

# **Errores en conversores AD**

## **Análisis estático** de los errores de los conversores

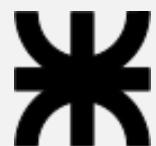
- Error de cuantificación
- Error de Offset
- Error de plena escala - Ganancia
- Error por no linealidad diferencial (DNL)
- Error por no linealidad integral (INL)

## **Análisis dinámico** de los errores de los conversores

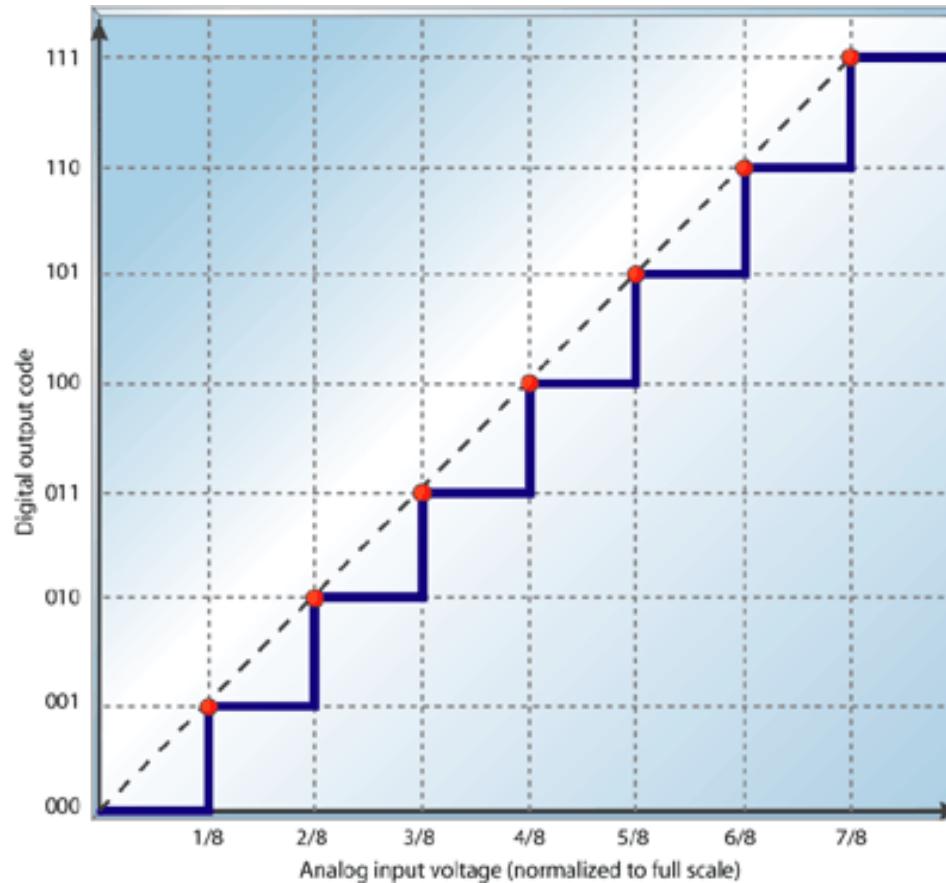
- Frecuencias de toma de muestras
- Error de apertura
- Relación S/N

Criterios de selección de los AD

Consideraciones de diseño para el proyecto MEI

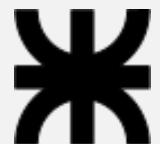


## Curva de transferencia ideal



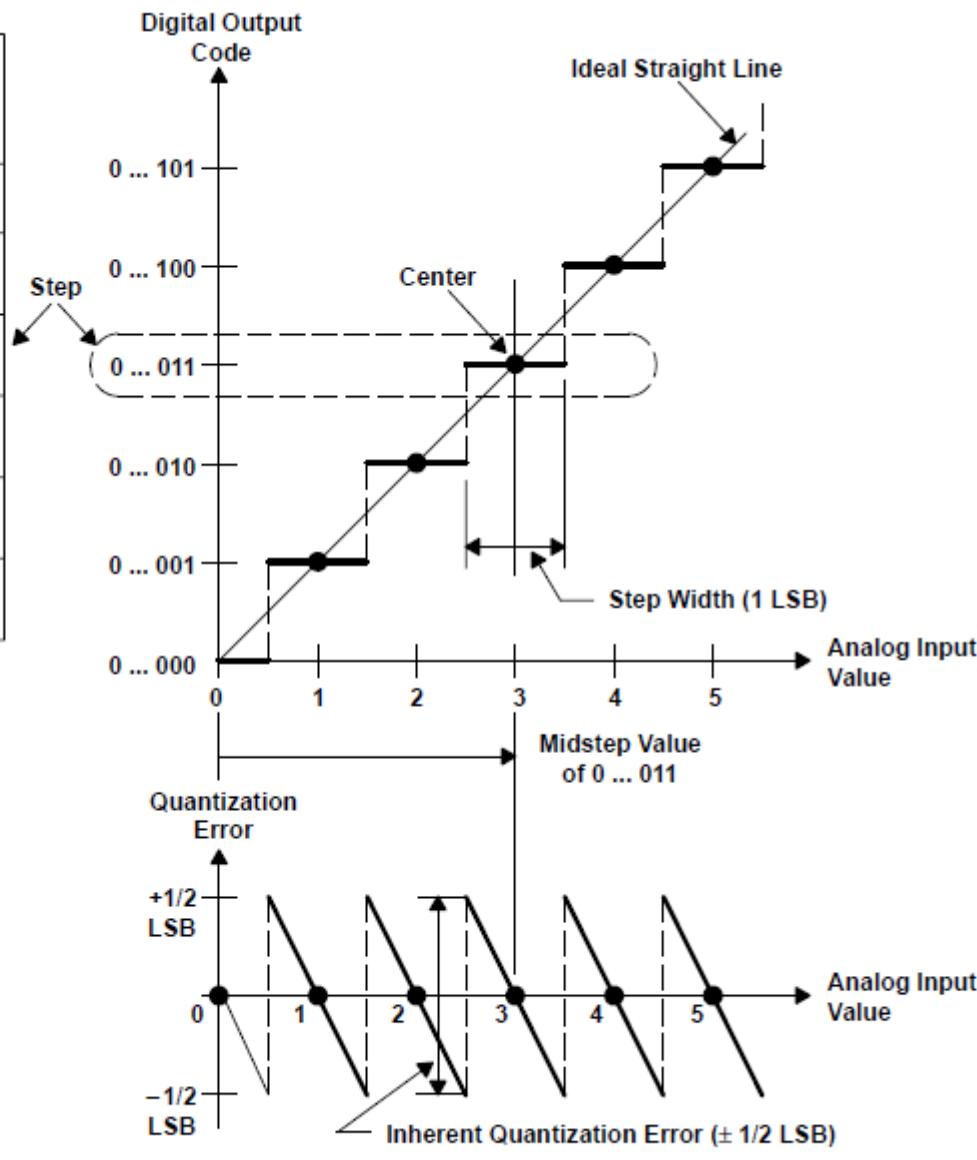
### Error de cuantificación

Cuando la tensión analógica a convertir no se corresponde con los valores de los códigos disponibles, se debe aproximar al valor mas cercano.  
Cuanto es el error de cuantificación?



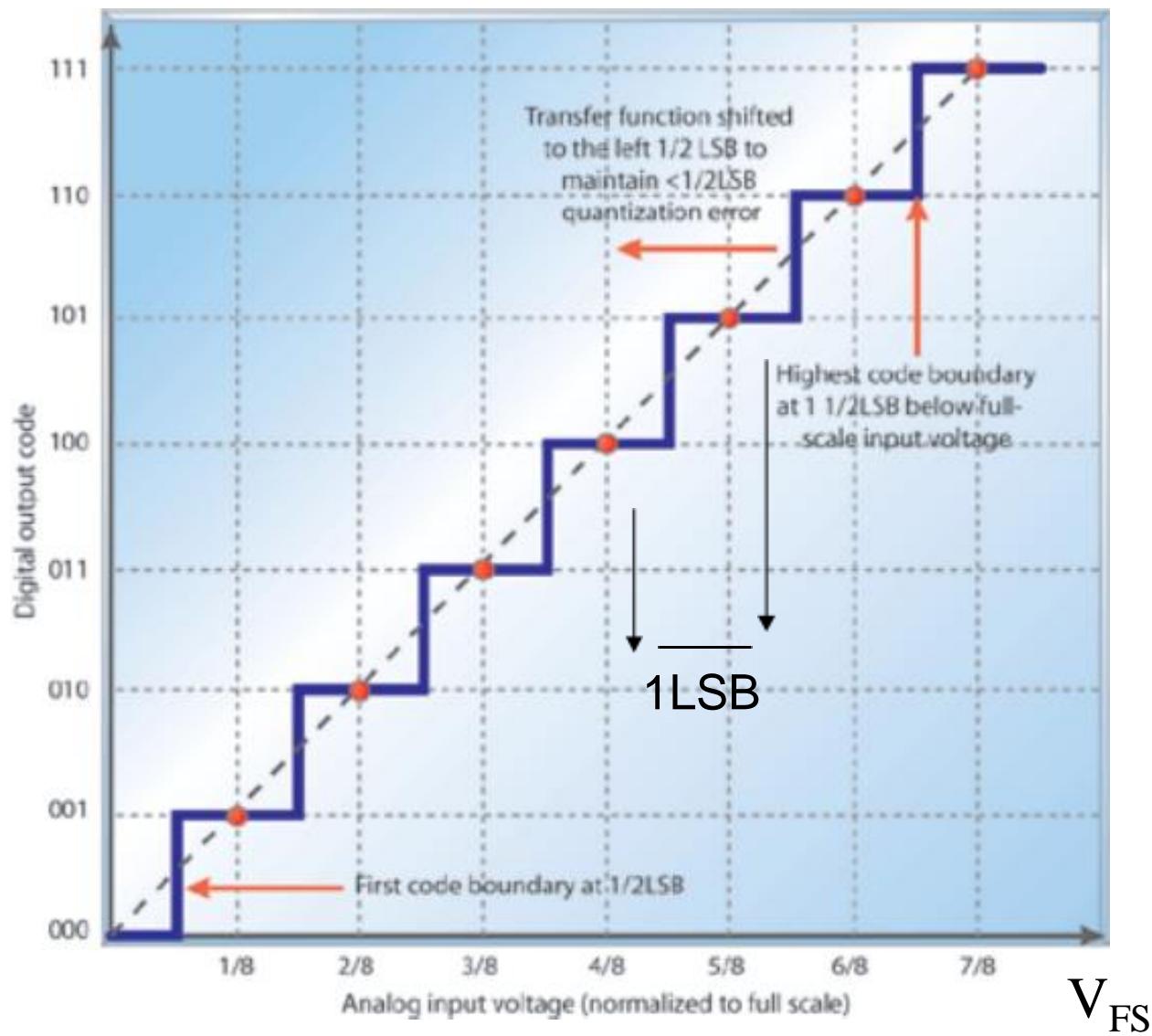
# Error de cuantificación

CONVERSION CODE	
RANGE OF ANALOG INPUT VALUES	DIGITAL OUTPUT CODE
4.5 • 5.5	0 ... 101
3.5 • 4.5	0 ... 100
(2.5 • 3.5)	0 ... 011
1.5 • 2.5	0 ... 010
0.5 • 1.5	0 ... 001
0 • 0.5	0 ... 000



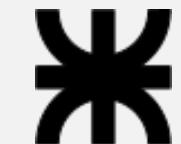
Análisis estático de los errores

## Curva ideal de transferencia con $\frac{1}{2}$ LSB error de cuantificación

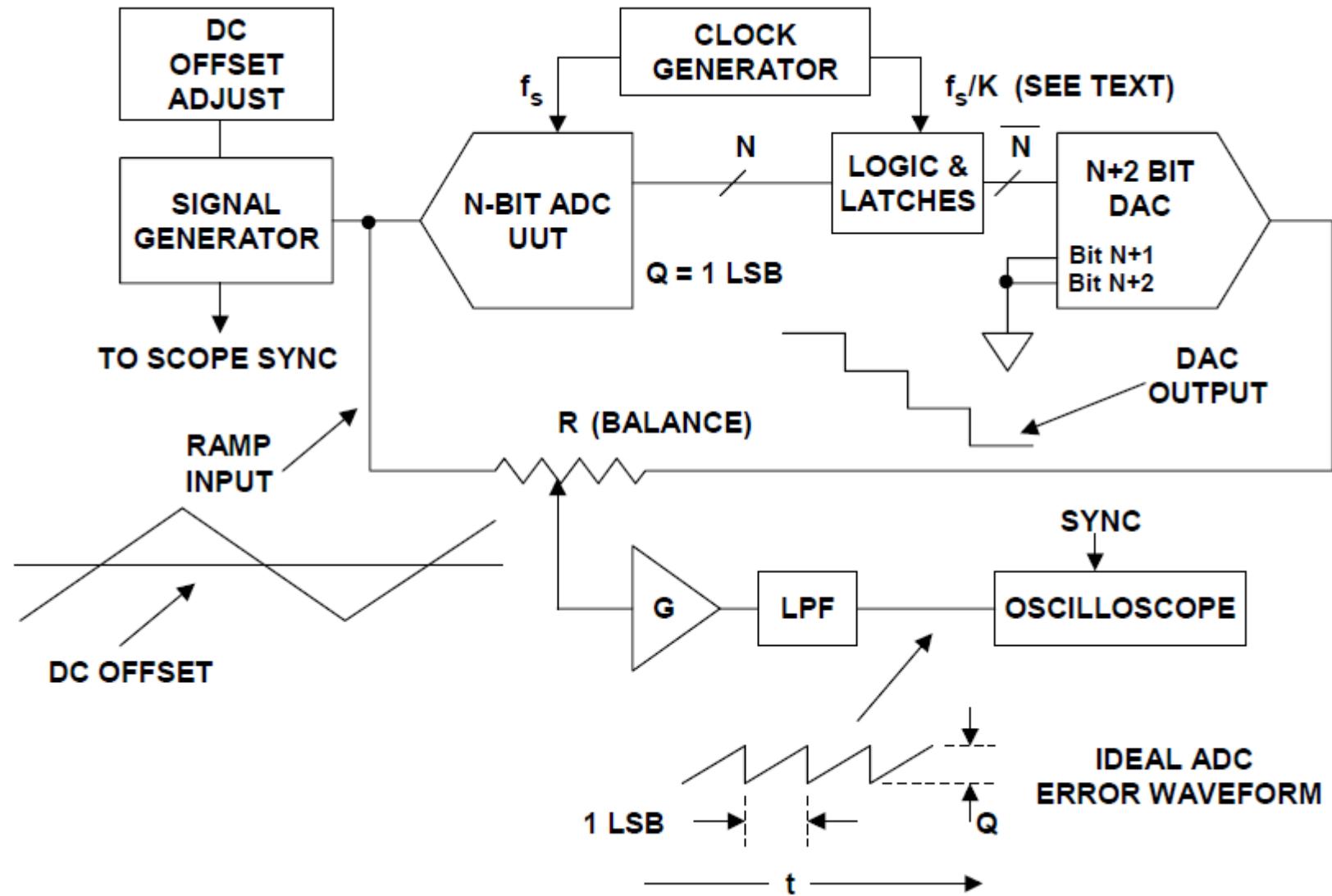


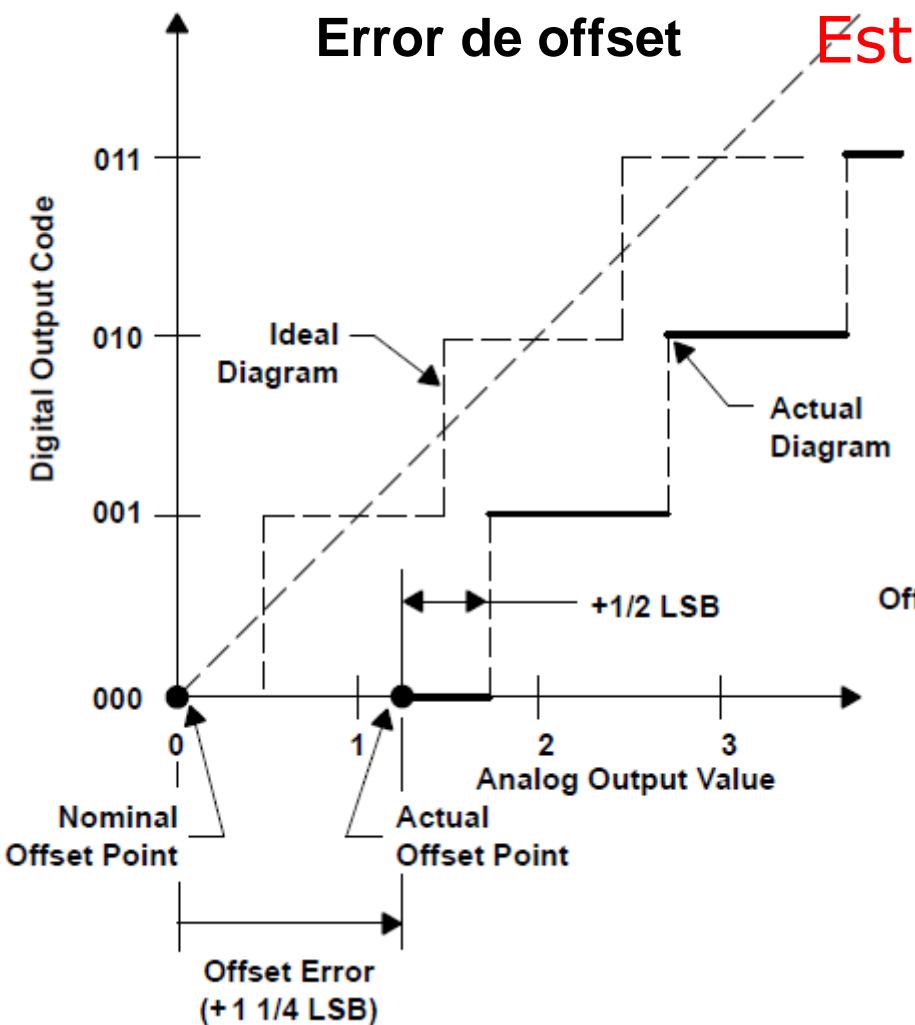
Resolución:

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



## Método Back-to-Back para medir error de cuantificación





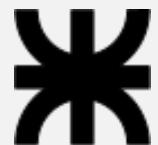
Este error puede corregirse ?

Es el valor de entrada analógica que hay que aplicar para que la salida tenga código 0

Para el ejemplo: Cuánto vale el error de offset con un ADC de 12bits y Vfs 2,5V?

$$e_o = 1,25 * \left( \frac{2,5V}{4096} \right)$$

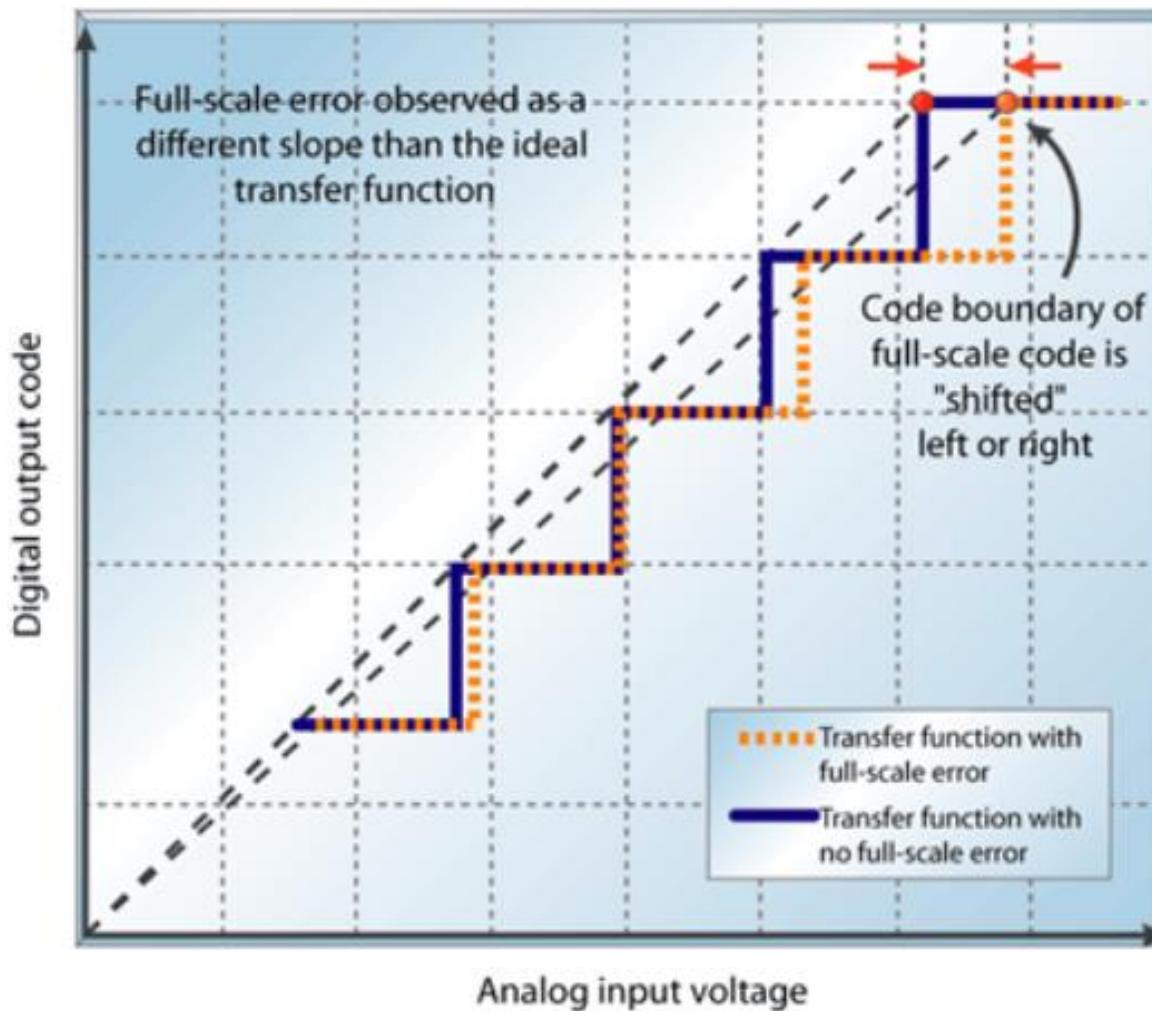
$$e_{o\%} = 100 * \left( \frac{1,25V}{4096} \right) = 0,03\%$$



## Error de ganancia

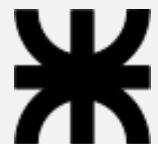
Este error puede corregirse ?

Full-scale error

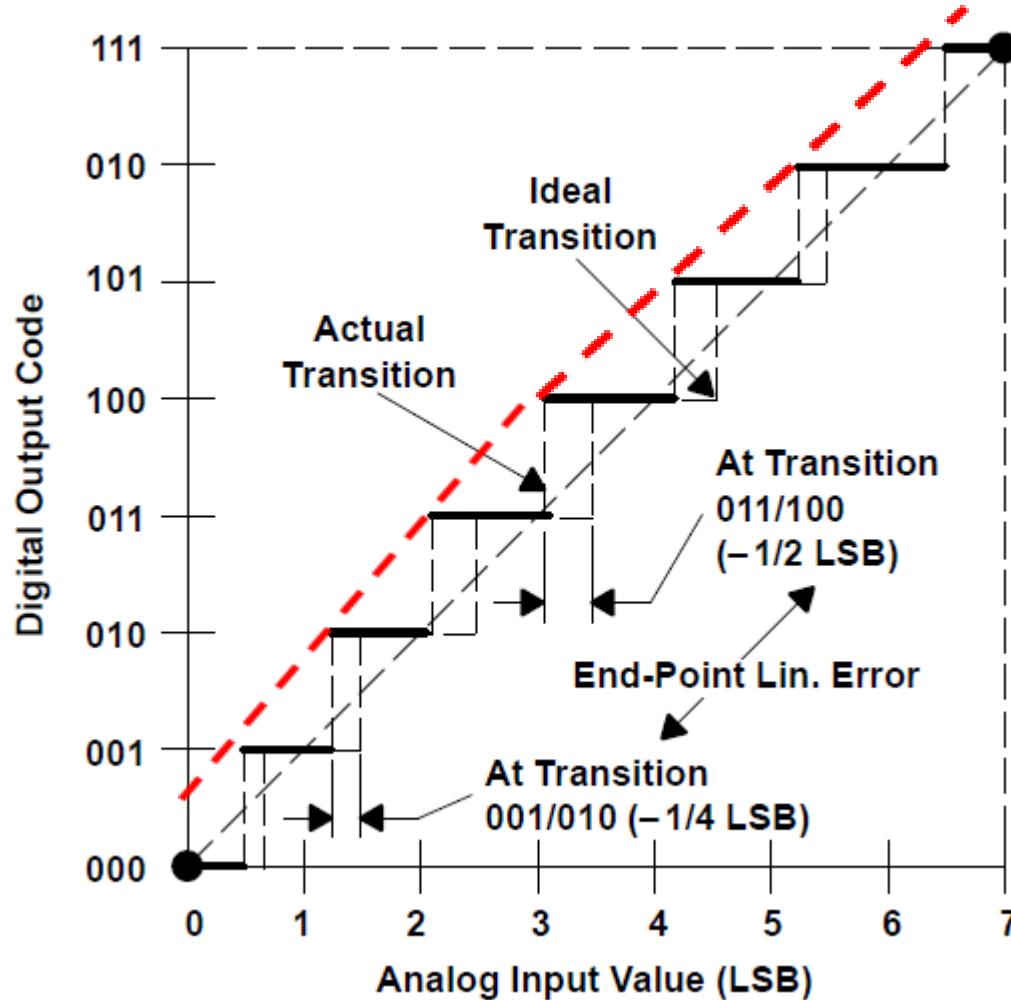


Es la diferencia entre el valor máximo nominal y el valor máximo real de la entrada analógica, considerando cero el error de Offset.

Es la variación de la pendiente respecto de su valor ideal.



## Este error puede corregirse ?



**INL** Es la desviación de los valores reales respecto de la curva de transferencia lineal

Se especifica la máxima desviación

De difícil corrección mediante calibración **previa** al uso

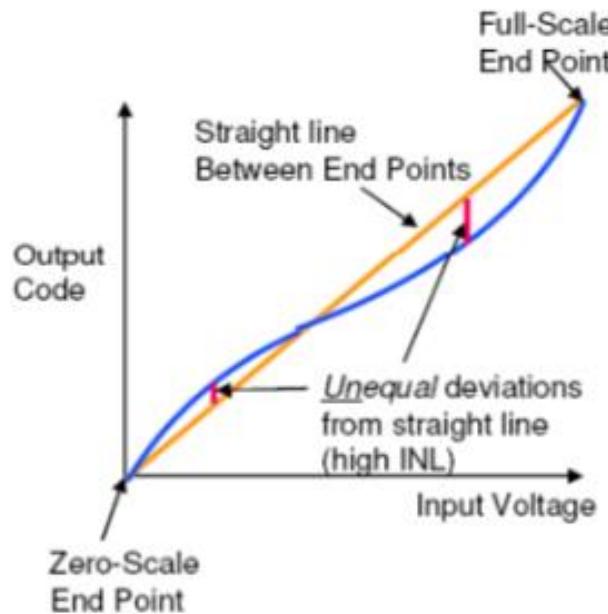
INL da una idea de la linealidad de la curva de transferencia del conversor

INL no incluye errores de cuantificación o ganancia

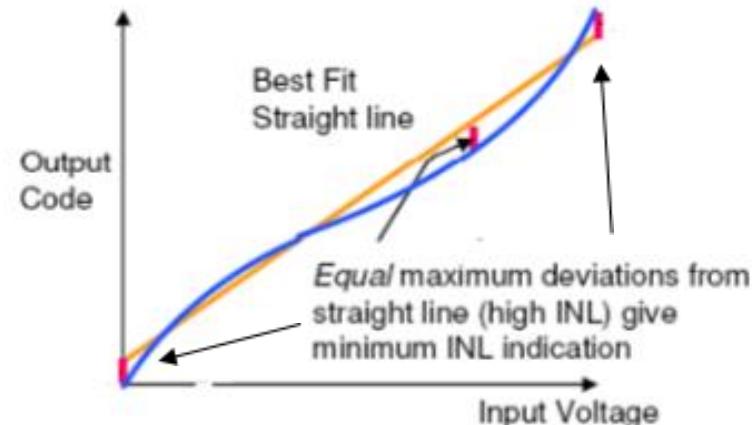


## ***“End Point” vs. “Best Fit” INL Measurements***

— ADC Transfer Curve

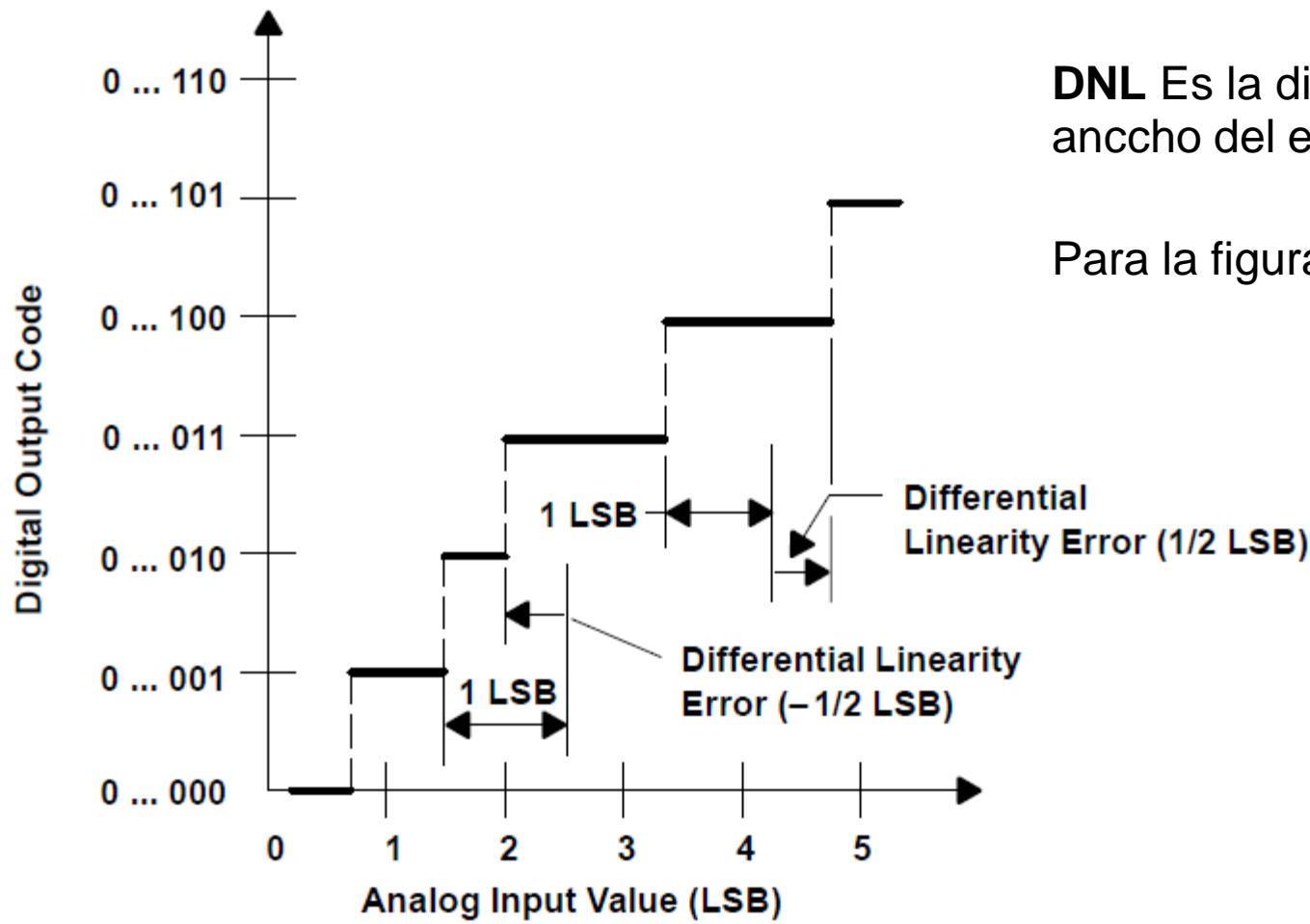


**“End-Point” INL Measurement  
Indicates Worst Case INL**



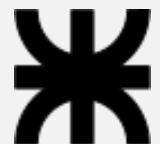
**“Best-Fit” INL Measurement Provides  
Best Possible INL Specification**

# Este error puede corregirse ?



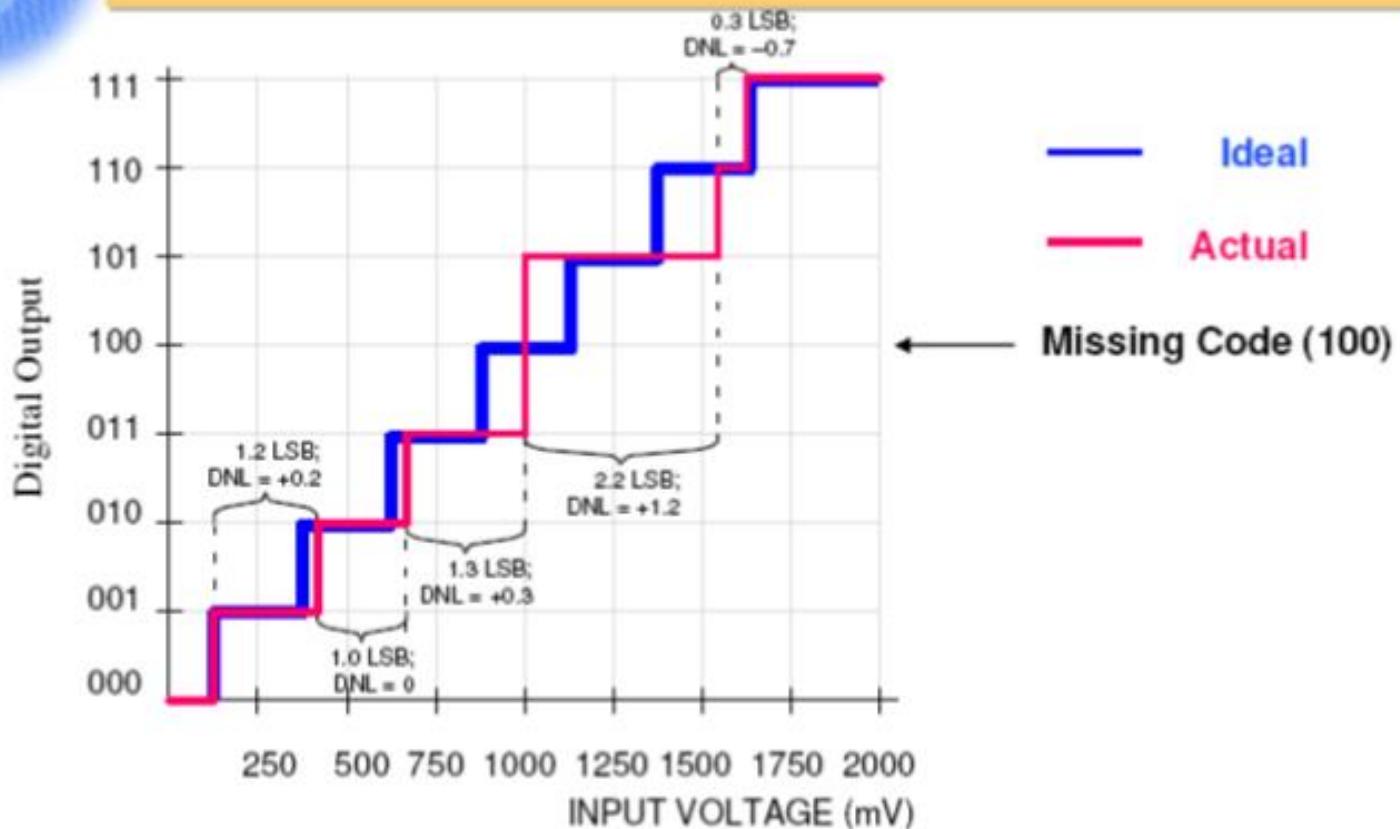
**DNL** Es la diferencia entre el ancho del escalón real y el ideal

Para la figura es de  $+\frac{1}{2}$  y  $-\frac{1}{2}$



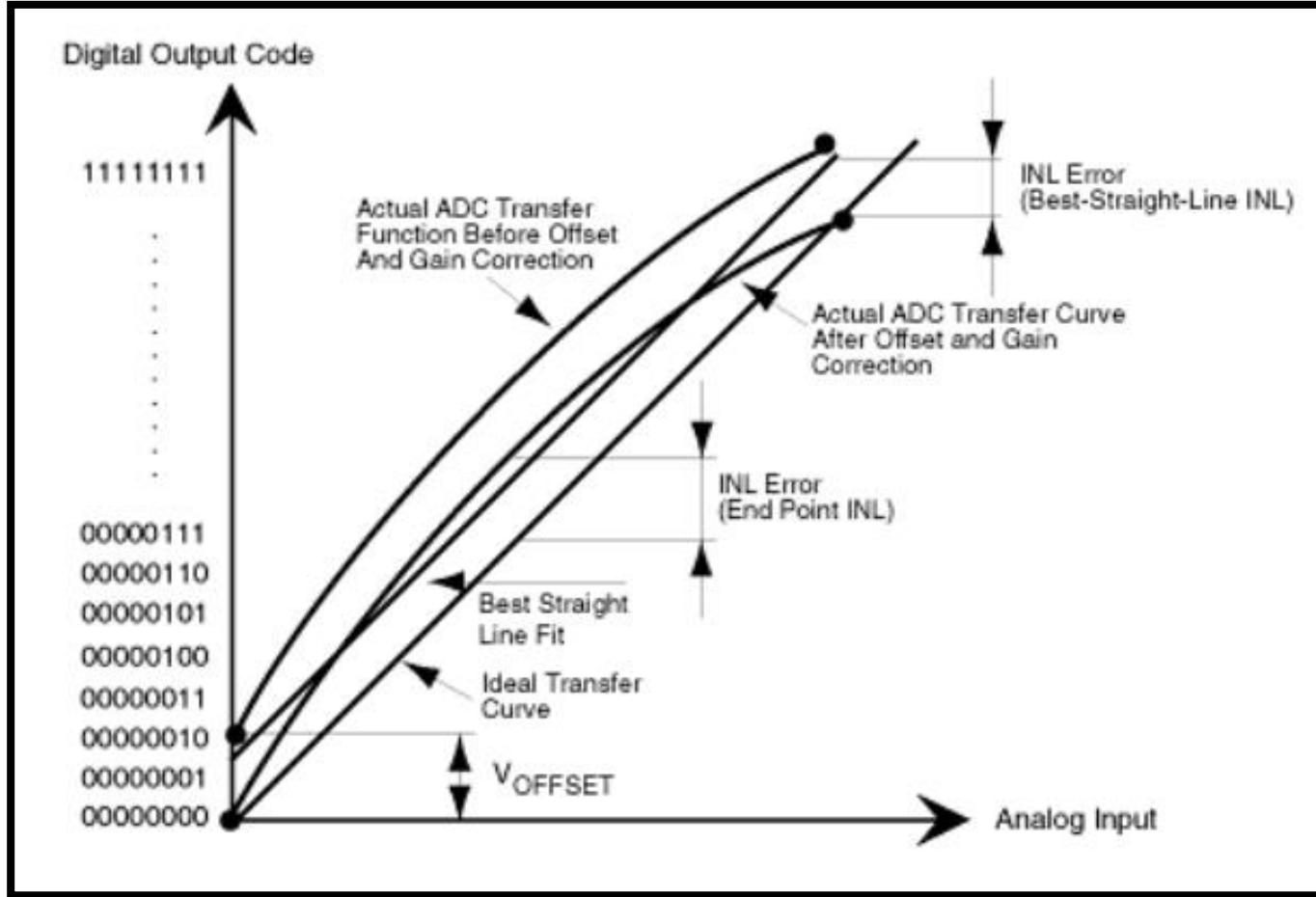


# DNL



$$V_{REF} = 2.0V$$

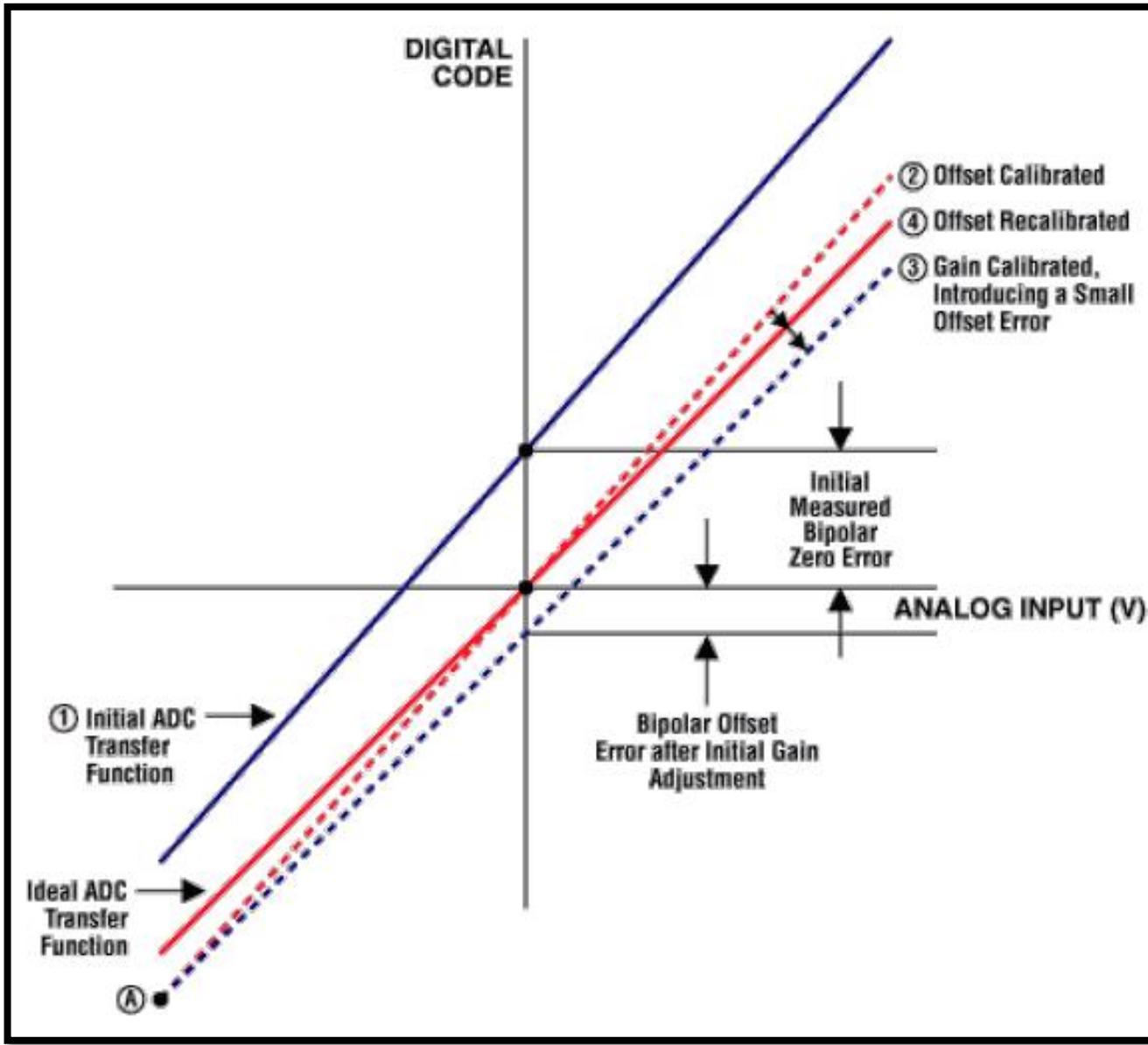
# Respuesta del ADC unipolar a calibraciones



Análisis estático de los errores

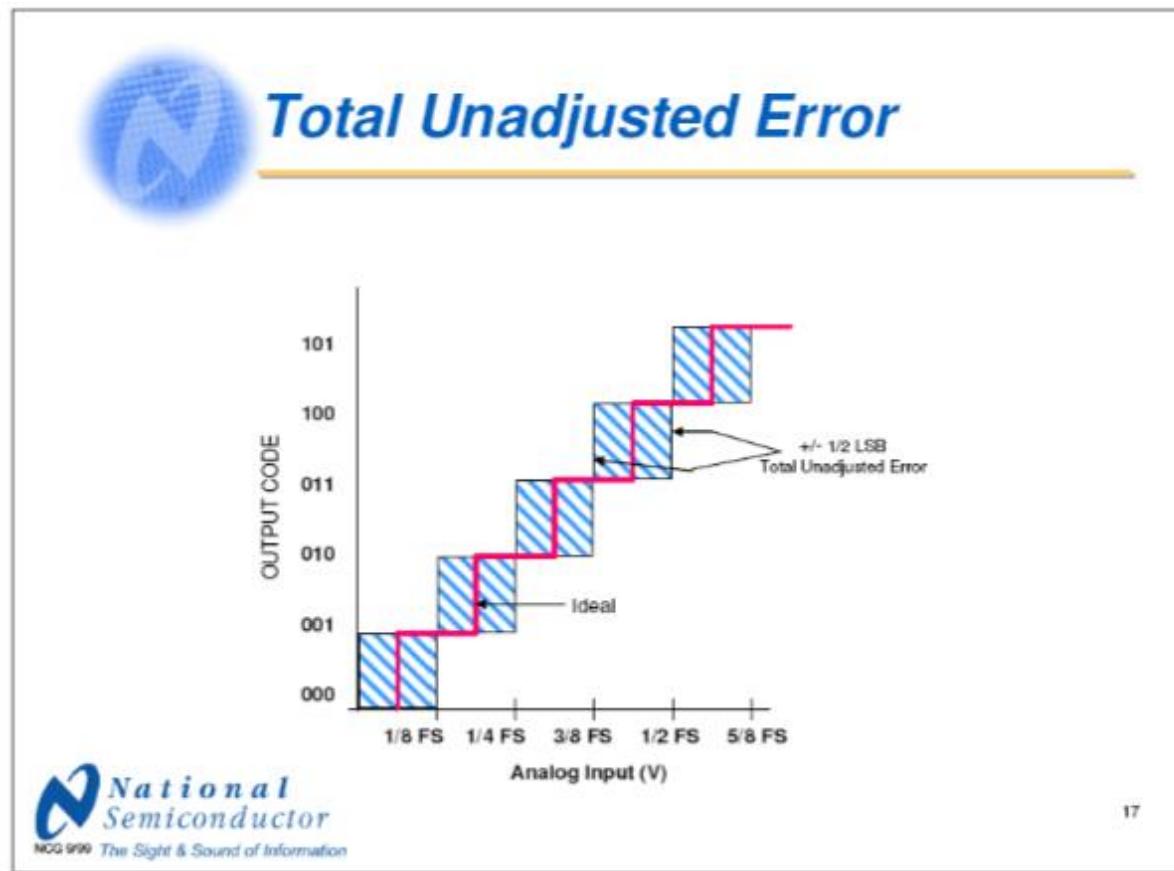


# Respuesta del ADC bipolar a calibraciones



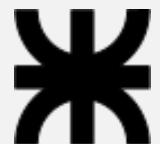
**TUE** is defined as the maximum deviation between the actual and the ideal transfer curves.

It is a parameter which specifies the total errors that can occur causing maximum deviation between the ideal digital output and actual digital output.



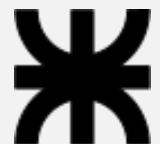
## Consideraciones respecto a los errores estáticos

- TUE no es la suma de los EO, EG, DNL, INL.
- The offset error affects the digital result at lower voltages whereas the gain error affects the digital output for higher voltages.
- If this overall error limit is acceptable, no adjustments need to be made during manufacture of the end product. Total Unadjusted Error (TUE) is a comprehensive specification that includes linearity errors, gain error, and offset error. It is the worst-case deviation from the ideal device performance.

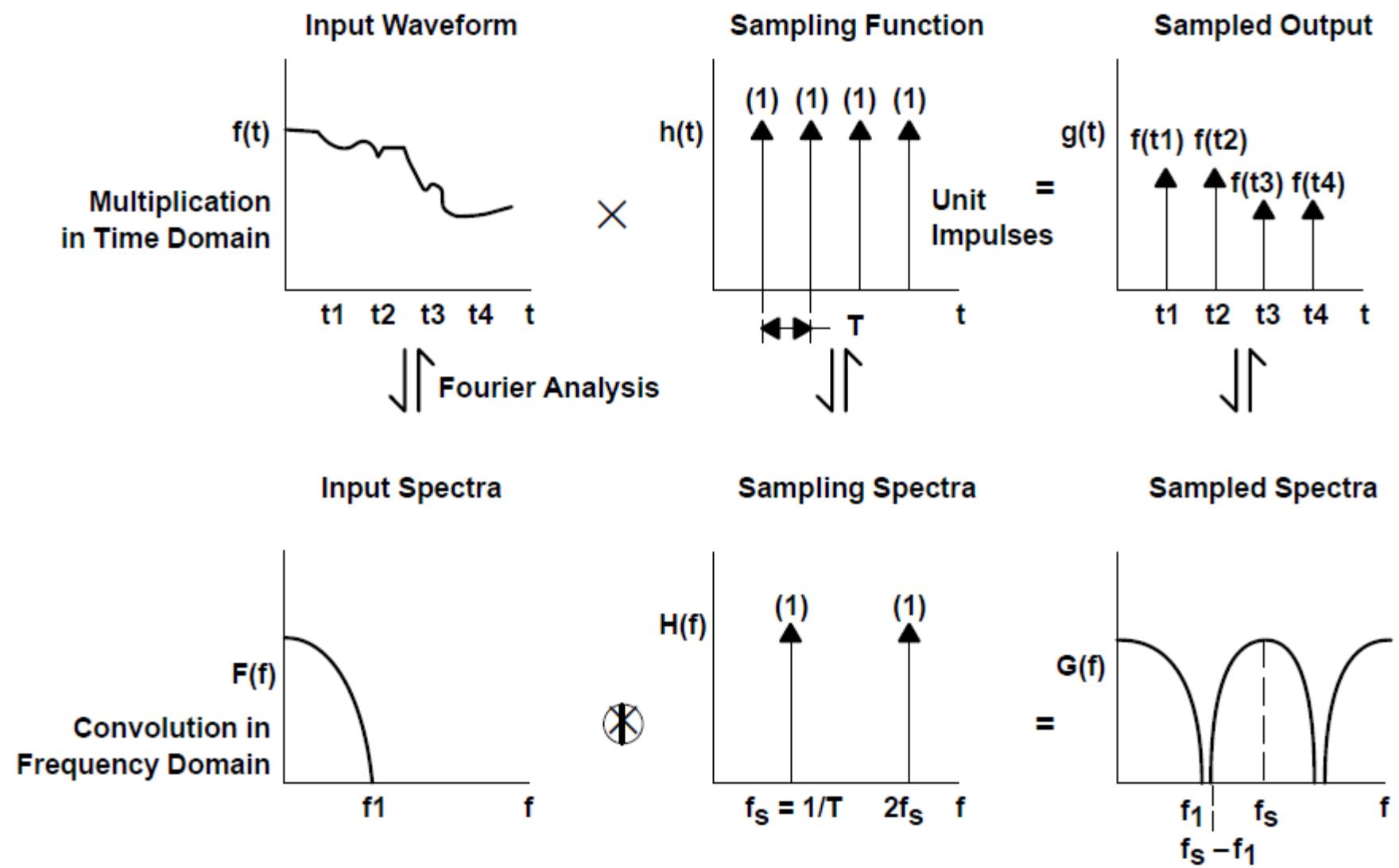


## Criterios para definir la elección del conversor

- Frecuencias de toma de muestras
- Error de apertura
- Relación S/N

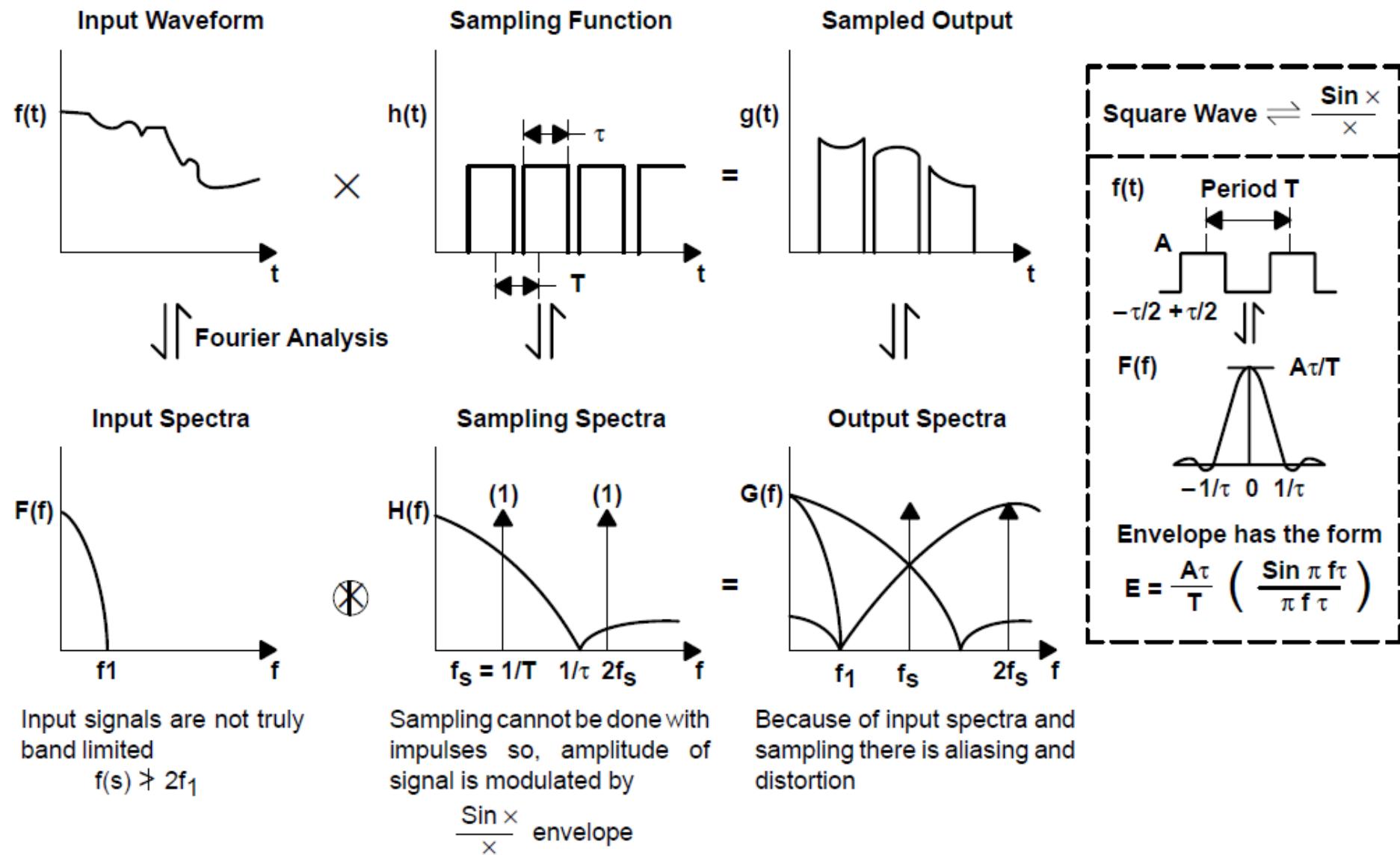


# Muestreo Digital Ideal



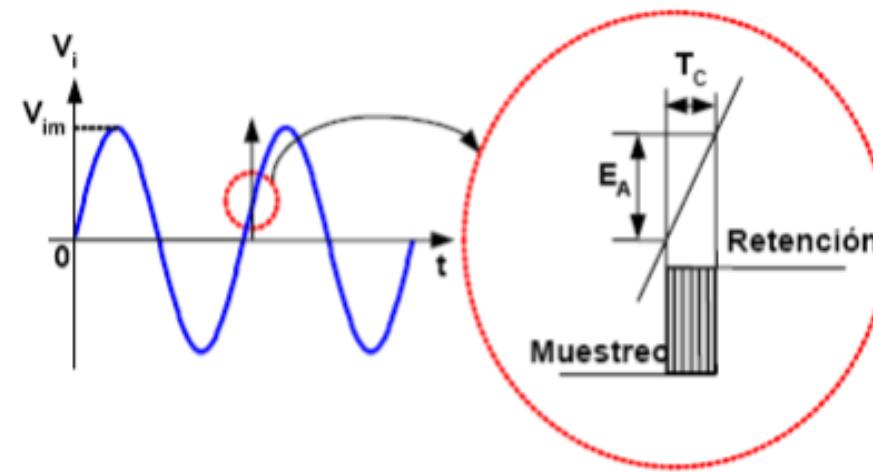
Análisis dinámico de los errores

# Muestreo Real

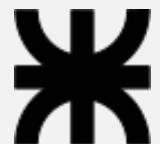
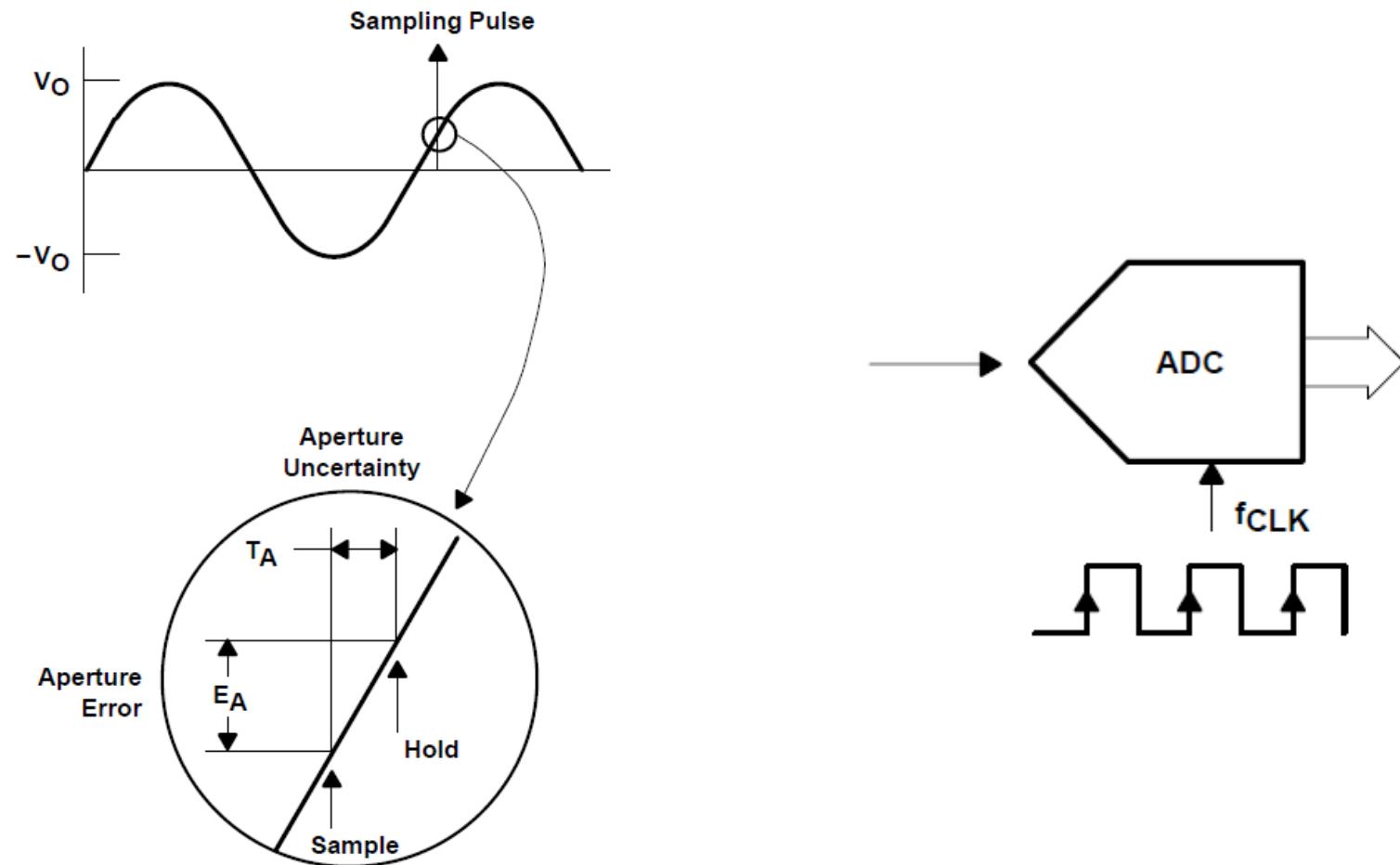


**Error de apertura:** Incertidumbre en el instante en que el sistema de muestreo=retención (S/H) que entrega su señal al convertidor pasa del modo muestreo al de retención.

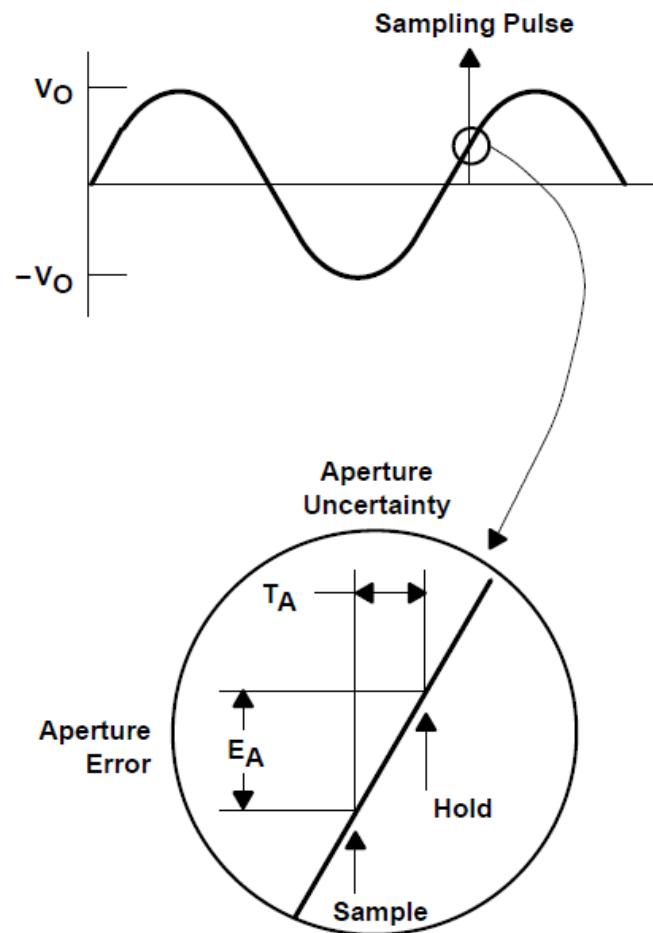
- Se debe al ruido en el reloj del sistema y/o al ruido en la señal
- Este error impone una limitación a la máxima frecuencia de la señal de entrada que puede calcularse



# Error de apertura:



## Error de apertura:



$$V = V_0 \sin(2 \pi f_t t)$$

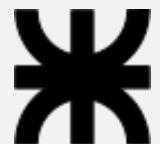
$$\frac{dV}{dt} = 2\pi f_t V_0 \cos(2 \pi f_t t)$$

$$\left. \frac{dV}{dt} \right|_{Max} = 2\pi f_t V_0$$

$$E_a = T_a \frac{dV}{dt} \quad \begin{cases} E_{a MAX} = \frac{1}{2} LSB \\ \frac{1}{2} LSB = \frac{2V_o}{2^{n+1}} \end{cases}$$

$$\frac{2V_o}{2^{n+1}} = 2\pi f_t V_o T_a$$

$$f_t = \frac{f_s}{\pi 2^{n+1}}$$



Frecuencia limitada por error de apertura:

Ejemplo: Conversor A/D AD0803 , 8 bits, tiempo de conversión = 100  $\mu$ s

T<sub>conversión</sub> = 100  $\mu$ s por lo tanto f<sub>s máx</sub> = 10 KHz

Sin embargo, según lo hallado anteriormente:

$$f_{máx.} = \frac{f_s}{2^{n+2} \cdot \pi} = \frac{10000\text{Hz}}{2^{8+2} \cdot \pi} \approx 3.1 \text{ Hz}$$

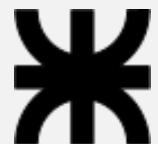
Ejemplo: Convertidor A/D AD7820, 8 bits, tiempo de conversión = 2  $\mu$ s

T<sub>conversión</sub> = 2  $\mu$ s y por lo tanto f<sub>s máx</sub> = 500 kHz

Sin embargo, según lo hallado anteriormente:

$$f_{máx.} = \frac{f_s}{2^{n+2} \cdot \pi} = \frac{500000\text{Hz}}{2^{8+2} \cdot \pi} \approx 155 \text{ Hz}$$

Para que no se produzca un Error de Apertura >1/2 LSB,  
la frecuencia de la señal no puede superar fmax !!!!

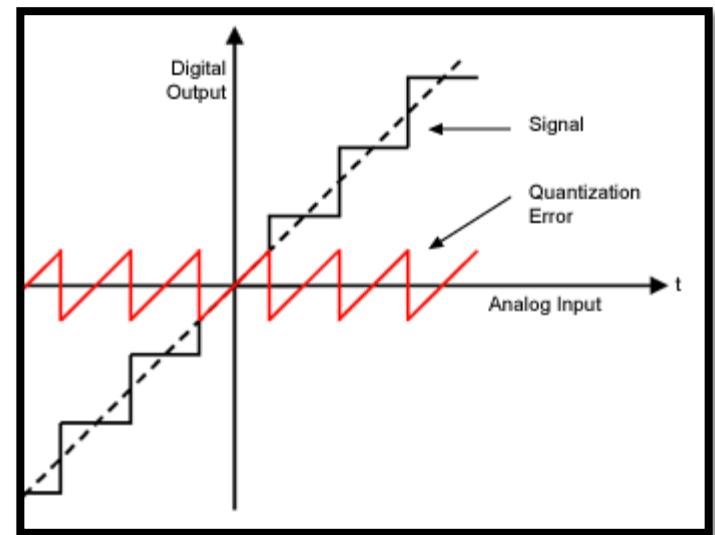


## RELACIÓN S/N (SNR) DEL ADC IDEAL:

$$(S / N) = \frac{V_{rms}^{señal}}{V_{rms}^{ruido}}$$

Señal senoidal:

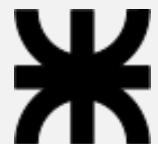
$$V_{rms}^{señal} = \frac{V_p}{\sqrt{2}} = \frac{\frac{2^N}{2} \cdot 1LSB}{\sqrt{2}} = \frac{2^{N-1} \cdot 1LSB}{\sqrt{2}}$$



Ruido:

$$V_{rms}^{ruido} = \frac{V_p}{\sqrt{3}} = \frac{\frac{1}{2} LSB}{\sqrt{3}} = \frac{1 LSB}{\sqrt{12}} \approx 0,289 LSB$$

$$\left( \frac{V_{rms}^{señal}}{V_{rms}^{ruido}} \right)_{dB} = 20 \cdot \log \left( \frac{\frac{2^N}{2} \cdot 1LSB}{\frac{\sqrt{2}}{1LSB}} \right) \approx (6,02 \cdot N + 1,76) dB$$



## SNR DEL ADC REAL

En un ADC real existen, además, otras fuentes de ruido (P. ej. Ruido térmico), de forma que la relación S/N será menor que la máxima teórica expresada en la ecuación anterior:

- Un ADC de 12 bits cuya SNR es idealmente de 74 dB, puede no ofrecer realmente más de 68 dB.
- Este hecho da lugar a un parámetro que se denomina *Efective Number Of Bits (ENOB)*.

### **ENOB (Effective Number Of Bits)**

Si damos la vuelta a la ecuación para obtener el número efectivo de bits en función de la relación S/N real, obtenemos:

$$\text{ENOB} = [(S/N)_{\text{REAL}} - 1,76 \text{ dB}] / 6,02$$

- En el ejemplo, del ADC de 12 bits cuya S/N obtenida de forma experimental era de 68 dB obtenemos un ENOB de 11 bits.

Podemos expresar el error relativo al fondo de escala de un ADC en función de su ENOB:

$$\text{Error (\%FS)} = 1/(2^{\text{ENOB}}) \times 100 \% \text{ FS}$$

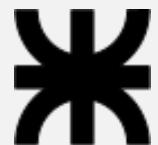
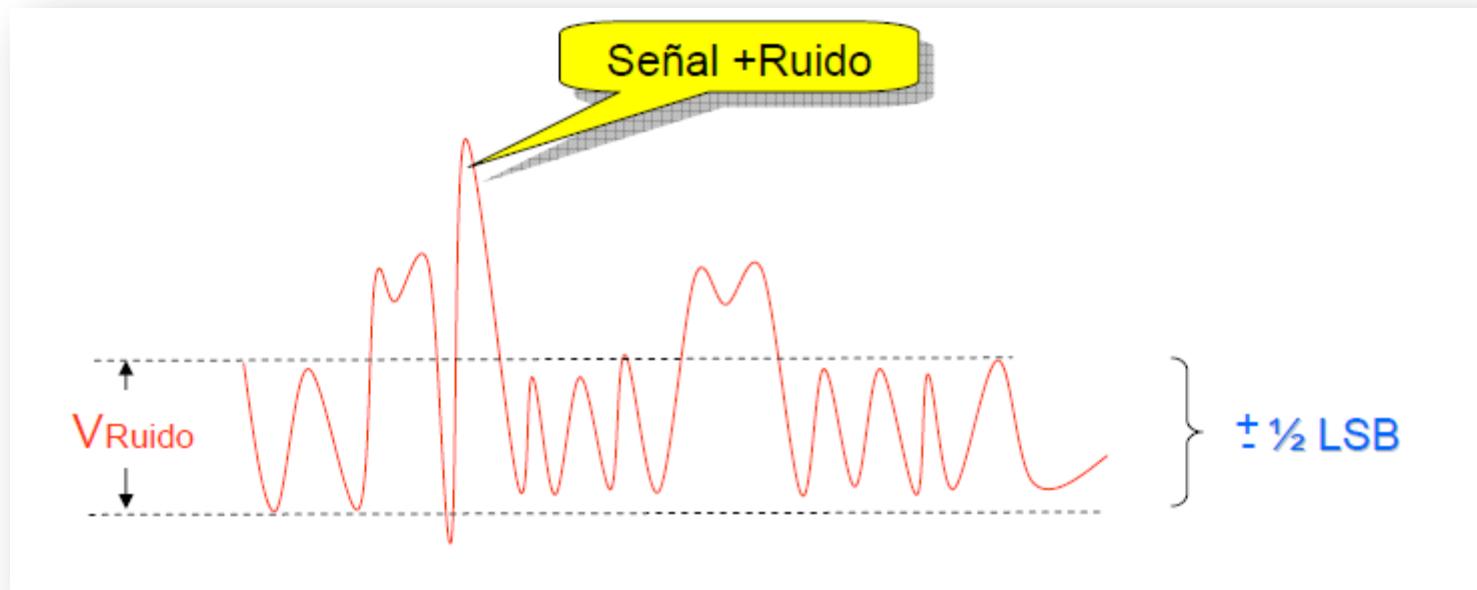
- La precisión máxima ideal sería  $(1/2^{12}) \cdot 100 = 0,024 \%$
- La precisión máxima real sería  $(1/2^{11}) \cdot 100 = 0,049 \%$

Lógicamente, al perder un bit de precisión el error dobla su valor

## Consideraciones respecto al ruido:

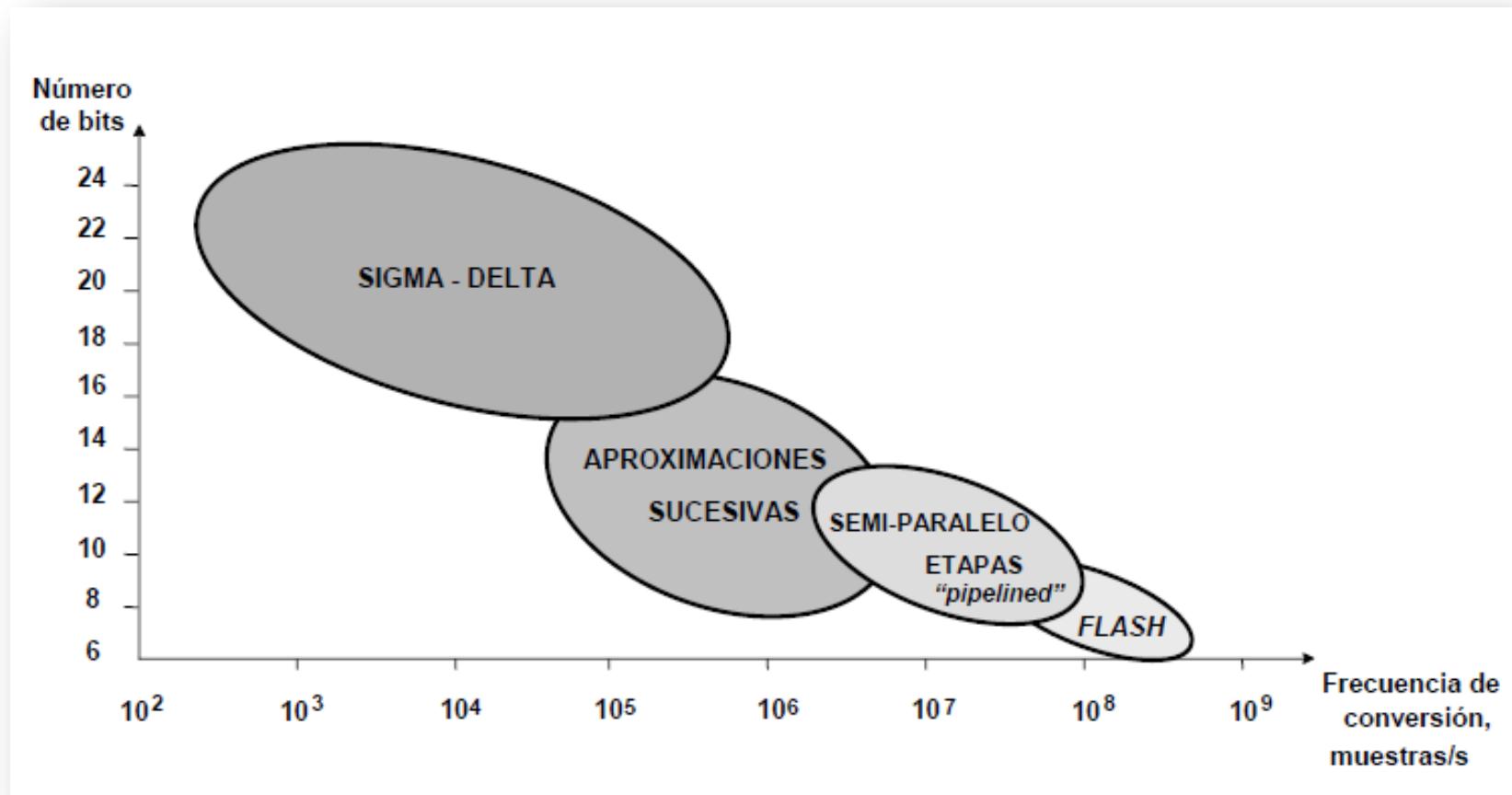
Todas las señales tienen ruido, lo deseable es que el valor pico a pico del ruido sea menor que  $\pm \frac{1}{2}$  LSB.

- Elegimos apropiadamente la resolución del conversor
- Reducimos el ruido presente



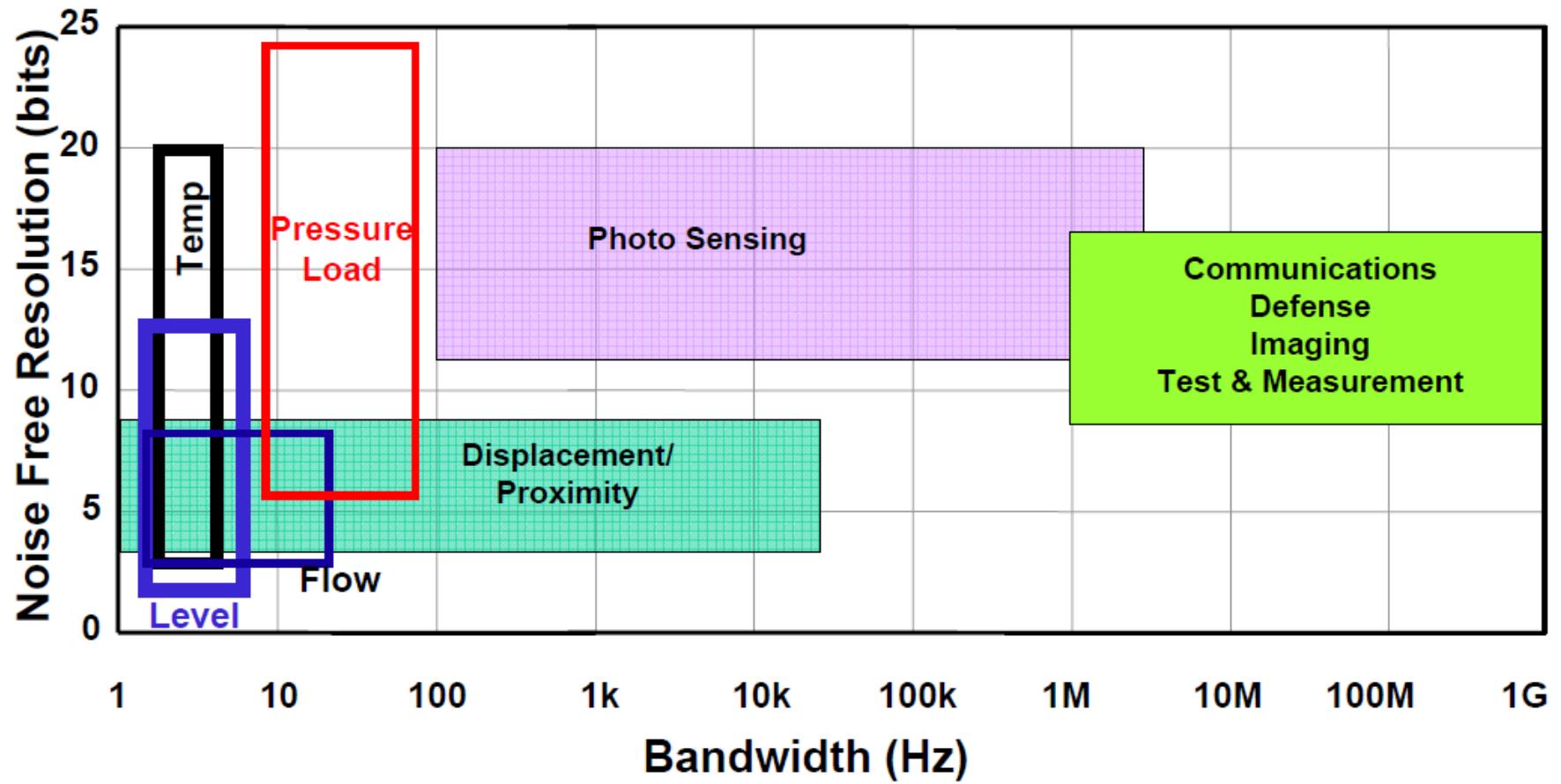
# Criterios de selección de los conversores AD

## Relación Frecuencia de conversion vs N



# Criterios de selección de los conversores AD

Necesidad de N y BW para cada uso



## **Consideraciones a tener en cuenta para la elección del ADC:**

- Resolución requerida
- Error estático del conversor
- Relación frecuencia de conversion vs N
- Disponibilidad / precio
- Frecuencia de muestreo necesaria
- Características de la señal a convertir (N, BW)
- Estabilidad de la fuente
- Aislaciones eléctricas entre las etapas
- Aislaciones de masas Señal – Potencia

