

Convertidores analógico-digital (ADC)

1. Introducción
2. Principios de conversión analógica-digital
 - 2.1. Convertidor ideal
 - 2.2. Muestreo de señal
 - 2.3. Error de cuantización
3. Características de catálogo
 - 3.1. Características estáticas
 - 3.2. Características dinámicas

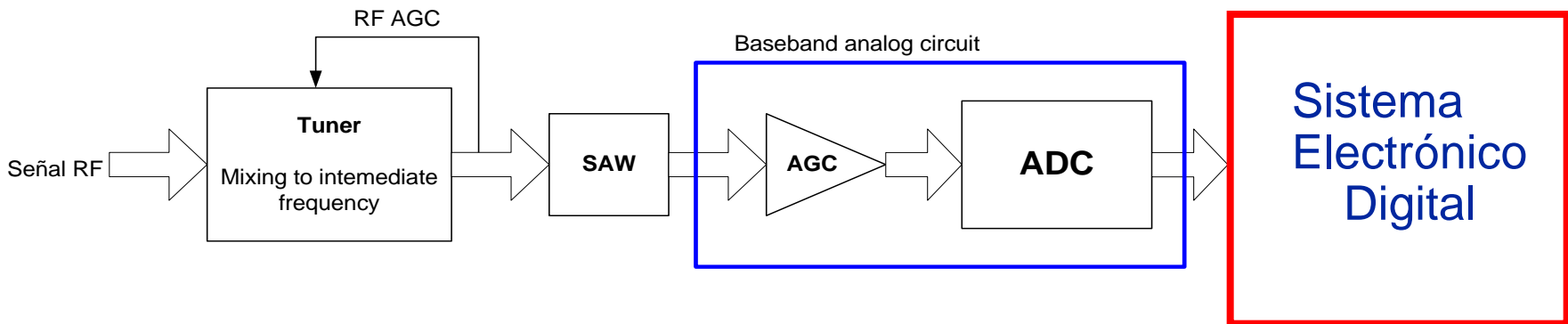
1. Introducción

◆ Aplicaciones convertidores ADC

- ◆ Necesitaremos ADC siempre que queramos **medir** algo del **mundo real**
- ◆ Casi todas las **aplicaciones** de los sistemas electrónicos digitales necesitan convertidores de diferentes características:
 - *Audio digital: 24 bits, 100Ks/s*
 - *DVD: 12-14bits, 100Ms/s*
 - *Automoción (seguridad y control): 8-12bits, 20-30MHz*
 - *Ultrasonidos en aplicaciones médicas: 10-12bits, 40MHz*
 - *Televisión digital: 10-12bits, 80MHz*
 - *Cámaras digitales: 8-14 bits, 60MHz*
 - *Osciloscopios digitales: 8-12bits, GHz*
- ◆ *Un diseñador de sistemas electrónicos digitales debe entender el funcionamiento básico y el **significado de las principales características de catálogo** de los convertidores de datos*

1. Introducción

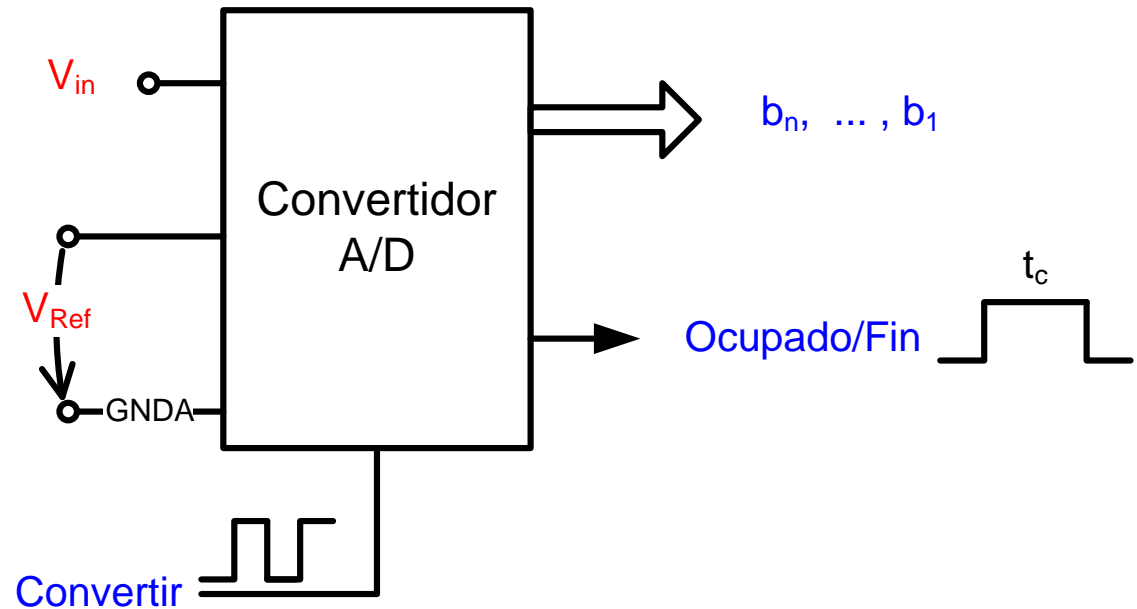
◆ Aplicaciones convertidores ADC: Receptor TV digital



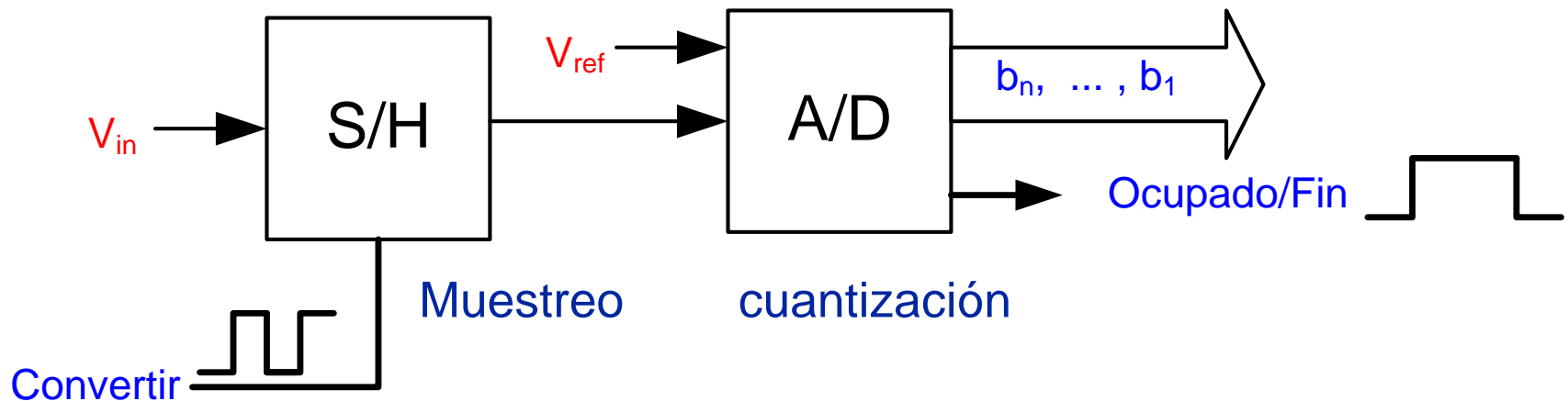
2.1. ADC ideal

◆ ADC ideal

Señal digital
Señal analógica

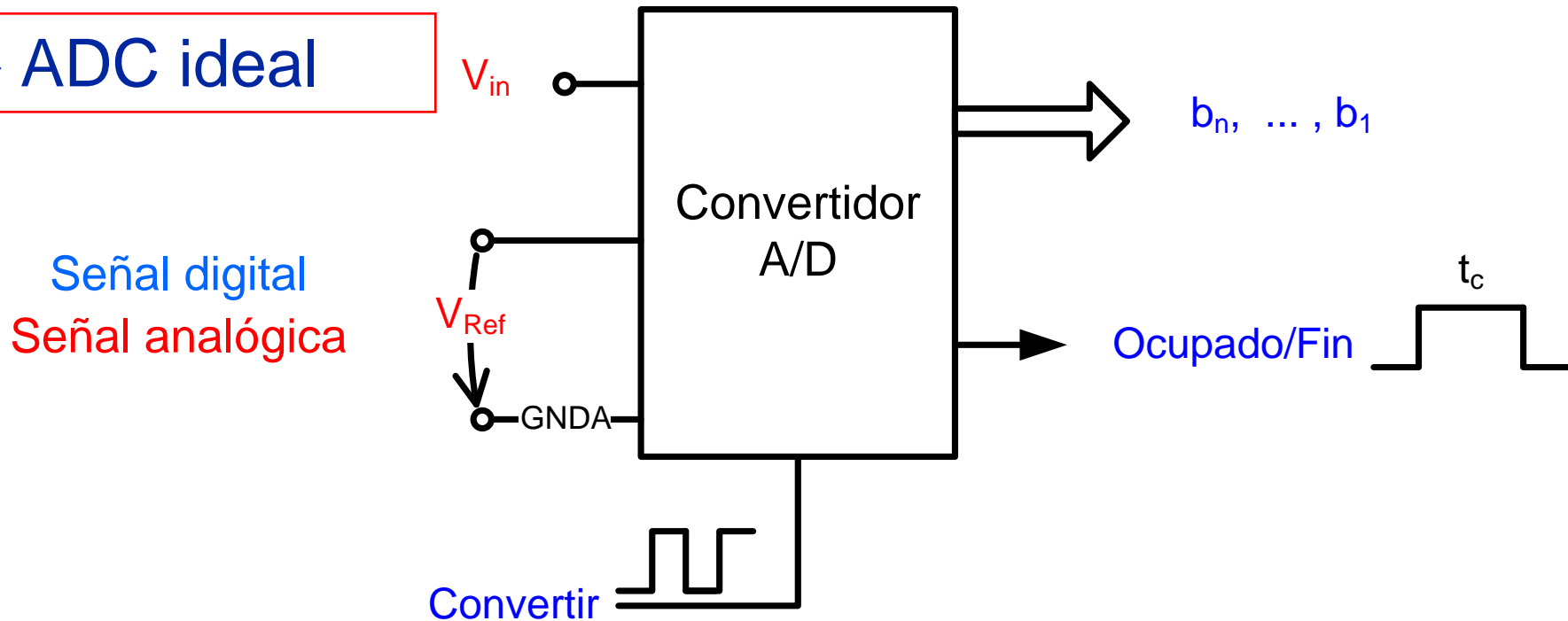


◆ ADC → Sistema muestreado



2.1. ADC ideal

◆ ADC ideal



- ◆ El ADC, a partir de una tensión analógica V_{in} , determina una palabra digital de n bits (b_n, \dots, b_1) tal que:

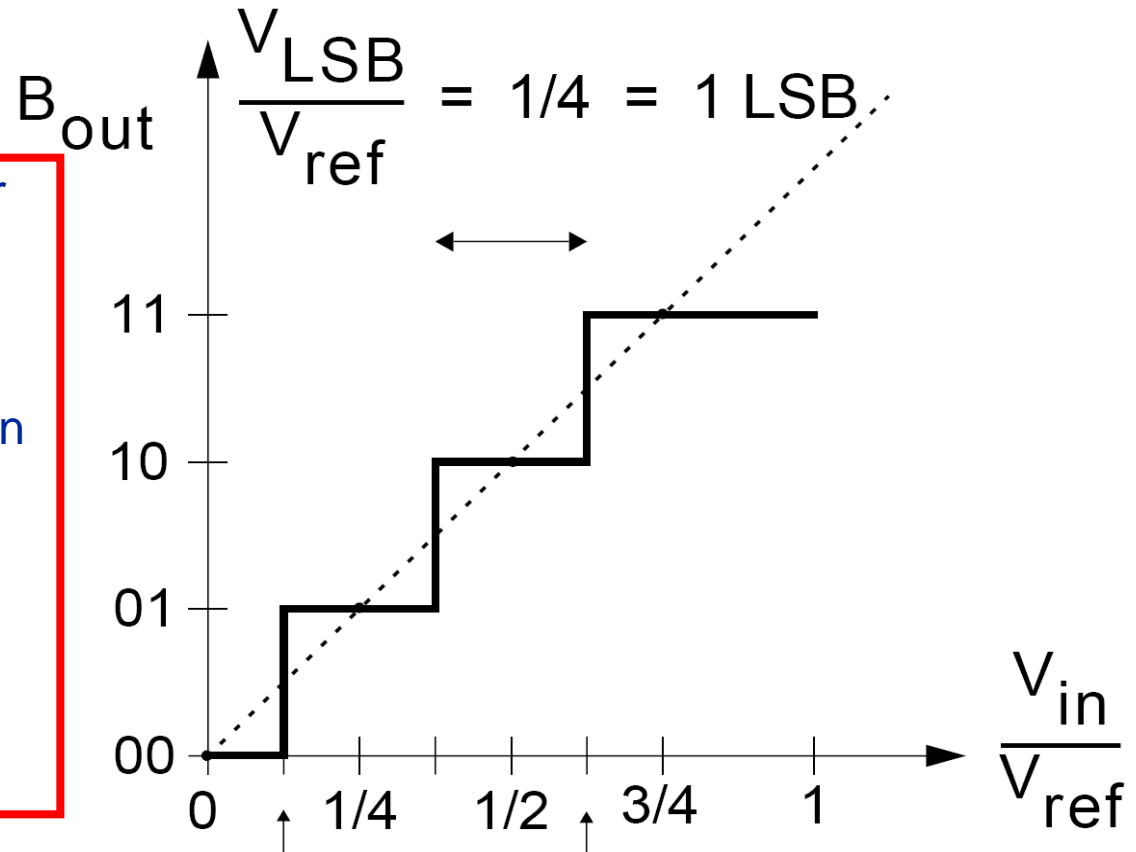
$$V_{ref}(b_1 2^{-1} + b_2 2^{-2} + \dots + b_N 2^{-N}) = V_{in} \pm V_x$$

$$-\frac{1}{2}V_{LSB} \leq V_x < \frac{1}{2}V_{LSB}$$

2.1. ADC ideal

◆ ADC ideal

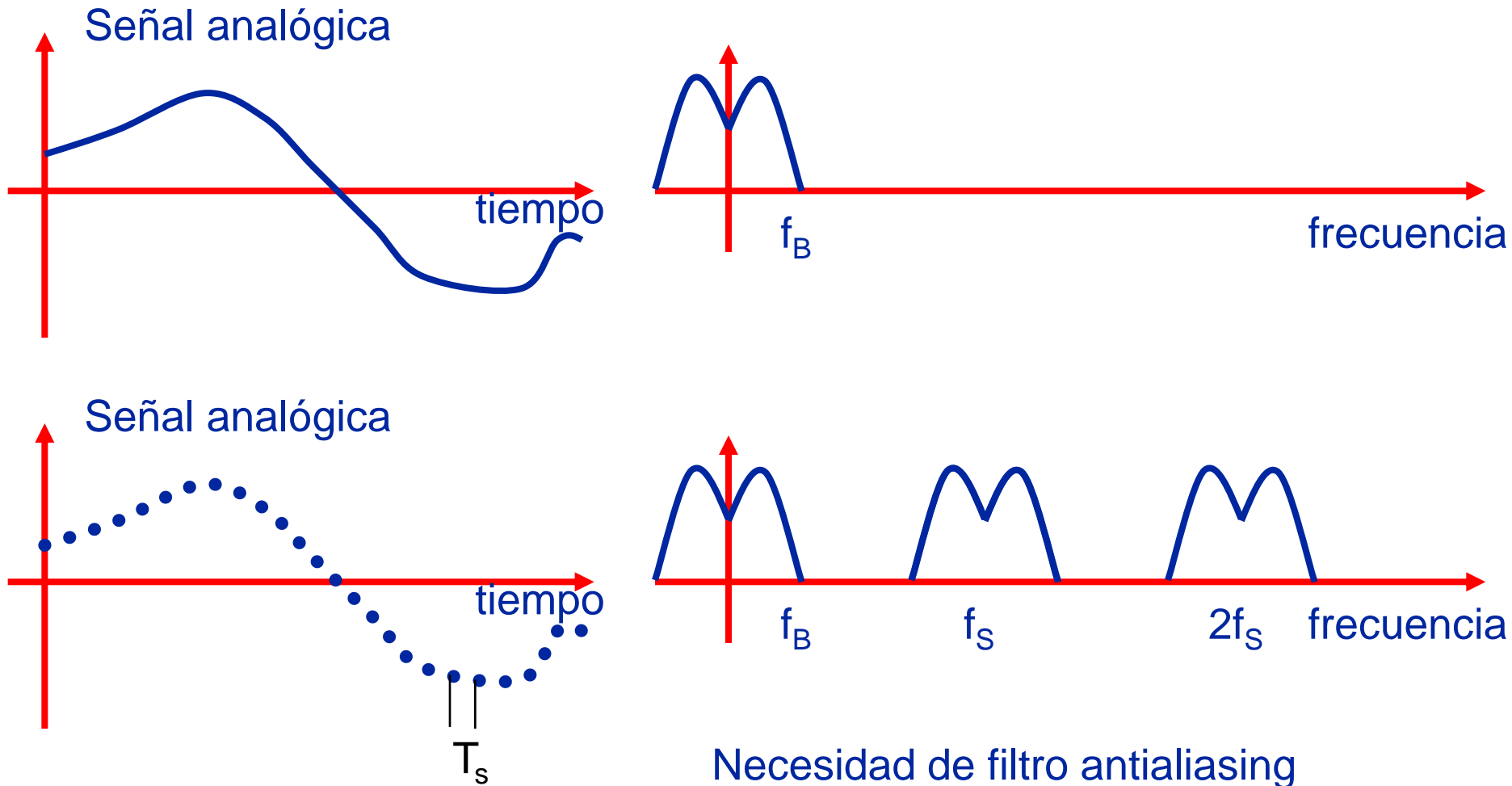
- ◆ Se decide el mismo valor digital para un rango de valores analógicos → **Error de cuantización**
- ◆ Si el error de cuantización es mayor de $\pm 0.5V_{LSB}$, el ADC está **saturado**
- ◆ En el ejemplo, para que no exista saturación V_{in} debe estar comprendido entre $-1/8 V_{ref}$ y $7/8 V_{ref}$



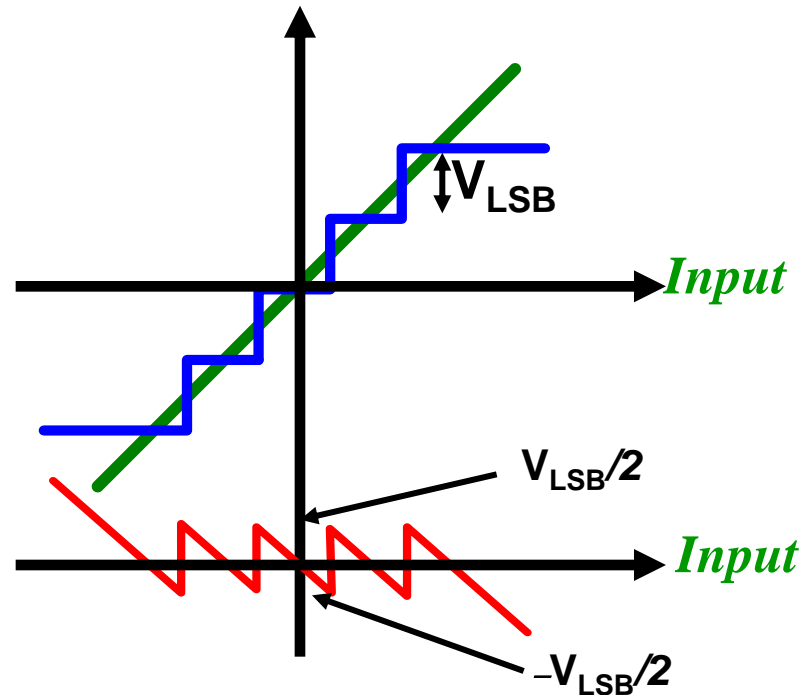
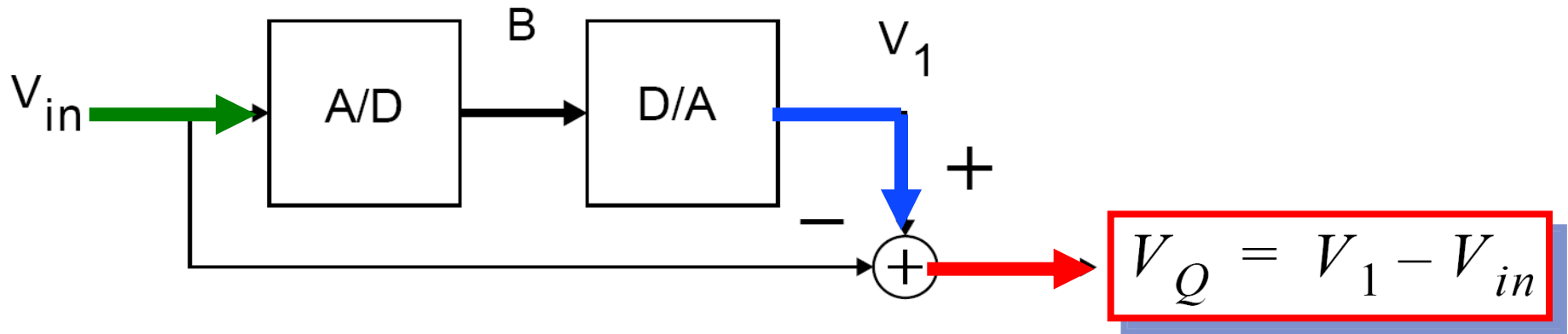
$$V_{ref}(b_1 2^{-1} + b_2 2^{-2} + \dots + b_N 2^{-N}) = V_{in} \pm V_x$$

$$-\frac{1}{2}V_{LSB} \leq V_x < \frac{1}{2}V_{LSB}$$

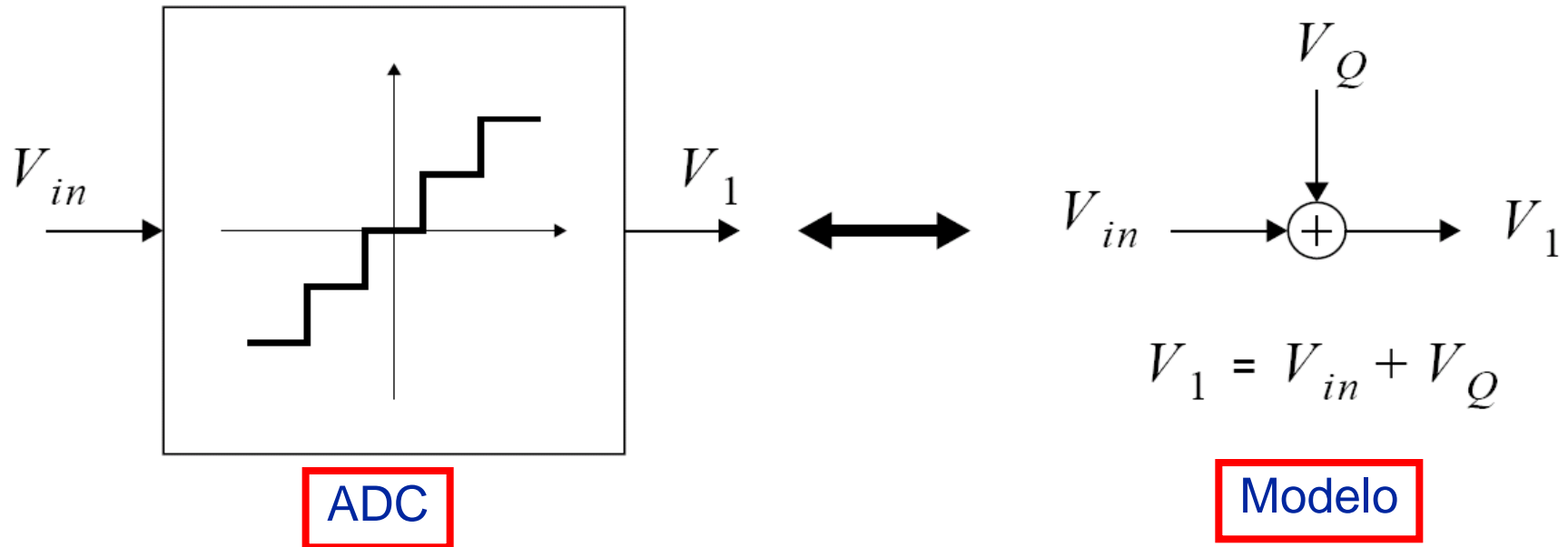
2.2. Muestreo de señal



3.2. Ruido de cuantización



3.2. Ruido de cuantización



- ◆ Consideramos que V_Q es una variable estadística uniformemente distribuida entre $-V_{LSB}/2$ y $V_{LSB}/2$ (**APROXIMACIÓN**)
- ◆ *La media del ruido de cuantización es cero*
- ◆ *La potencia del ruido de cuantización es:*
$$P_q = \frac{V_{LSB}^2}{12}$$

3.2. Ruido de cuantización

$$P_q = \frac{V_{LSB}^2}{12}$$

- ◆ A mayor número de bits de resolución, menor V_{LSB} y por tanto menor ruido de cuantización
- ◆ Si asumimos que la señal de entrada es una senoidal de amplitud igual a $V_{ref}/2$ tenemos:

$$SNR = 10 \log \left(\frac{P_{in}}{P_Q} \right) = 10 \log \left(\frac{A^2/2}{V_{LSB}^2/12} \right) = 10 \log \left(\frac{\left(\frac{V_{ref}}{2} \right)^2 / 2}{\left(\frac{V_{ref}}{2^n} \right)^2 / 12} \right) = 6.02n + 1.76$$

$$SNR = 6.02n + 1.76$$

3.2. Ruido de cuantización

Ejemplo:

Si aplicamos una señal senoidal de 100mVpp a un ADC ideal de 12 bits de resolución con $V_{ref}=5V$

¿Cuál es la SNR esperada a la salida del convertidor?

¿Cuál es la máxima relación señal a ruido que podemos obtener aplicando una señal senoidal al convertidor?

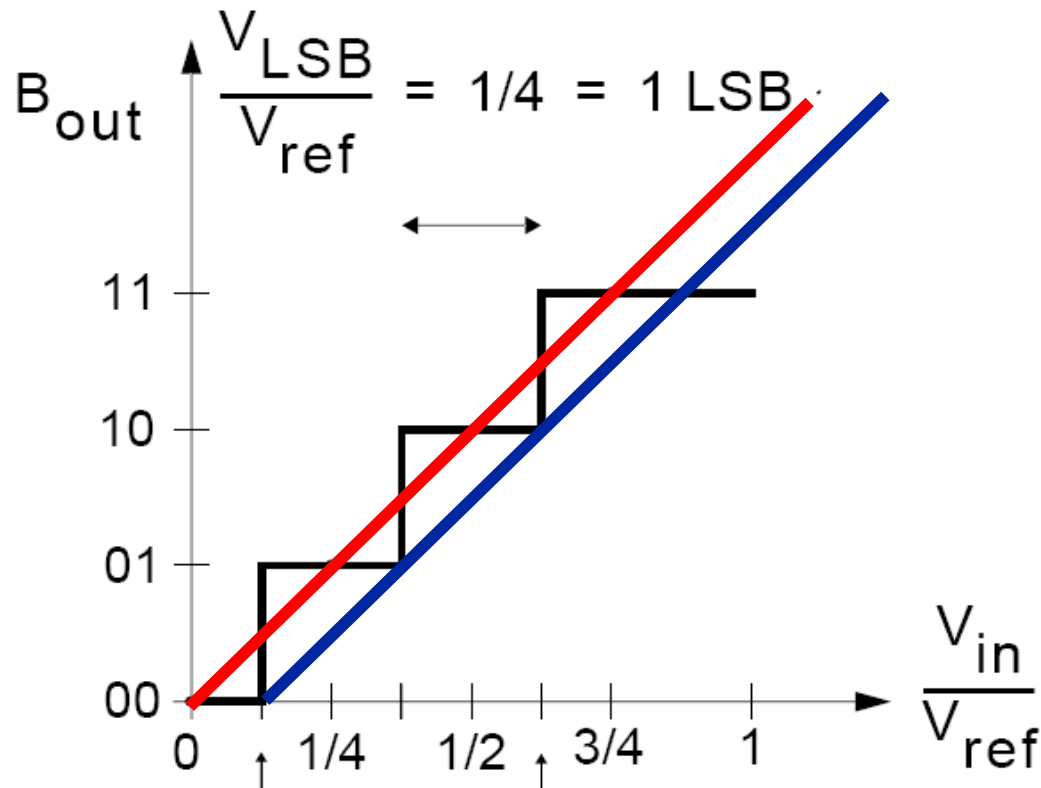
$$SNR = 10 \log \left(\frac{P_{in}}{P_Q} \right) = 10 \log \left(\frac{A^2 / 2}{V_{LSB}^2 / 12} \right) = 10 \log \left(\frac{\left(\frac{50mV}{2} \right)^2 / 2}{\left(\frac{5}{2^{12}} \right)^2 / 12} \right) = 46dB$$

$$SNR_{MAX} = 6.02n + 1.76 = 6.02 \cdot 12 + 1.76 = 74dB$$

3.1. Características estáticas

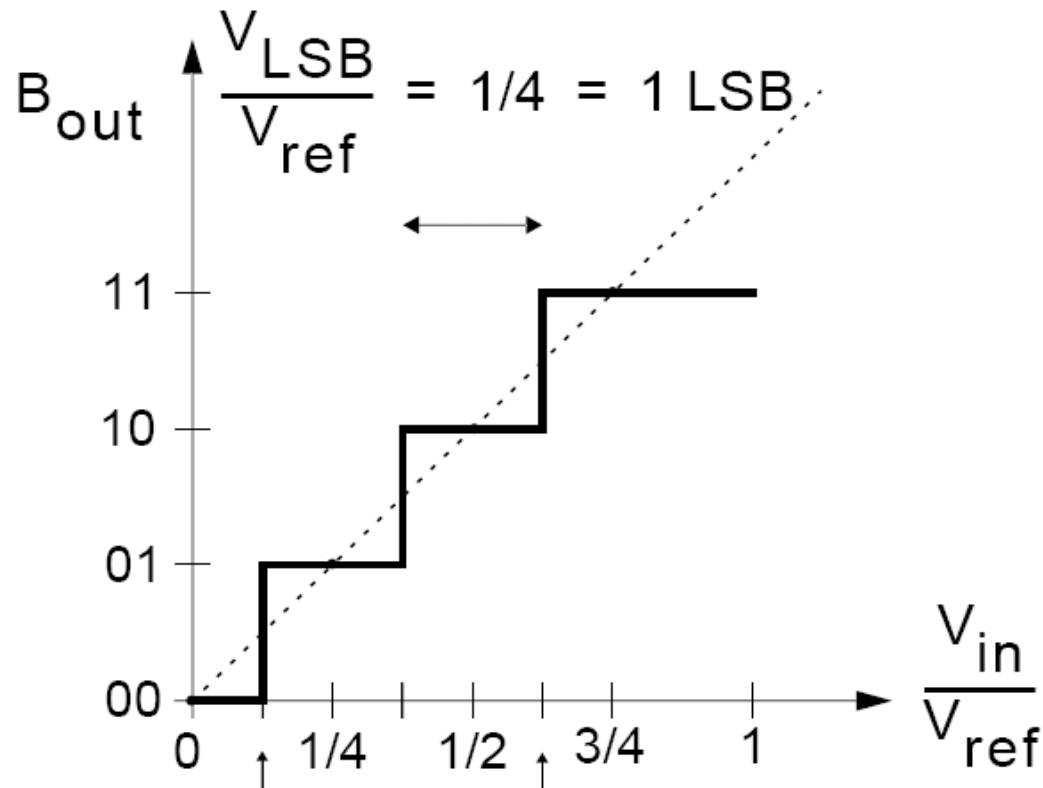
Definición:

- ◆ La curva de la **característica estática** de un ADC viene definida por puntos medios de los escalones.



3.1. Características estáticas

Resolución: Número de bits de la palabra digital a la salida del ADC

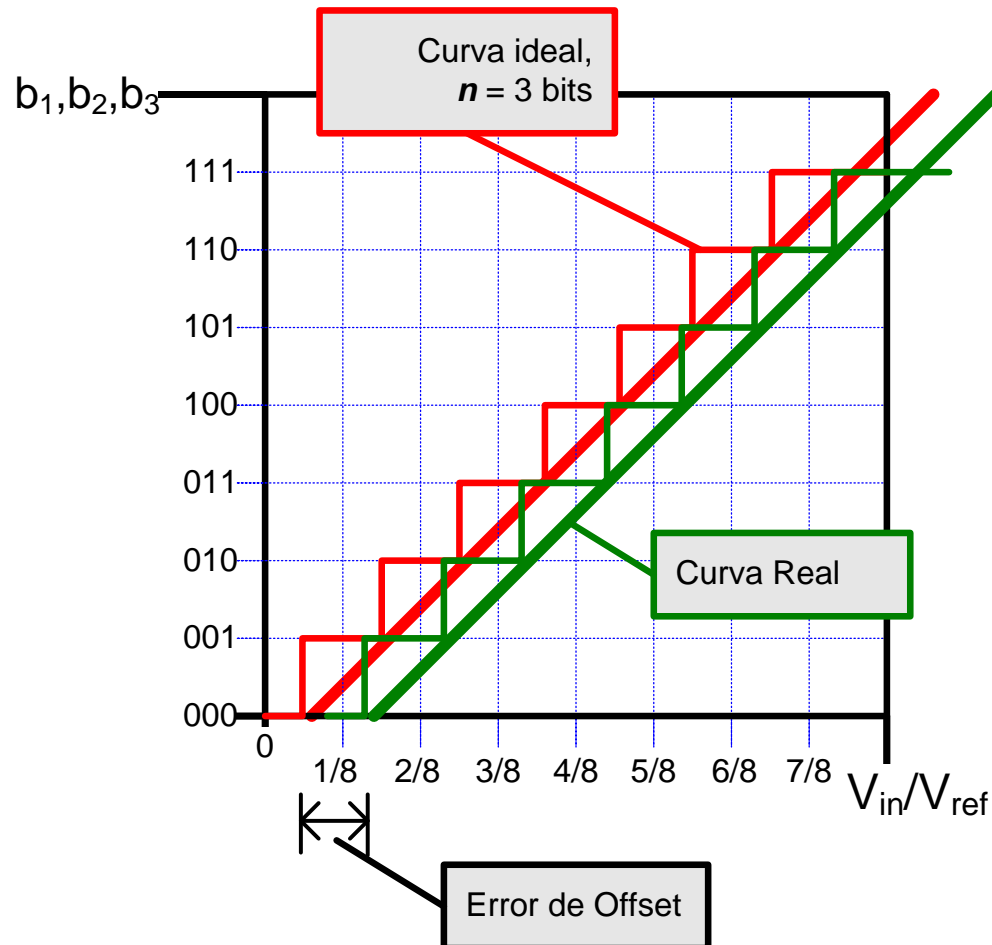


N bits implican 2^N niveles analógicos

3.1. Características estáticas

Error de offset y ganancia:

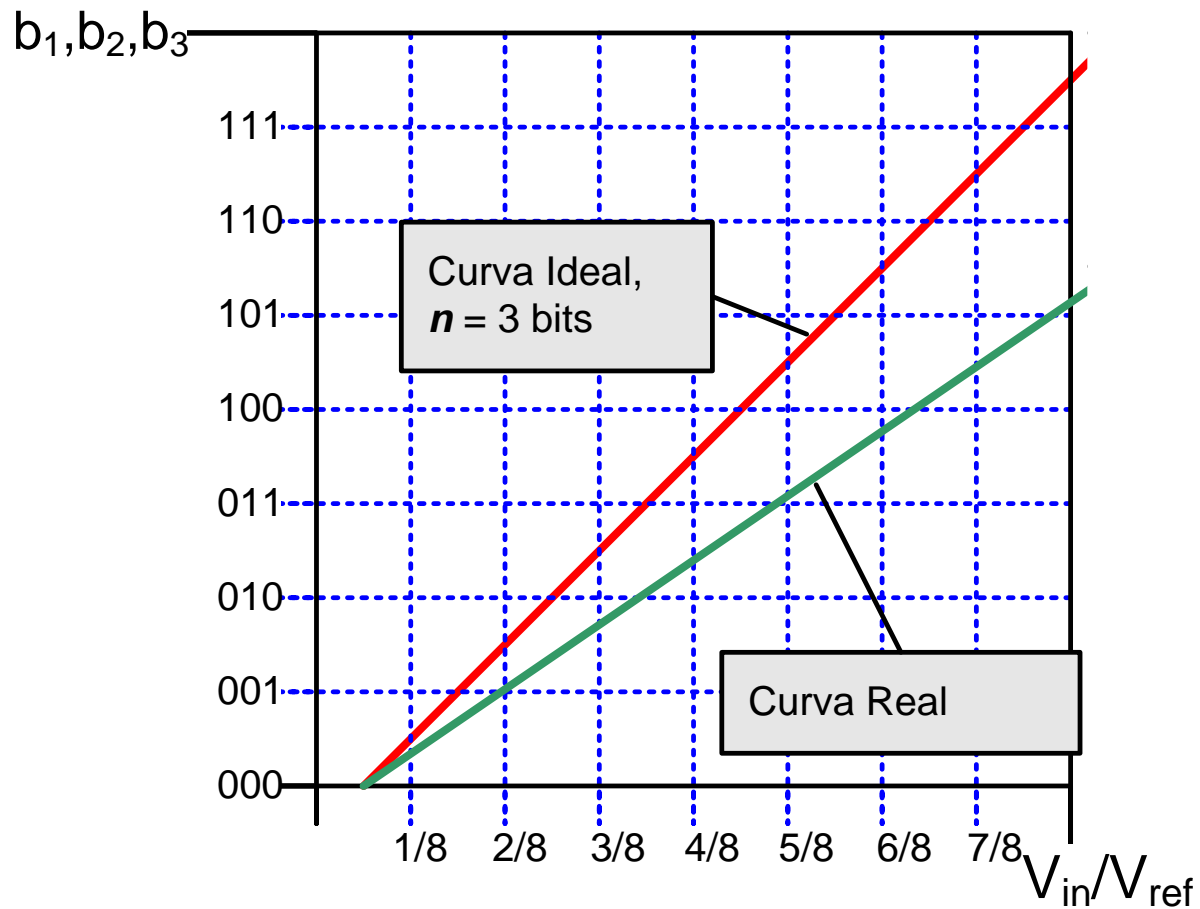
- ◆ El **error de offset** se define como la desviación en el umbral entre los valores digitales “00...00” y “00...01”



3.1. Características estáticas

Error de offset y ganancia:

- ◆ error de ganancia

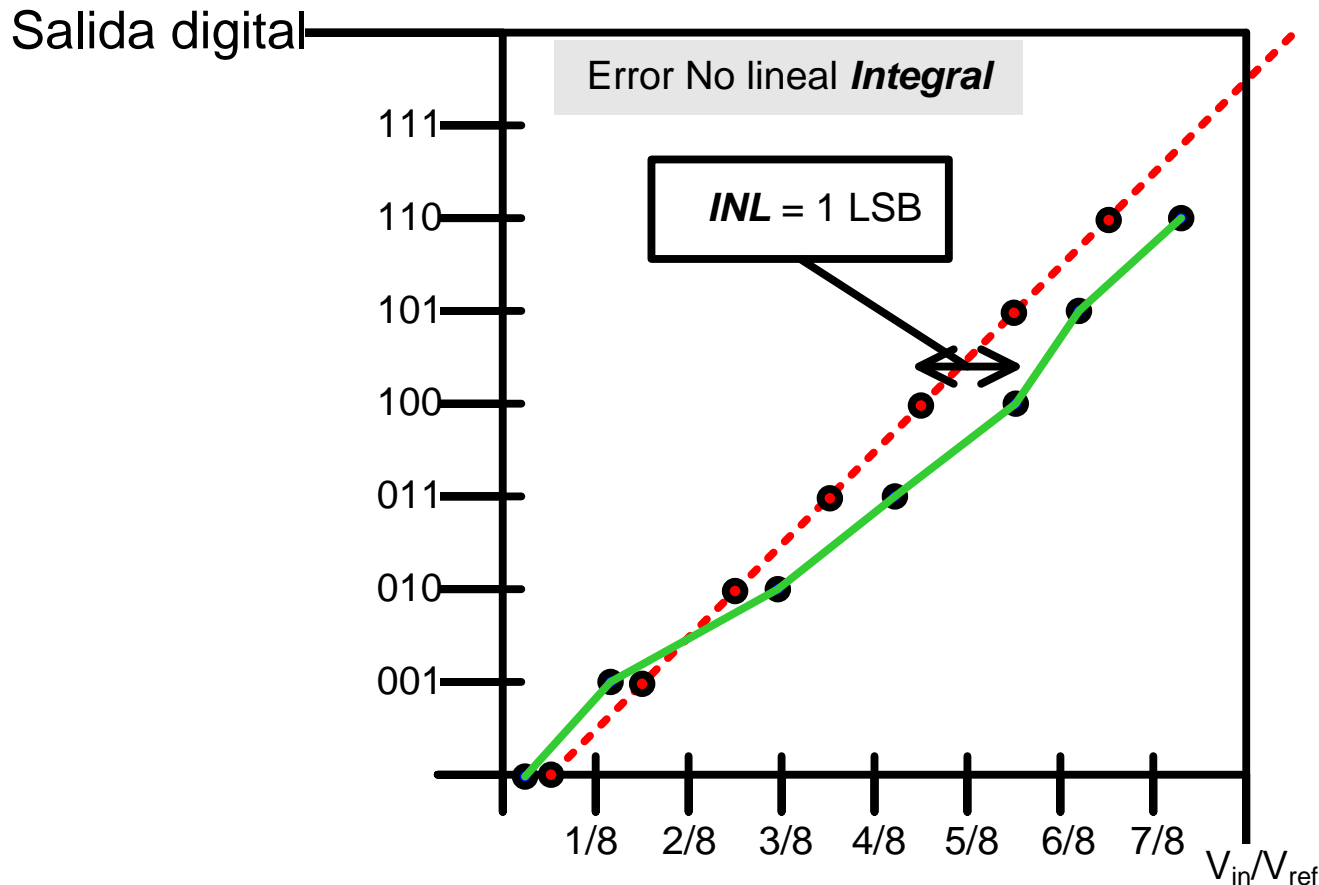


3.1. Características estáticas

- ◆ **Precisión:** Desviación entre la característica estática real e ideal
 - Incluye errores de offset, ganancia y linealidad
- ◆ **Precisión relativa:** Desviación entre la característica estática real e ideal una vez corregidos los errores de offset y ganancia. Se expresa en fracciones de LSB

3.1. Características estáticas

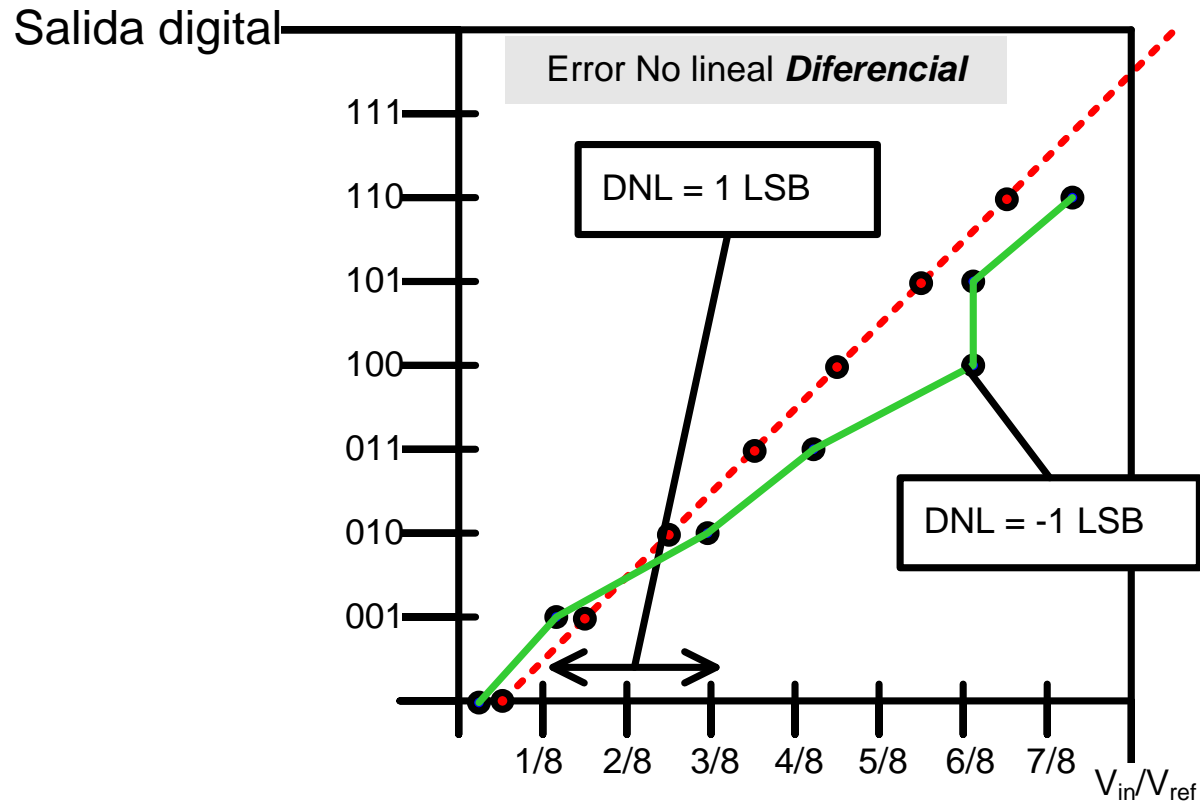
- ◆ **Integral Non-Linearity (INL):** Una vez eliminado el error de offset y ganancia, se define la INL como la desviación entre la respuesta real y la respuesta ideal



3.1. Características estáticas

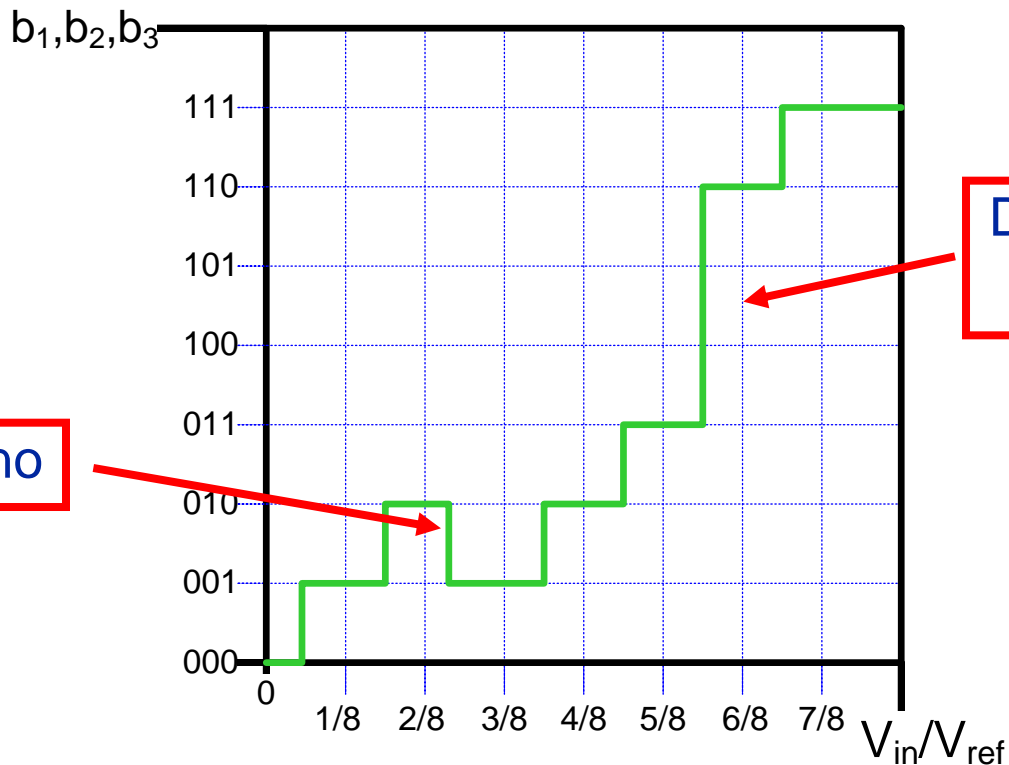
◆ Differential Nonlinearity (DNL):

- Dos umbrales consecutivos se diferencian idealmente en 1LSB
- El DNL se define como la variación de la diferencia entre dos umbrales consecutivos respecto a su valor teórico de 1 LSB



3.1. Características estáticas

- ◆ **Monotonidad:** Un ADC es monótono si su salida digital siempre se incrementa al aumentar la entrada analógica
- ◆ **Códigos perdidos:** Códigos que no aparecen a la salida del ADC cuando varía la entrada entre 0 y V_{ref}



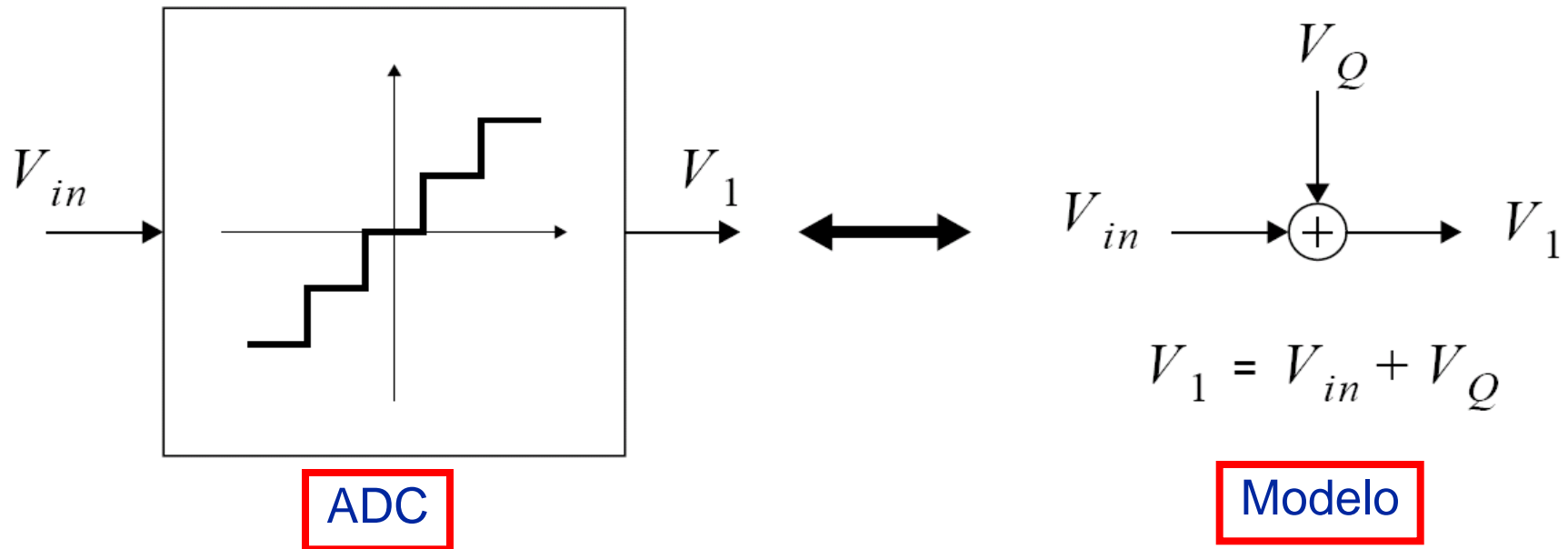
No monótono

Dos códigos perdido
(100,101)

3.2. Características dinámicas

◆ Para definir las características dinámicas:

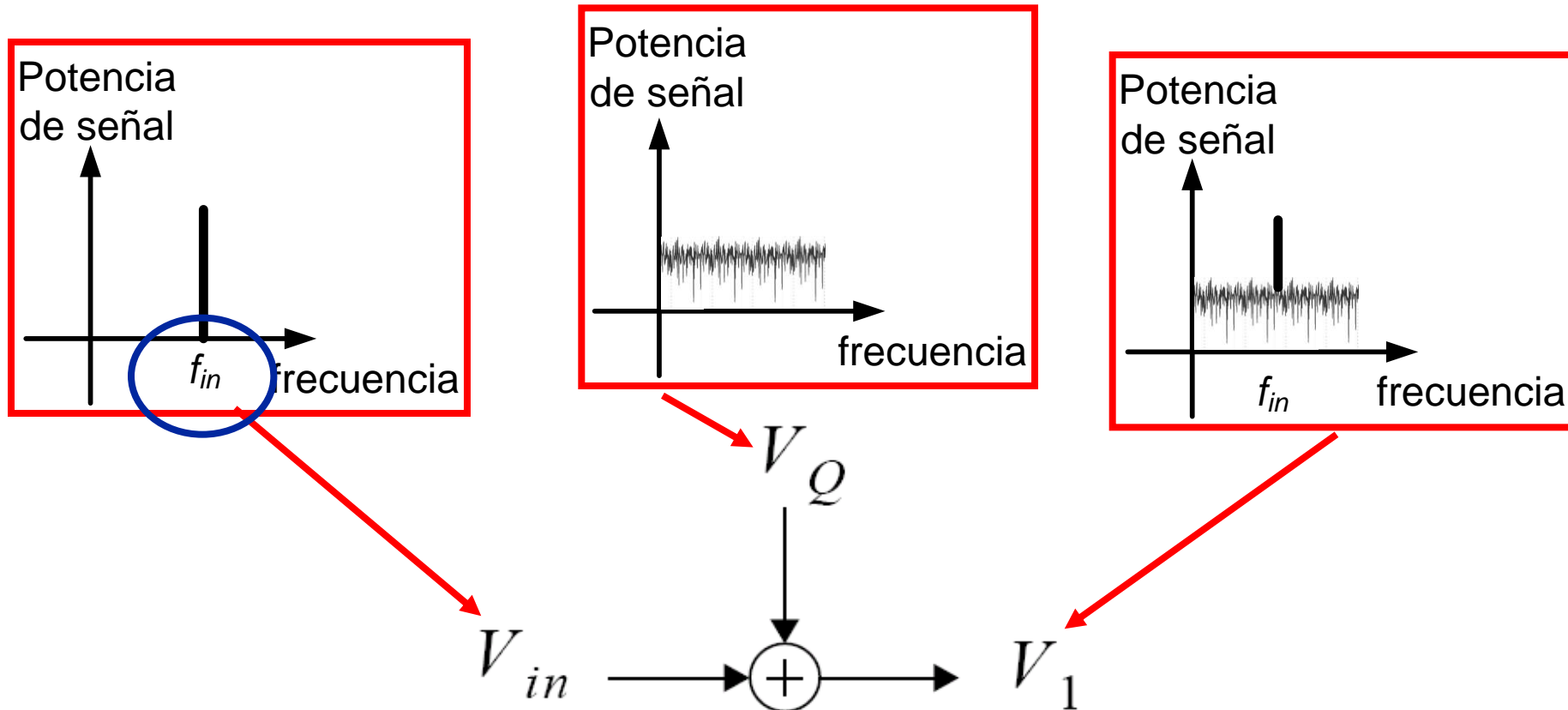
- Se aplican señales senoidales a la entrada del ADC
- Se definen los diferentes parámetros considerando el espectro resultante (transformada de Fourier a la salida)



3.2. Características dinámicas

◆ Para definir las características dinámicas:

- Se aplican señales senoidales a la entrada del ADC
- Se definen los diferentes parámetros considerando el espectro resultante (transformada de Fourier a la salida)

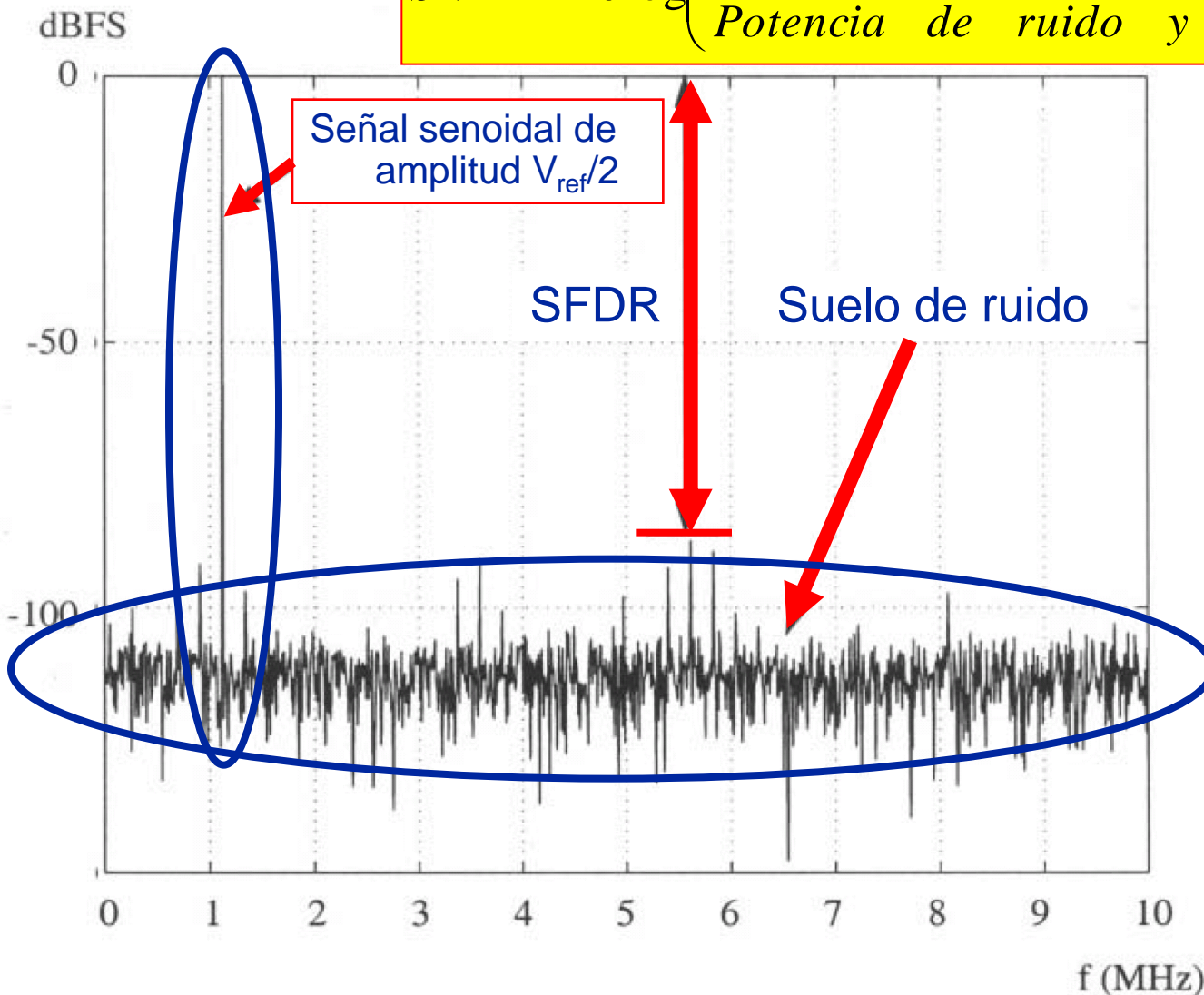


3.2. Características dinámicas

- ◆ Para convertidores utilizados en aplicaciones de **comunicaciones**, INL y DNL, no suelen ser suficientes para caracterizar los ADCs
- ◆ Es mucho más conveniente utilizar parámetros como **SNDR** (Signal-to-Noise and Distortion Ratio) o **SFDR** (Spurious-Free Dynamic Range)
- ◆ Estos parámetros son los que utilizan los diseñadores de sistemas de comunicaciones.

3.2. Características dinámicas

$$SNDR = 10 \log \left(\frac{\text{potencia de señal}}{\text{Potencia de ruido y distorsión}} \right)$$



3.2. Características dinámicas

$$SNDR = 10 \log \left(\frac{\text{potencia de señal}}{\text{Potencia de ruido y distorsión}} \right)$$

- ◆ El parámetro dinámico más importante es la máxima SNDR aplicando una señal senoidal ($SNDR_{MAX}$)
- ◆ Se define el Número de Bits Efectivo, ENOB (Effective Number of Bits) como:

$$ENOB_{(bits)} = \frac{SNDR_{MAX (dB)} - 1.75}{6.02}$$

- ◆ Ejemplo de características de catálogo de un convertidor de Analog Devices:
 - ◆ Número de bits del convertidor: 10 bits (INL < 0.5LSB)
 - ◆ $SNDR_{MAX}$: 44.5dB → ENOB=7.1bits