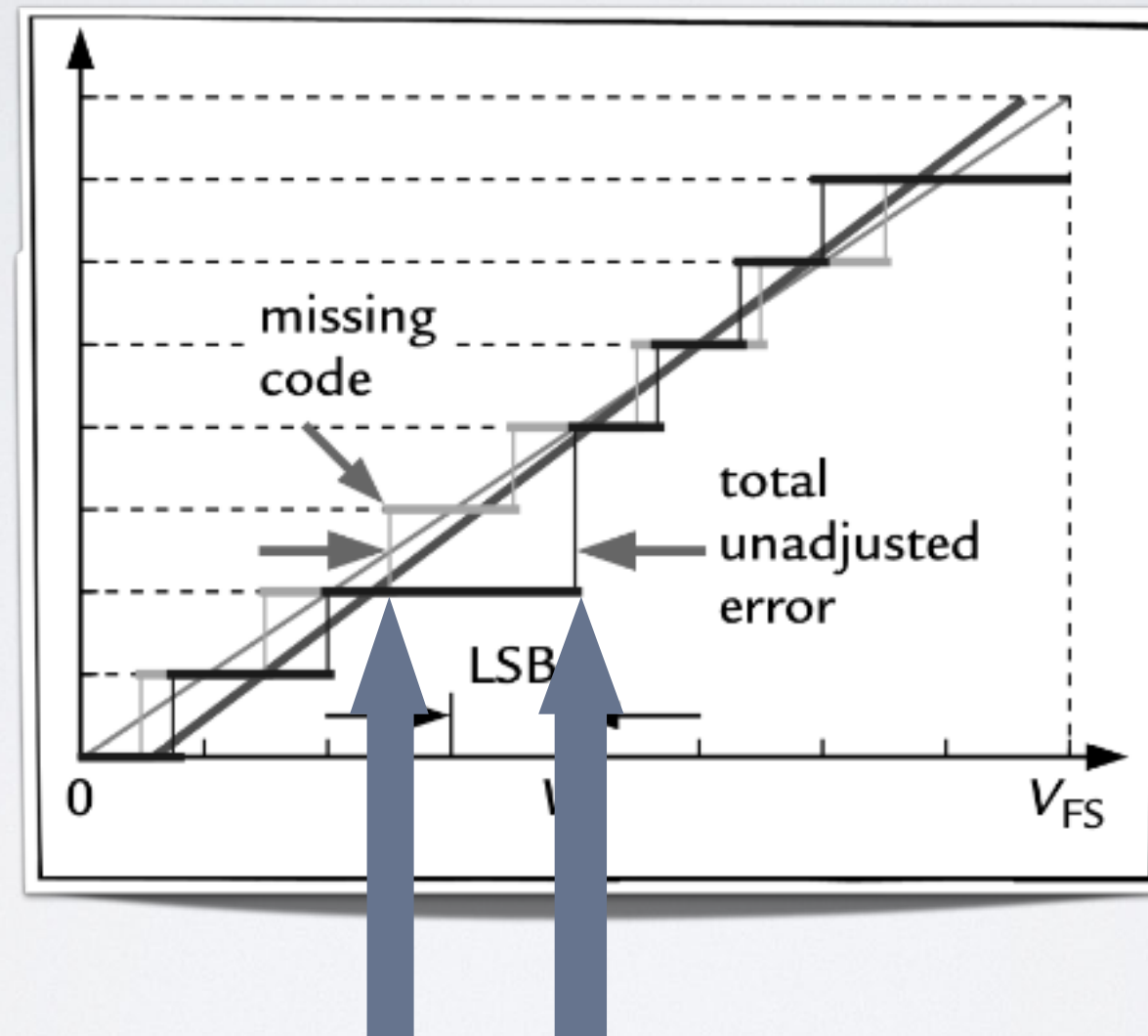
# ERROS NA CONVERSÃO A/D



Erro de ganho do conversor A/D - a linha que aproxima a "função-escada" está diferente da ideal



# ERROS NA CONVERSÃO A/D



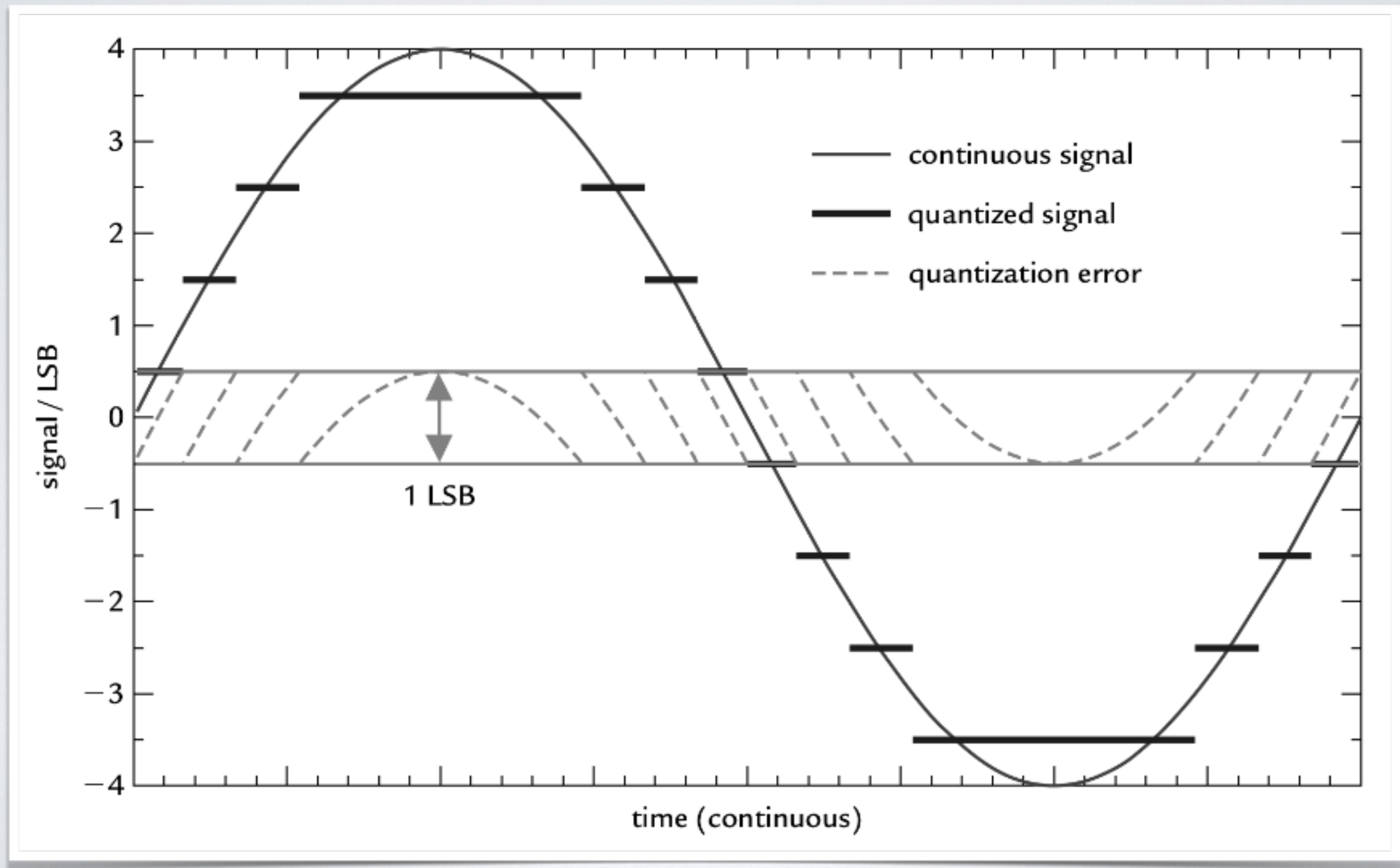
Erro de desajuste total - maior erro em relação à conversão A/D ideal

# RAZÃO SINAL/RUÍDO (SNR)

A quantização, ou escalonamento, introduz erro no sinal medido.

Por exemplo, se  $V_i(0) = 2,14 \text{ V}$  e  $N_{adc}[0] = 2$ , o erro de quantização é de  $0,14 \text{ V}$ .

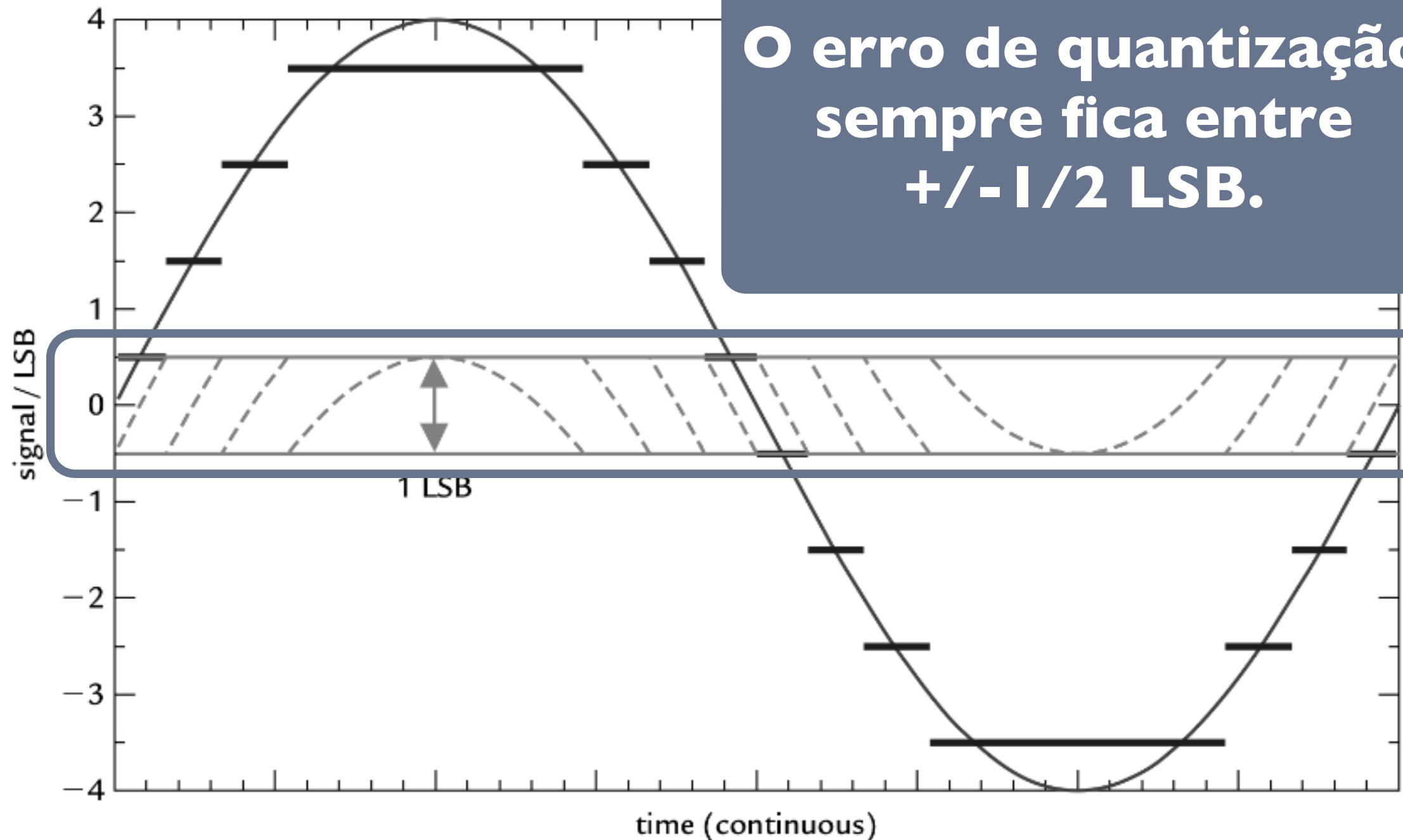
# RAZÃO SINAL/RUÍDO (SNR)





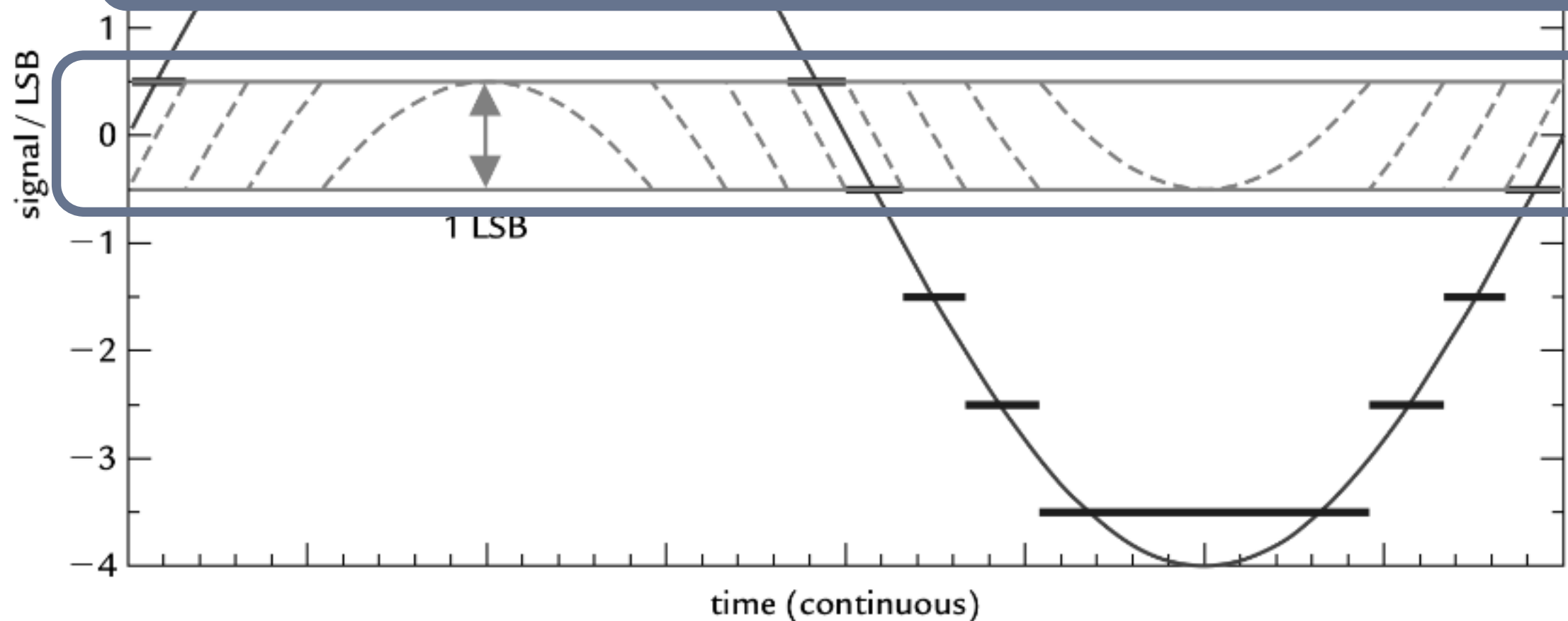
# RAZÃO SINAL/RUÍDO (SNR)

○ erro de quantização sempre fica entre  $\pm 1/2$  LSB.



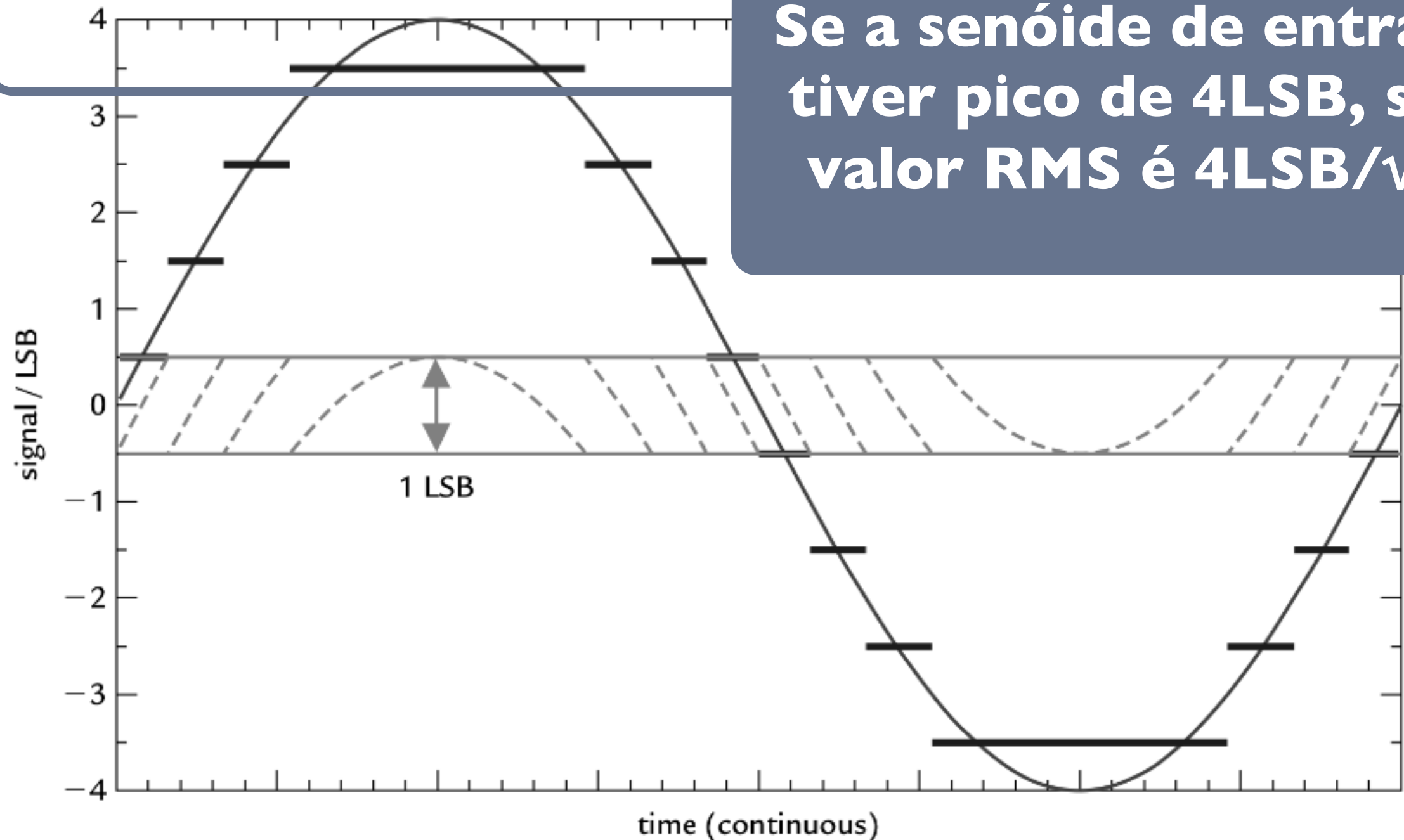
# RAZÃO SINAL/RUÍDO (SNR)

**Se a chance deste erro for a mesma para qualquer valor entre  $\pm 1/2$  LSB, o valor RMS deste erro é  $\text{LSB}/\sqrt{12}$ .**



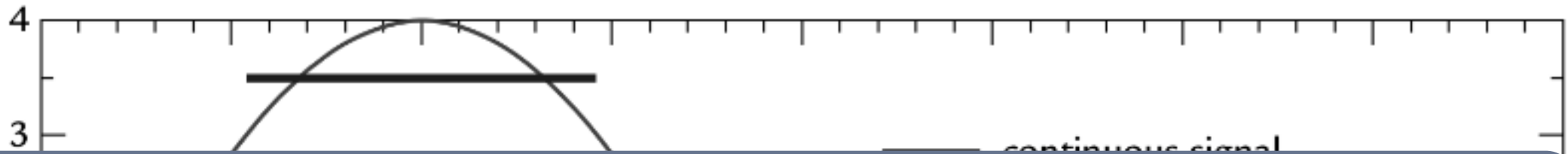
# RAZÃO SINAL/RUÍDO (SNR)

**Se a senóide de entrada tiver pico de 4LSB, seu valor RMS é  $4\text{LSB}/\sqrt{2}$ .**





# RAZÃO SINAL/RUÍDO (SNR)

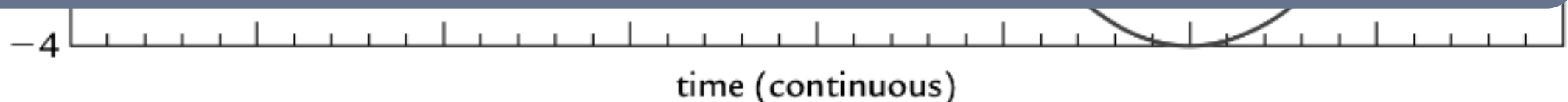


**A razão sinal/ruído é dada por**

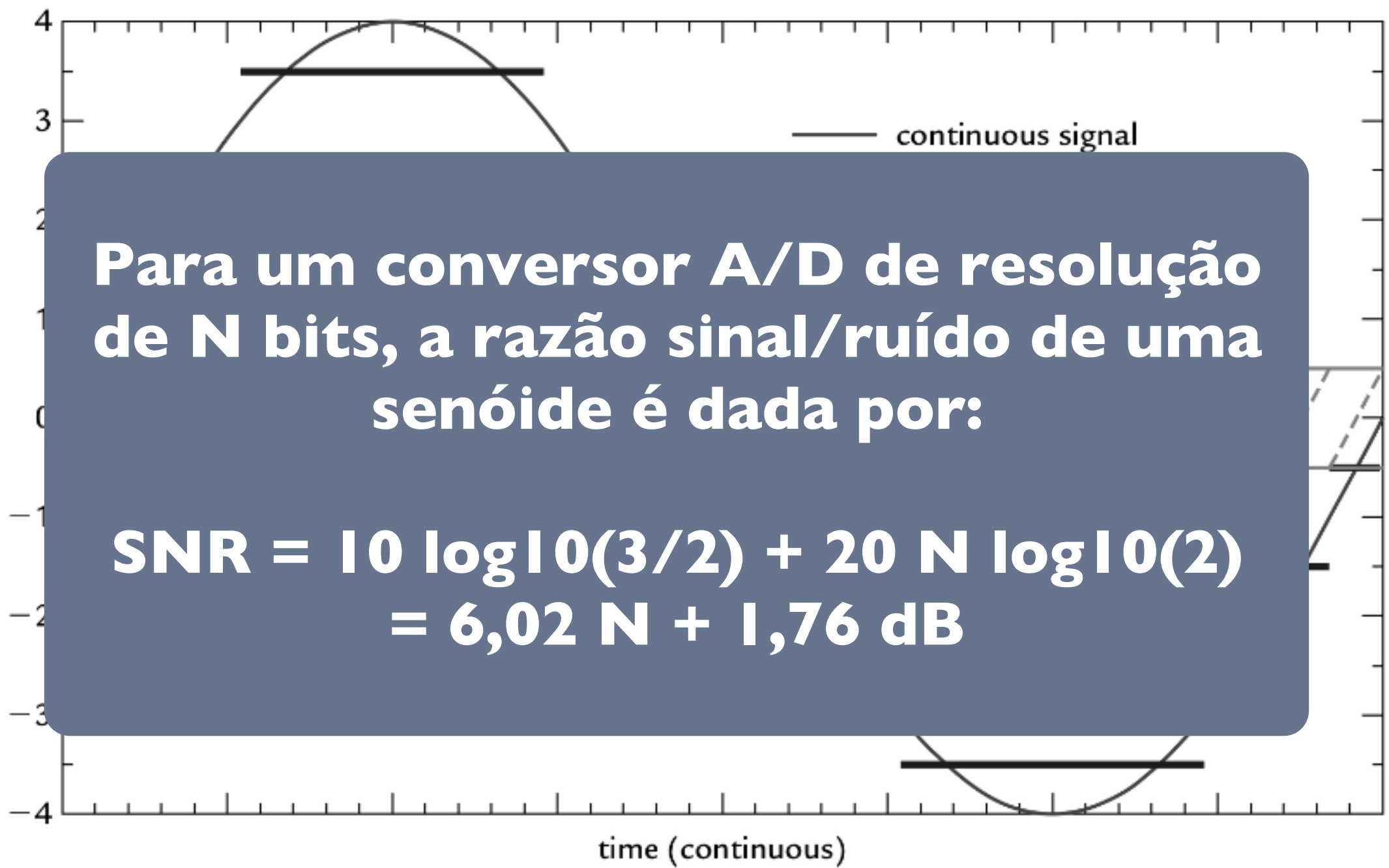
$$\text{SNR} = 20 \log_{10}(\text{RMS}(\text{sinal})/\text{RMS}(\text{ruído}))$$

$$= 20 \log_{10}(4\text{LSB}/\sqrt{2} / (\text{LSB}/\sqrt{12}))$$

$$= 20 \log_{10}(4\sqrt{6}) = 19,823 \text{ dB}$$



# RAZÃO SINAL/RUÍDO (SNR)



**Para um conversor A/D de resolução de N bits, a razão sinal/ruído de uma senóide é dada por:**

$$\begin{aligned}\text{SNR} &= 10 \log_{10}(3/2) + 20 N \log_{10}(2) \\ &= 6,02 N + 1,76 \text{ dB}\end{aligned}$$

# FREQUÊNCIA DE AMOSTRAGEM

Vejamos como a amostragem afeta o sinal.

Considere:

$$V_1(t) = \cos(2\pi * 310t)$$

$$V_2(t) = \cos(2\pi * 690t)$$



# FREQUÊNCIA DE AMOSTRAGEM

Se pegarmos amostras a cada 1 ms,  
teremos:

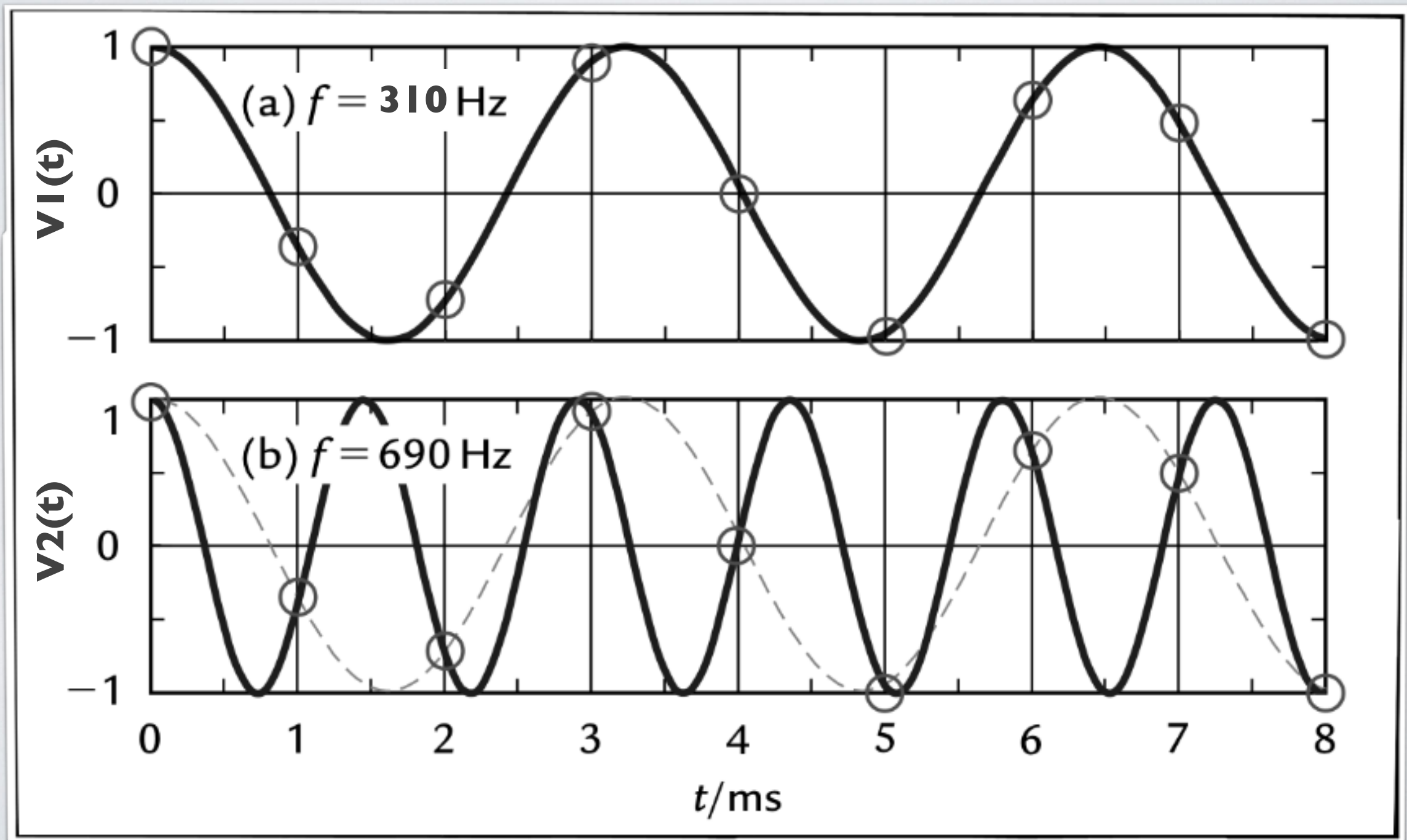
$$V1(0) = V2(0) = 1$$

$$V1(0,001) = V2(0,001) = -0,368$$

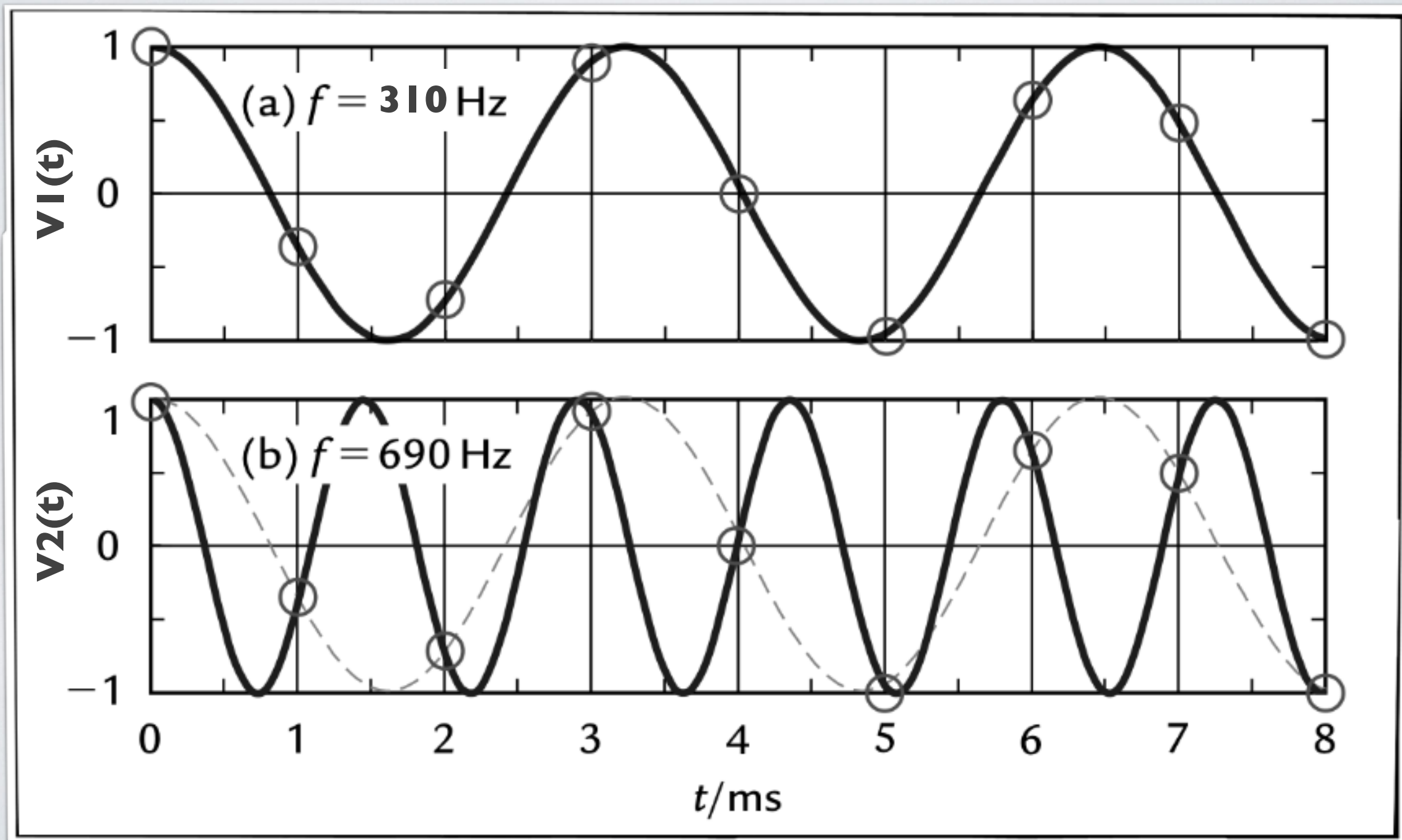
$$V1(0,002) = V2(0,002) = -0,729$$

$$V1(0,003) = V2(0,003) = 0,904$$

# FREQUÊNCIA DE AMOSTRAGEM



Os sinais amostrados de  $V_1(t)$  e  $V_2(t)$  são **INDISTINGUÍVEIS**.





# FREQUÊNCIA DE AMOSTRAGEM

**Para evitar este problema (conhecido como aliasing), a taxa de amostragem  $f_s$  do conversor A/D deve ser maior ou igual a  $2 \cdot f_{\max}$ , onde  $f_{\max}$  é a maior frequência existente no sinal.**

$$f_s \geq f_N = 2f_{\max}$$

# FREQUÊNCIA DE AMOSTRAGEM

**Por exemplo, o ser humano escuta sinais com frequências entre 20 e 20000 Hz. Assim, conversores A/D para áudio devem trabalhar com  $f_s \geq 40\text{kHz}$ .**

**(O sinal de entrada deve ser antes filtrado para frequências acima de 20 kHz).**

$$f_s \geq f_N = 2f_{\max}$$

# FREQUÊNCIA DE AMOSTRAGEM

**Na prática, interfaces de gravação de áudio trabalham com  $f_s = 44,1$  kHz ou 48 kHz.**

**Para qualidade de DVD,  $f_s = 96$  kHz.**

$$f_s \geq f_N = 2f_{\max}$$



# OUTRAS CONSIDERAÇÕES

Alcance do sinal de entrada:

Se  $V_{in}$  oscila entre  $\pm 10 \text{ mV}$ , e o conversor A/D mede tensões entre 0 e 3 V, não se aproveita todo o alcance do conversor A/D.

O sinal de entrada deverá ser deslocado para tensões positivas e amplificado.

# OUTRAS CONSIDERAÇÕES

Tensão de referência:

O conversor A/D mede tensões em relação à tensão de referência. Esta deve ser estável para garantir a estabilidade das medidas.

# OUTRAS CONSIDERAÇÕES

Ruído:

Se houver alguma interferência, como o sinal de 60 Hz da rede elétrica, ela deverá ser filtrada.