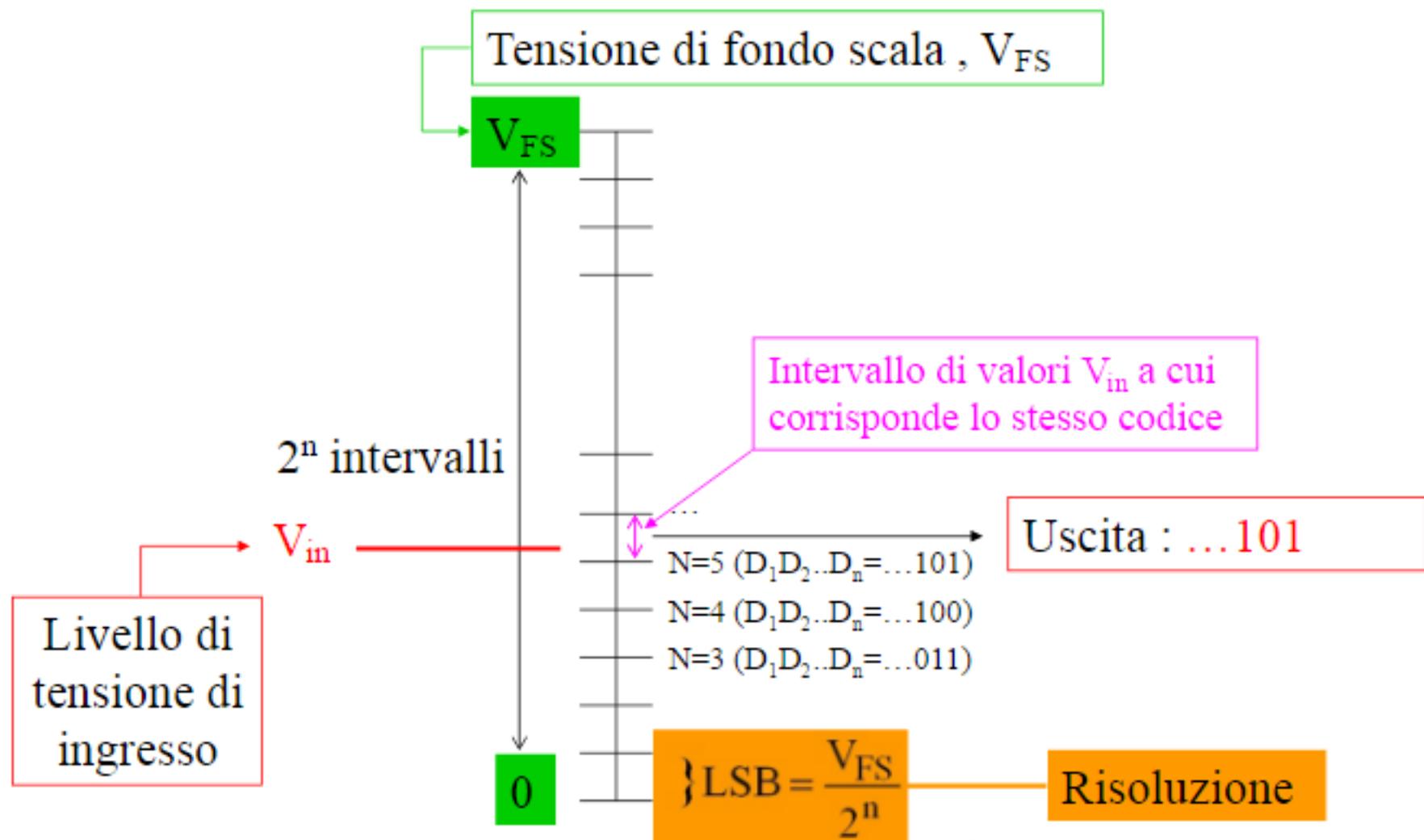


# L'IDEA DELLA CONVERSIONE ANALOGICO-DIGITALE



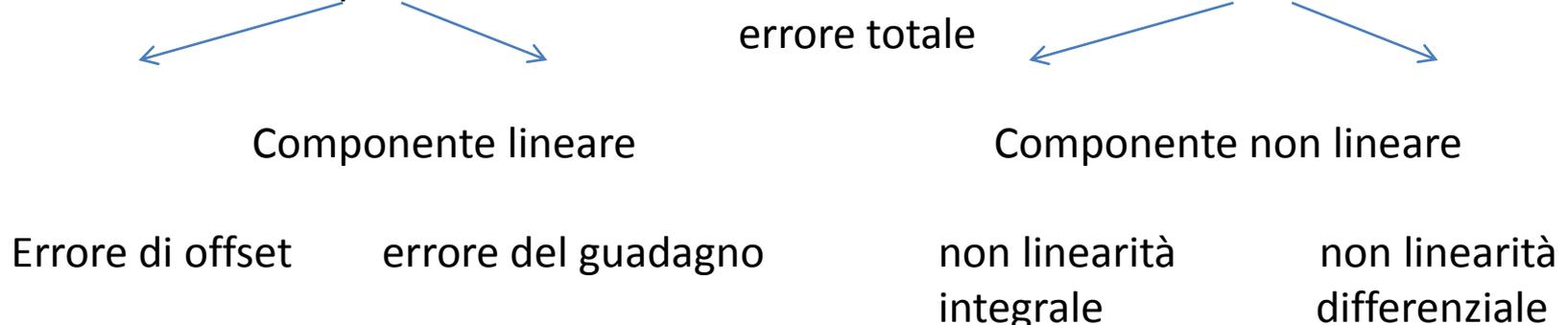
Si definisce **quanto Q** la distanza tra un valore discreto di quantizzazione e quello contiguo.

L'ampiezza del quanto è  $Q = V_{fs} / 2^n$  e a volte è indicato come una misura della risoluzione. Normalmente, però la risoluzione è il numero di n bit del codice digitale di uscita.

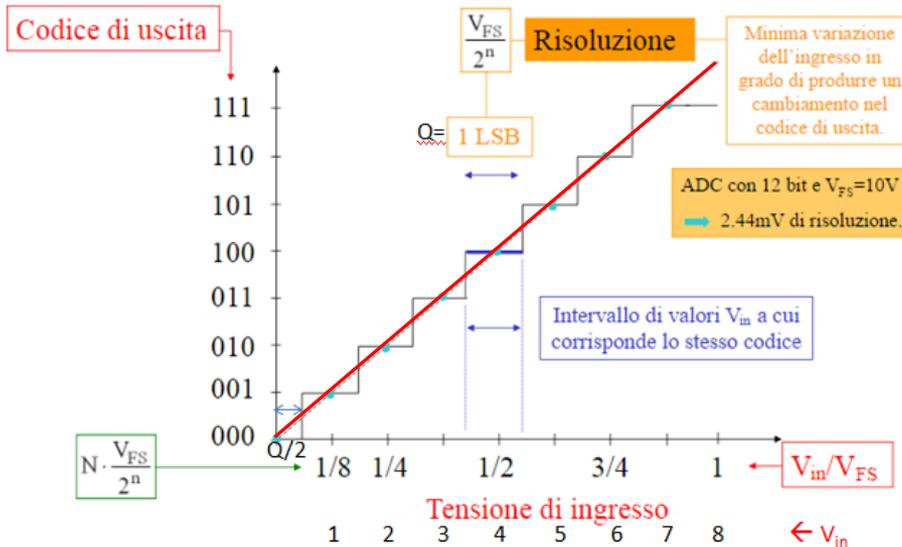
L' **errore di quantizzazione** è la differenza tra il valore nominale di un dato intervallo di quantizzazione e il valore effettivo di un livello analogico attribuito a tale intervallo.

L' errore di quantizzazione produce un vero e proprio rumore e non può essere eliminato. Può essere ridotto aumentando il numero di bit della parola, ma sarà sempre di almeno  $\pm 1/2 \text{ LSB}$

L'**errore totale** di un convertitore AD può essere considerato come la sovrapposizione di una componente lineare e di una non lineare, ciascuna delle quali è costituita a sua volta di altre componenti



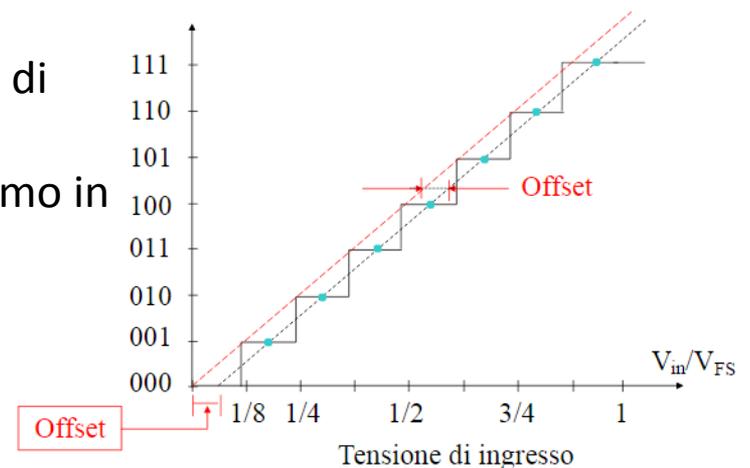
## RELAZIONE INGRESSO-USCITA di un ADC IDEALE



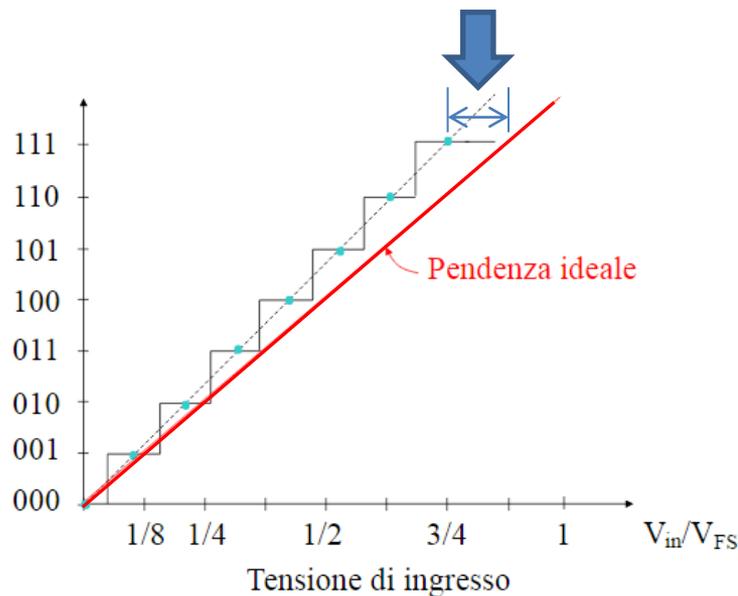
Quella di figura in rosso è la caratteristica ideale di riferimento di un ADC.

Quando la linea reale non passa per l'origine siamo in presenza di un **errore di offset** che può essere annullato con qualche componente esterno.

## ERRORE di OFFSET

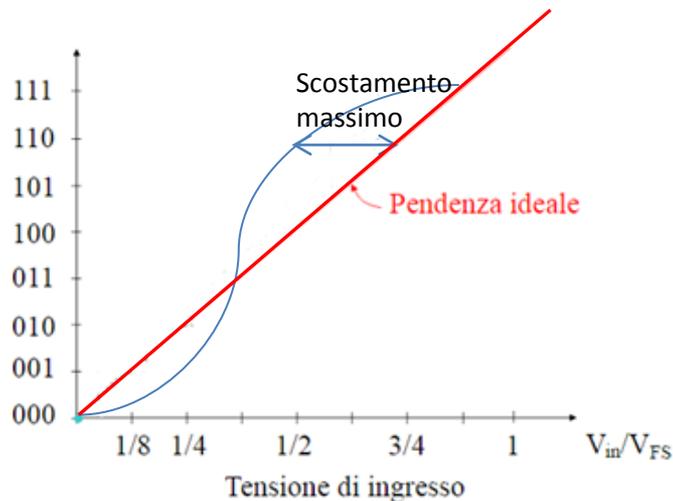


### ERRORE di GUADAGNO



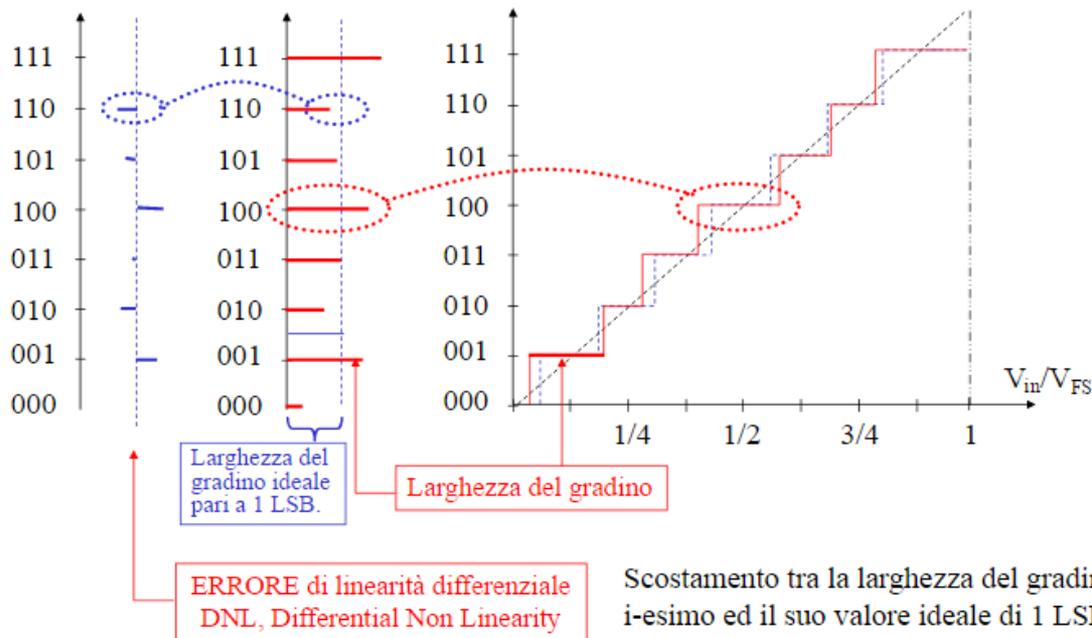
Quando, invece, la linea reale non raggiunge il punto individuato dal valore massimo convertibile e dal relativo codice siamo in presenza di un **errore di guadagno**.

### ERRORE di LINEARITA'



Quando la linea reale presenta delle curvature, la massima distanza, in termini di tensione, tra la retta di riferimento e la curva reale viene indicata come **errore di linearità** (o di non linearità integrale)

## NON - LINEARITA' DIFFERENZIALE



Per **non linearità differenziale** indichiamo invece la massima differenza di ampiezza tra due intervalli di quantizzazione consecutivi espressa come frazione di 1LSB.

## ALTRE CARATTERISTICHE

Dipendenza minima dei parametri dalla temperatura

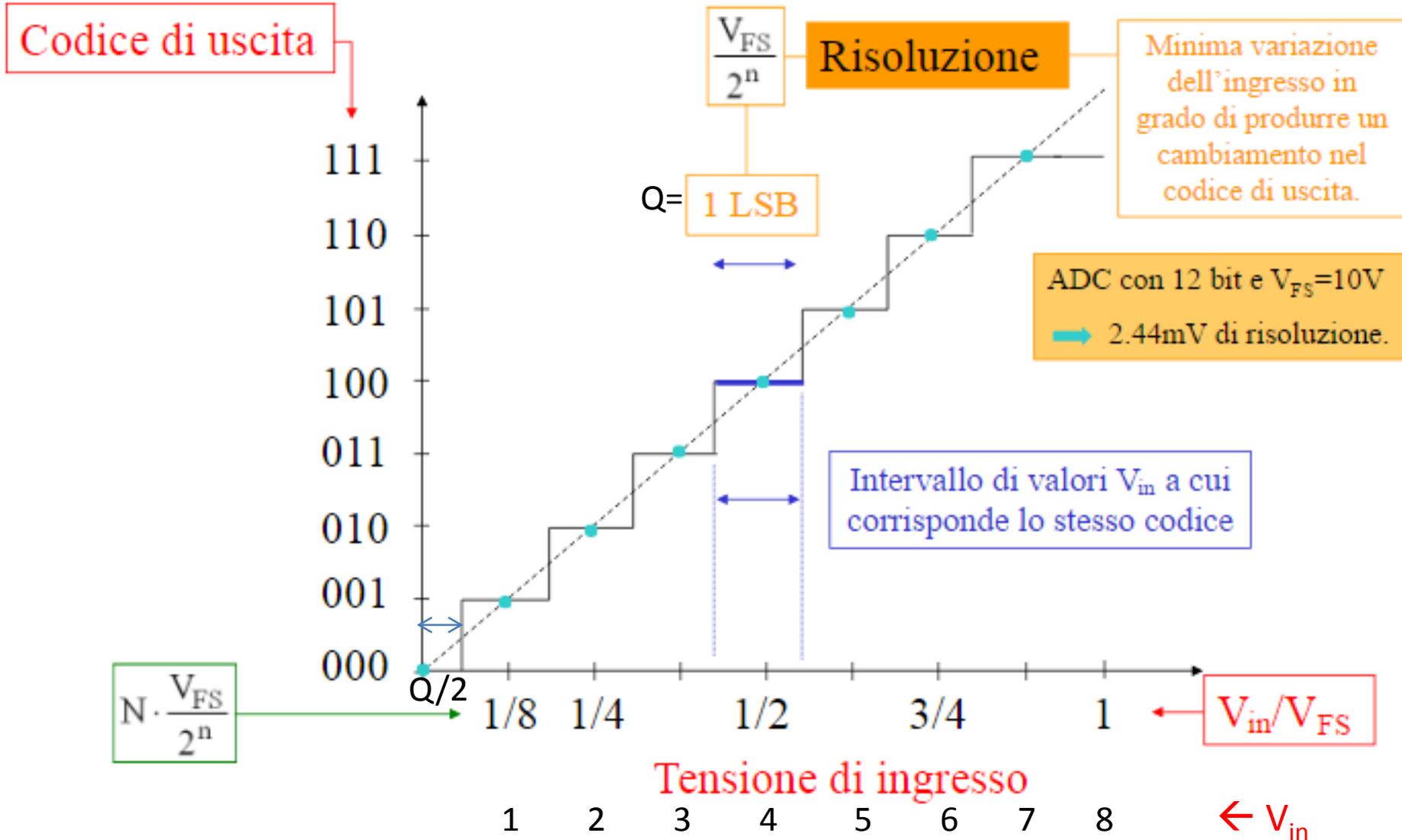
(espressi nei coefficienti di temperatura per gli errori di guadagno, offset e linearità)

Monotonicità della risposta

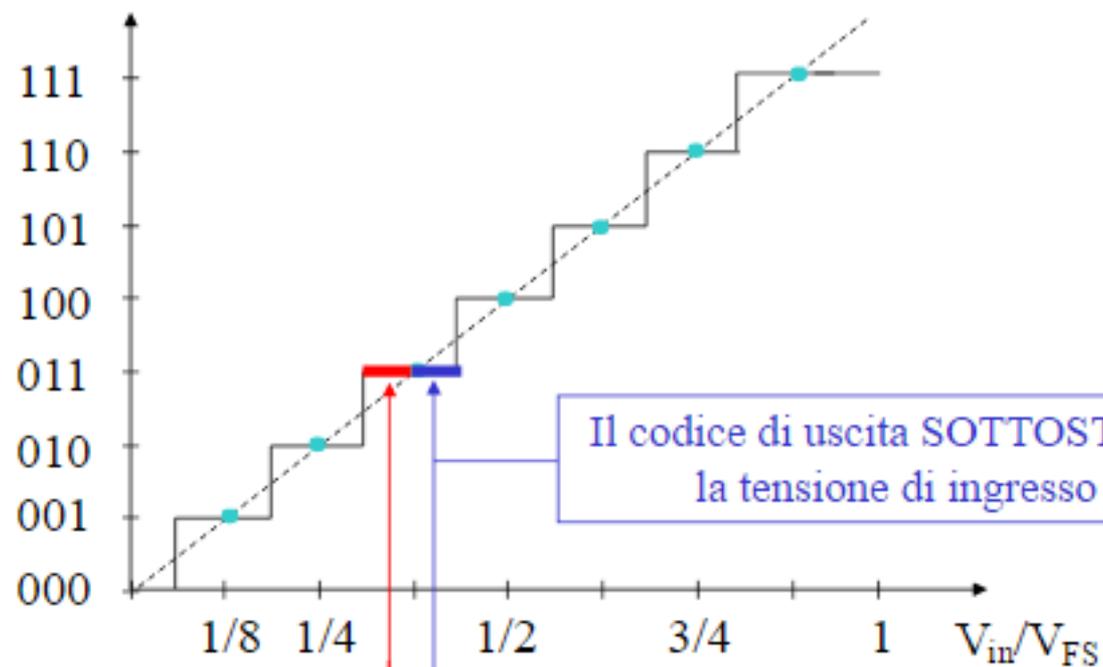
(il codice di uscita cresce sempre al crescere della tensione di ingresso)

Per **tempo di conversione** si intende il tempo richiesto per una conversione completa. Per molti convertitori in genere è pari all'inverso della frequenza di conversione

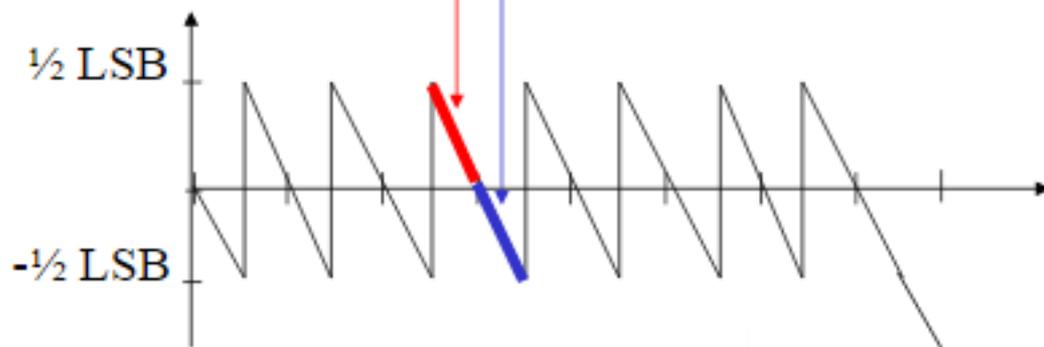
# RELAZIONE INGRESSO-USCITA di un ADC IDEALE



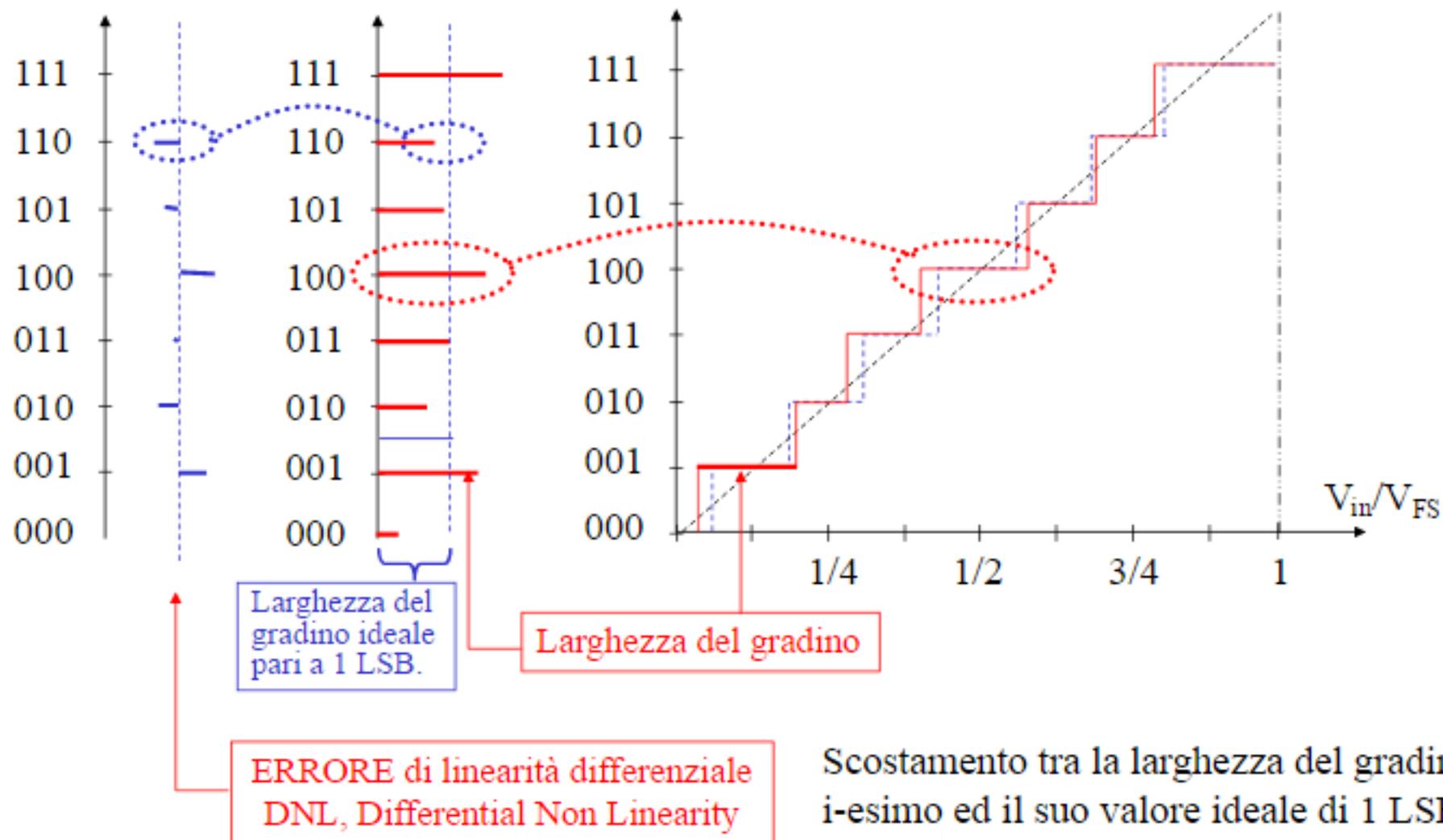
# ERRORE DI QUANTIZZAZIONE



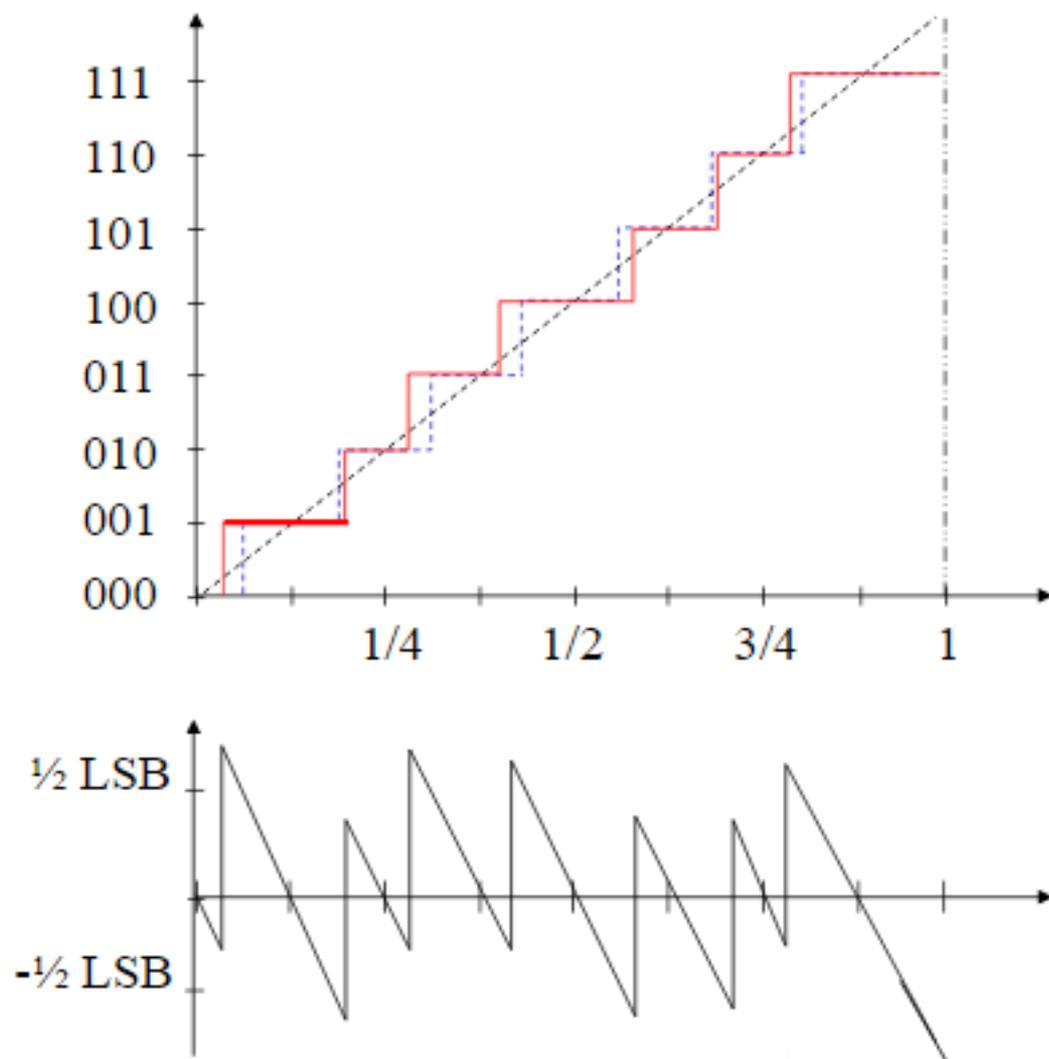
Il codice di uscita SOVRASTIMA la tensione di ingresso



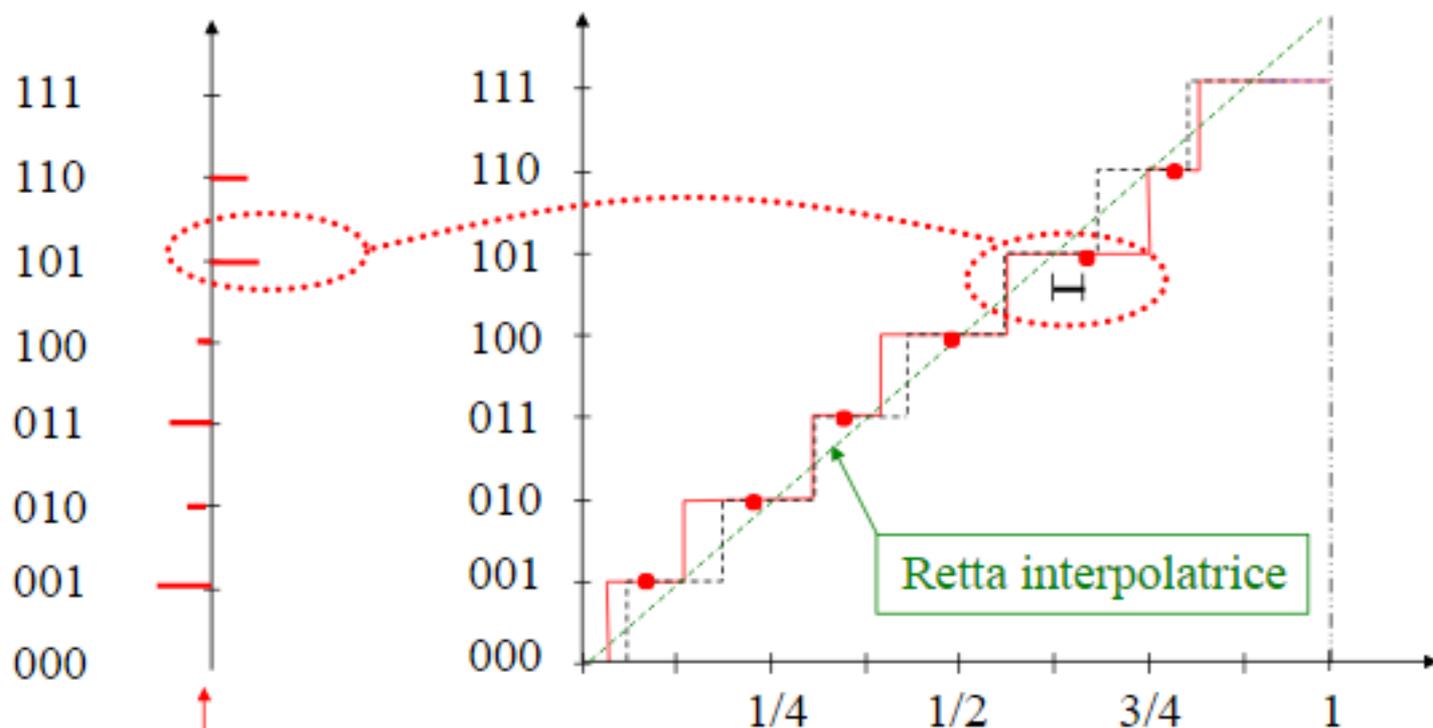
# NON - LINEARITA' DIFFERENZIALE



# ERRORE DI QUANTIZZAZIONE in ADC REALE



# NON - LINEARITA' INTEGRALE

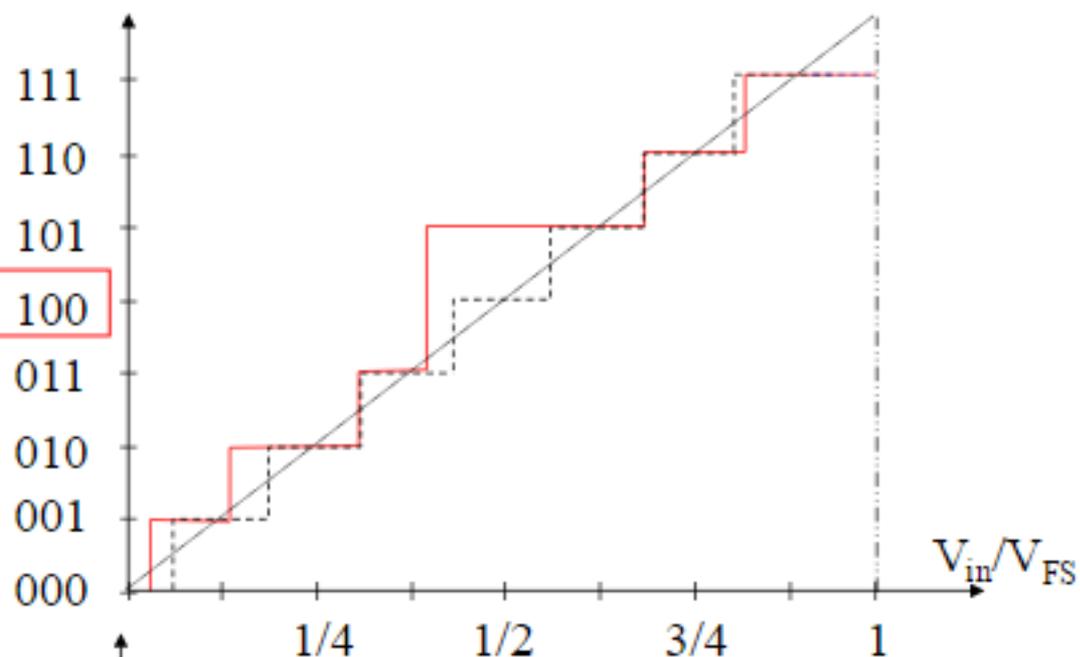


**ERRORE di linearità integrale**  
INL, Integral Non Linearity

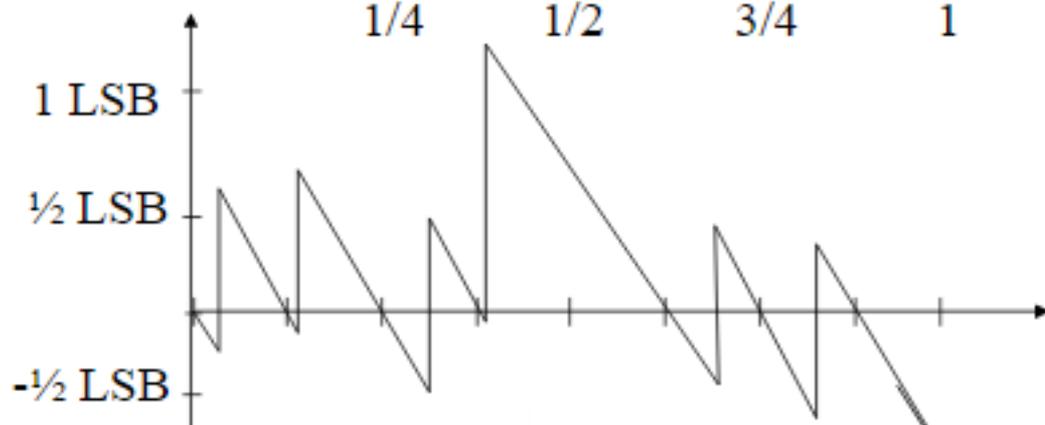
Scostamento tra il centro del gradino reale e quello teorico

## ERRORE per un CODICE MANCANTE

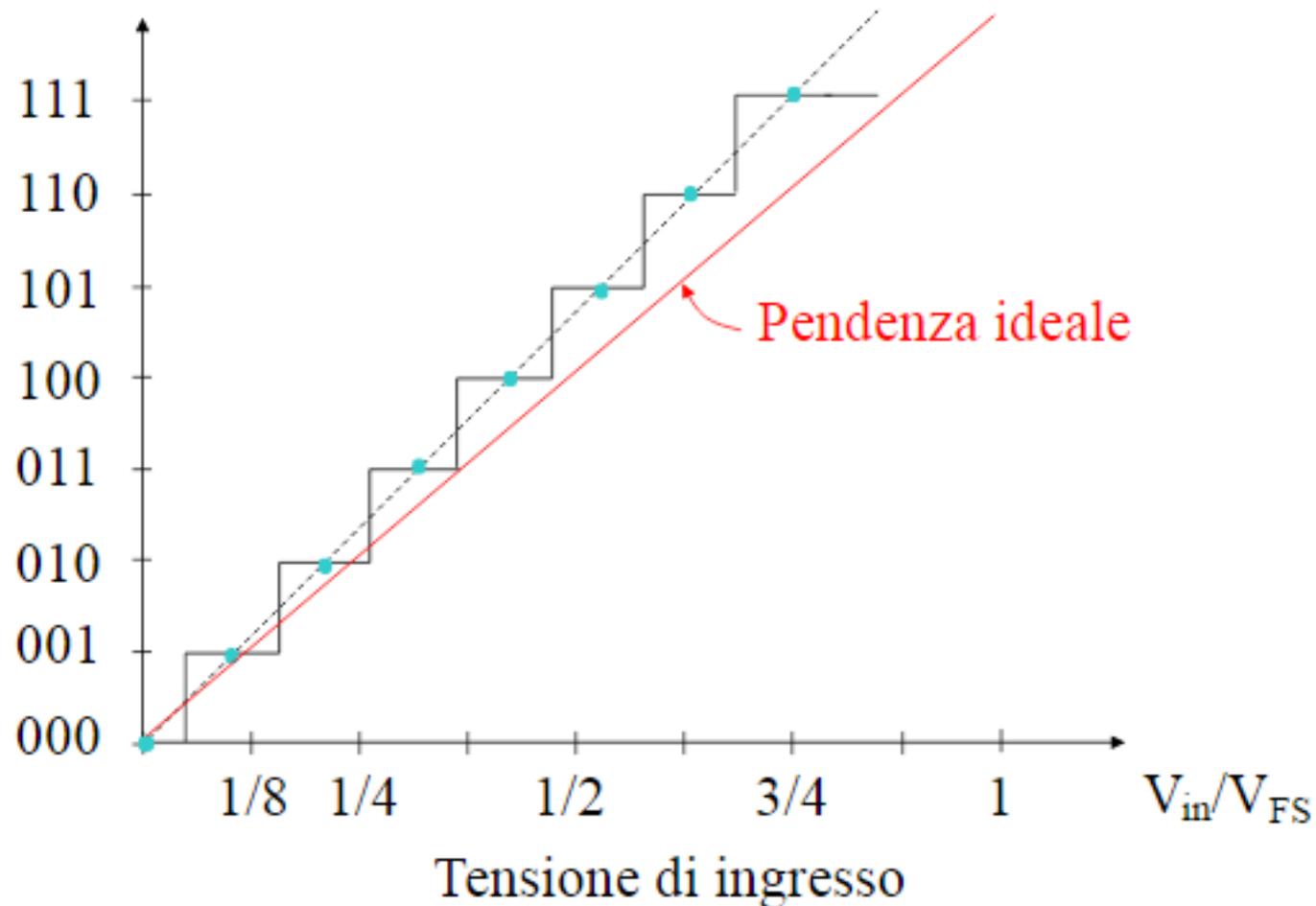
Codice che non uscirà mai



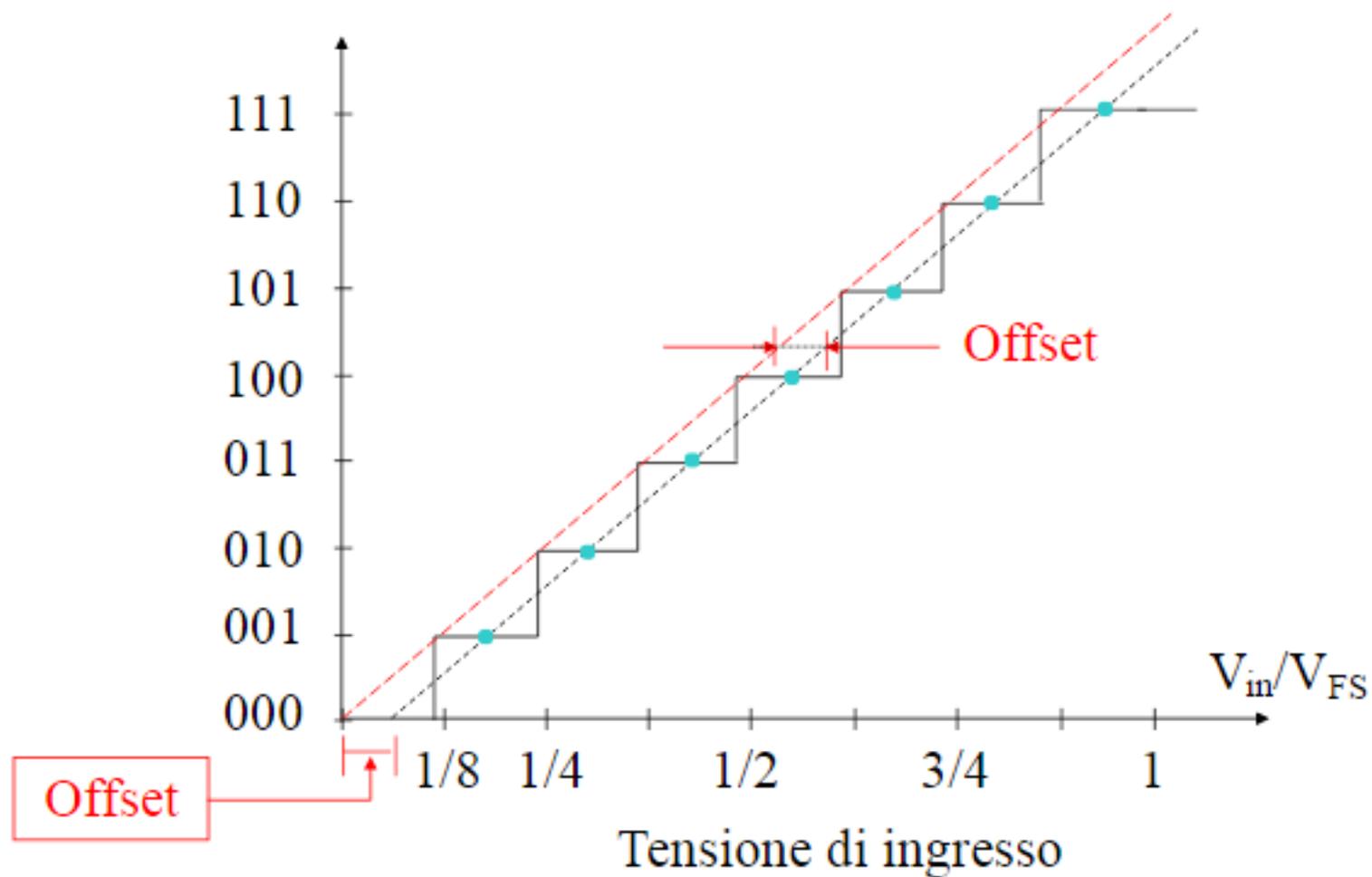
Se manca un codice,  
l'errore di quantizzazione  
è necessariamente  
maggiore di 1 LSB



## ERRORE di GUADAGNO



## ERRORE di OFFSET



## ALTRE CARATTERISTICHE

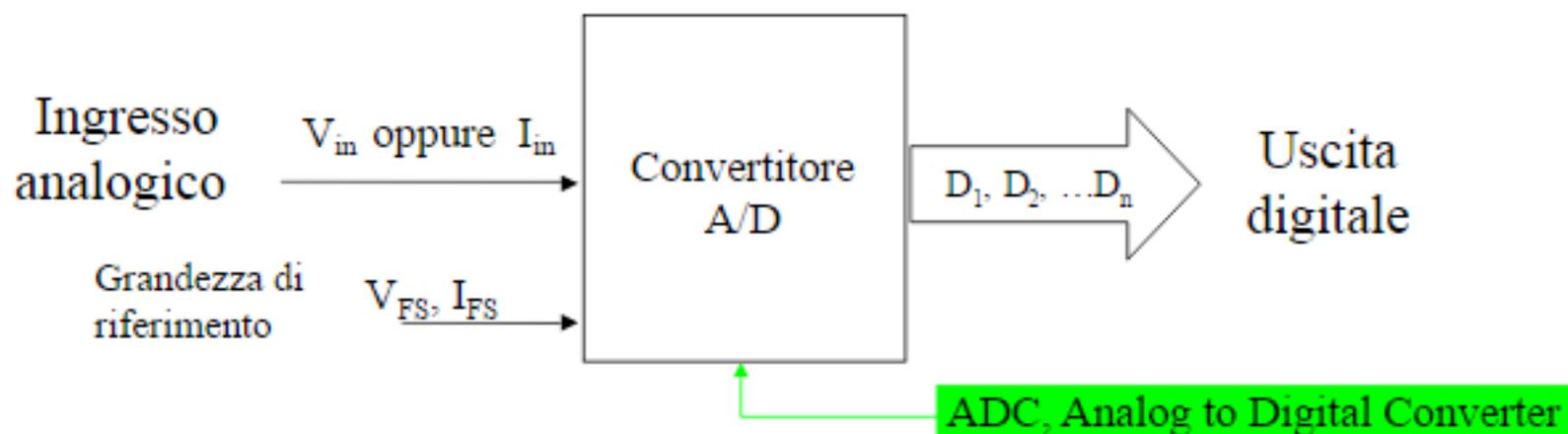
Dipendenza minima dei parametri dalla temperatura

(espressi nei coefficienti di temperatura per gli errori di guadagno, offset e linearità)

Monotonicità della risposta

(il codice di uscita cresce sempre al crescere della tensione di ingresso)

# CONVERTITORI ANALOGICO-DIGITALI, ADC



$D_1D_2 \dots D_n$  ← Parola digitale di uscita

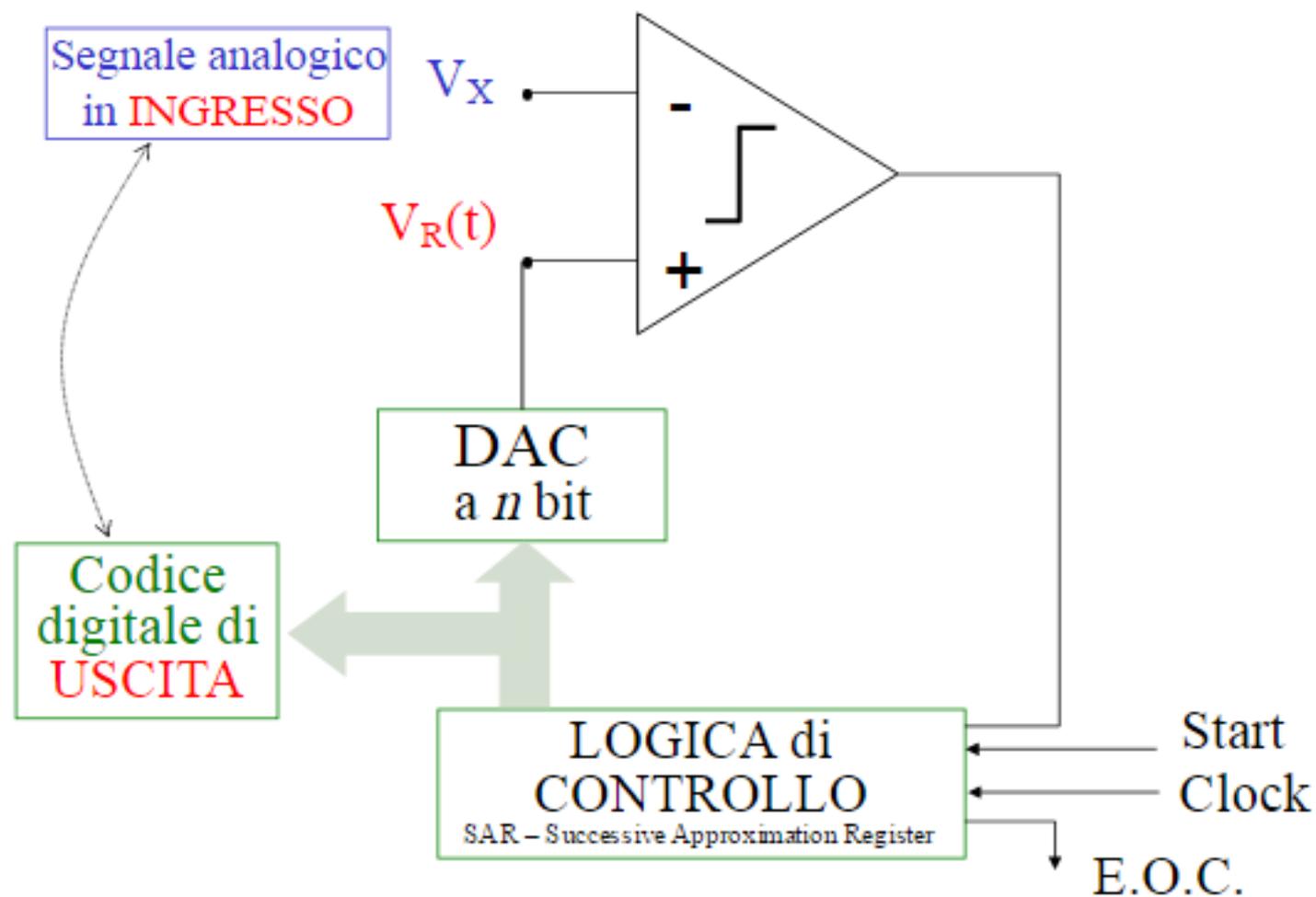
└─ BIT meno significativo – LSB, Least Significant Bit

└─ BIT più significativo –MSB, Most Significant Bit

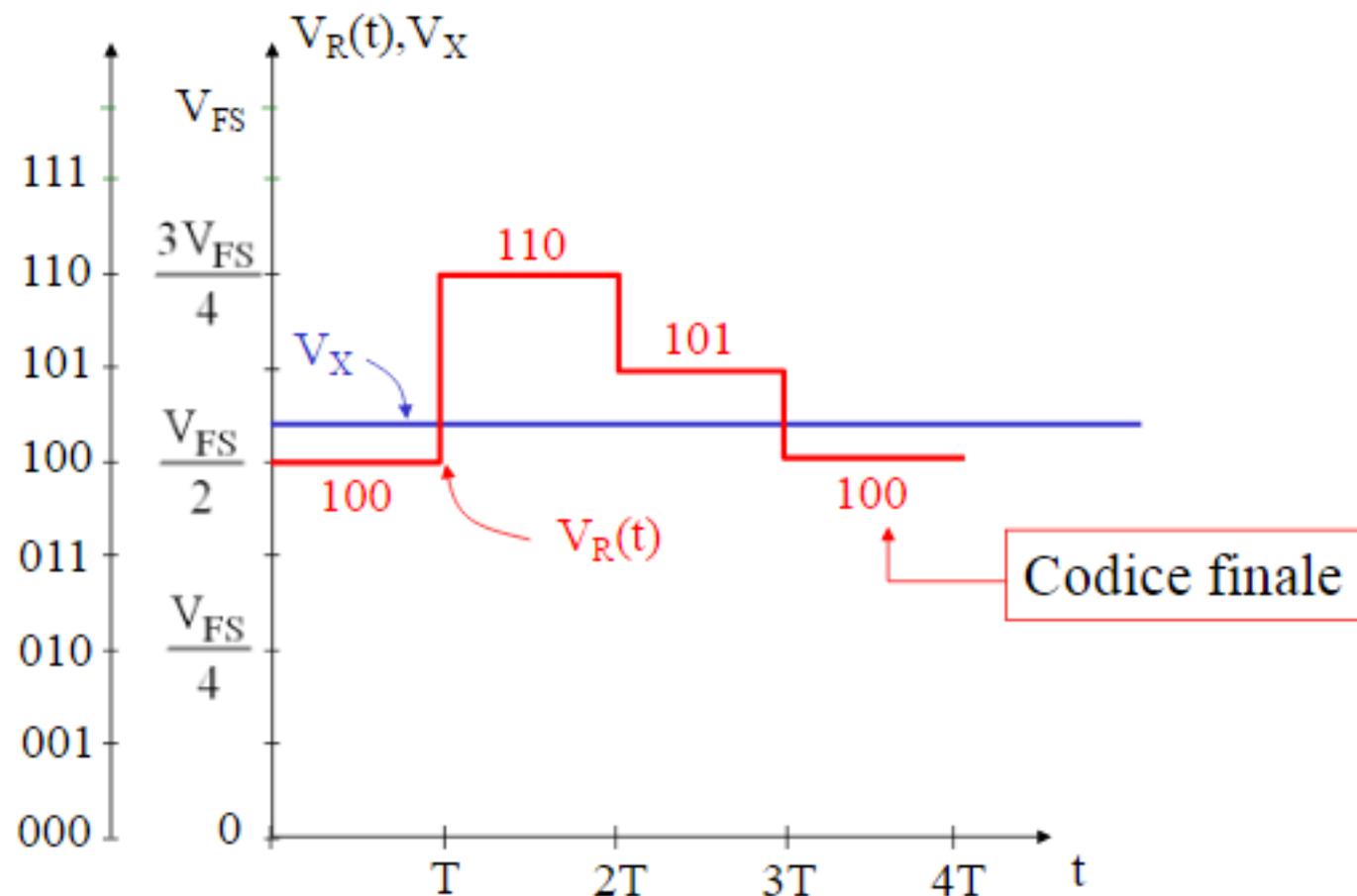
N è il numero decimale intero corrispondente alla parola digitale  $D_1D_2 \dots D_n$ :

$$N = D_1 \cdot 2^{n-1} + D_2 \cdot 2^{n-2} + \dots + D_n \cdot 2^0$$

# CONVERTITORE ad APPROSSIMAZIONI SUCCESSIVE



## Esempio di approssimazioni successive



## TEMPO di CONVERSIONE

Per convertitori ad  $n$  bit  $\longrightarrow$   $T_{\text{Conv}} = \frac{n}{f_{\text{ck}}}$   $\longleftarrow$

Velocità di conversione elevata

*Esempio*: ADC a 10 bit e  $f_{\text{ck}}=1$  MHz  $\longrightarrow$   $T_{\text{Conv}}=10$   $\mu$ s

Si potrebbe raggiungere un tasso di 100.000 conversioni/s

Fattori limitanti la frequenza di clock,  $f_{\text{ck}}$  :

- tempo di assestamento del DAC
- tempo di risposta del comparatore  
(in particolare quando  $V_X$  e  $V_R$  differiscono di poco)
- tempo di risposta della SAR

## FREQUENZA MASSIMA del SEGNALE da CONVERTIRE

E' fondamentale che il segnale di ingresso resti costante entro  $\pm 1/2$ LSB durante il tempo di conversione

Massima velocità di variazione di un ingresso sinusoidale :

$$\left. \frac{d}{dt} \left( \frac{V_{FS}}{2} \sin(2\pi f_{in} \cdot t) \right) \right|_{t=0} = V_{FS} \cdot \pi \cdot f_{in}$$

Durata della conversione :

$$T_{Conv} = \frac{n}{f_{ck}}$$



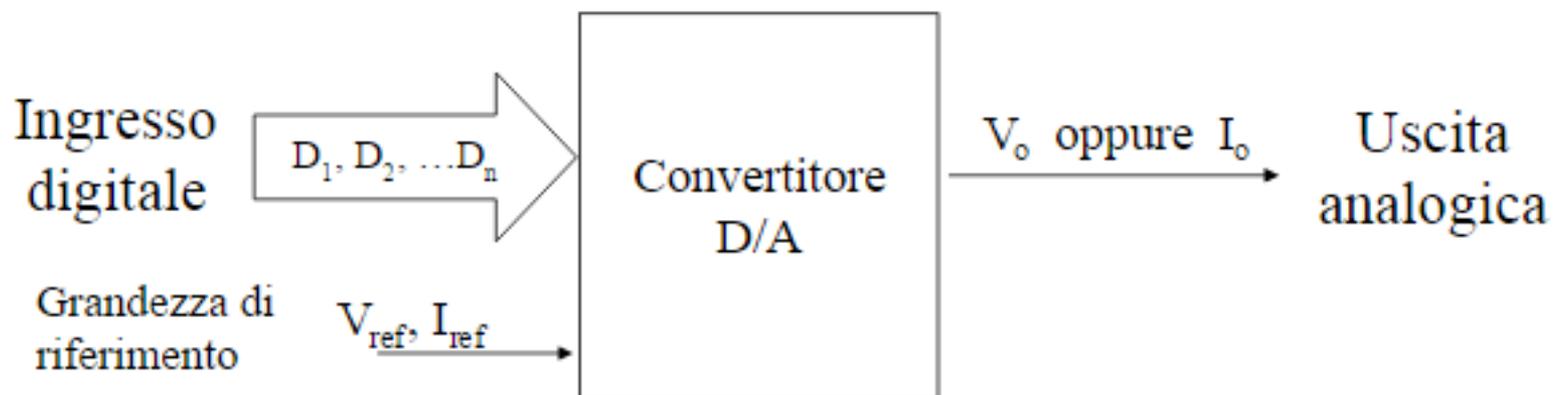
$$\left[ V_{FS} \cdot \pi \cdot f_{in} \right] \cdot \frac{n}{f_{ck}} < .5 \cdot \frac{V_{FS}}{2^n} \quad \text{da cui}$$

$$f_{in} \leq .5 \cdot \frac{f_{ck}}{\pi \cdot n \cdot 2^n}$$

*Esempio* : ADC a 10 bit e  $f_{ck}=1$  MHz  $\rightarrow f_{in} < 16$  Hz

per un segnale sinusoidale con ampiezza picco-picco pari a  $V_{FS}$

# Conversione D/A



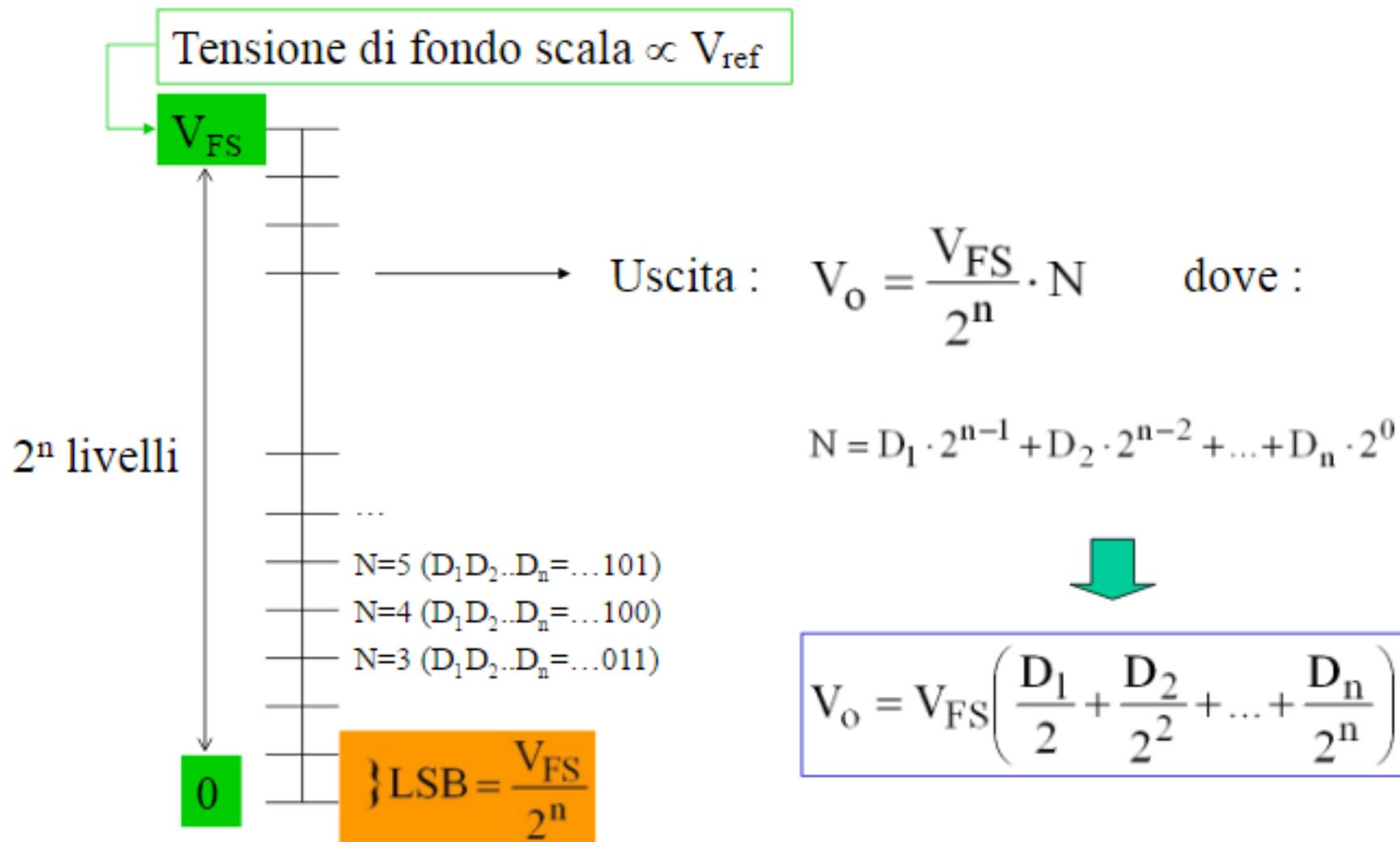
$D_1 D_2 \dots D_n$  ← Parola digitale di ingresso

└── BIT meno significativo – LSB, Least Significant Bit

└── BIT più significativo –MSB, Most Significant Bit

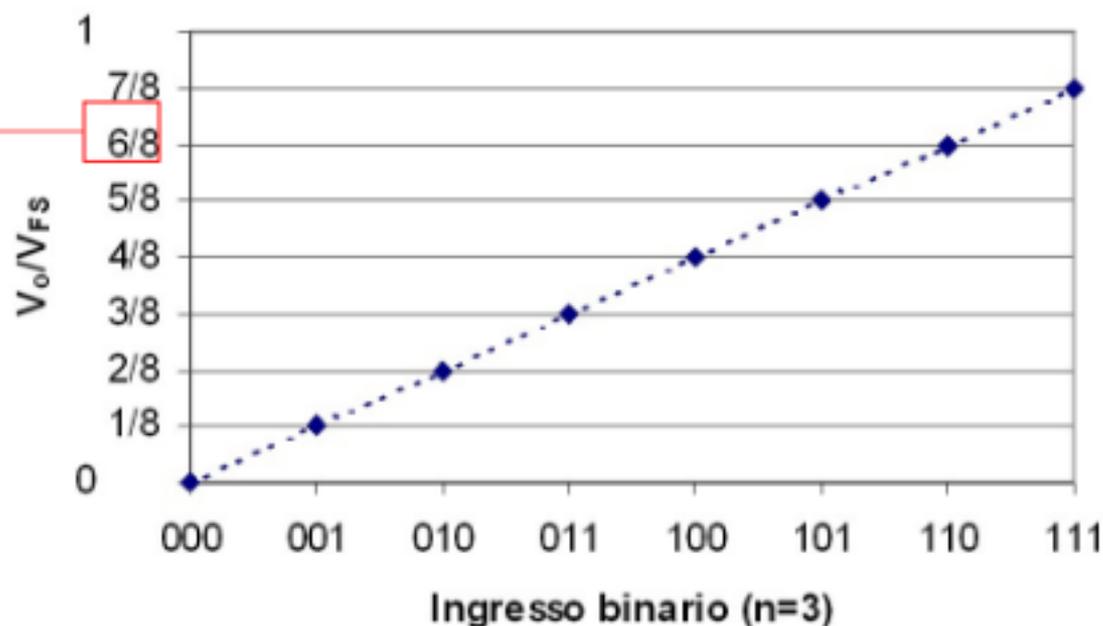
$N$  è il numero decimale intero corrispondente alla parola digitale  $D_1 D_2 \dots D_n$

## RELAZIONE INGRESSO-USCITA



# CARATTERISTICA DI TRASFERIMENTO IDEALE

$$\frac{V_o}{V_{FS}} = \frac{N}{2^n}$$



## PARAMETRI DI UN *DAC* REALE

- ***n***: numero dei bit nella parola digitale di ingresso  
E' un indice del numero di livelli discreti in uscita, pari a  $2^n$  o del numero di intervalli in cui viene suddivisa la tensione di fondo scala.
- ***Risoluzione***: è la più piccola variazione che può subire, nel caso ideale, la grandezza di uscita  
Viene data in bit, in parti su  $2^n$ , in %, in mV o mA.
- ***Fondo scala*** : è il valore  $V_{FS}$  (o  $I_{FS}$ ) di fondo scala della grandezza di uscita  
Corrisponde normalmente alla tensione di alimentazione degli integrati, 2.5V o 5V.

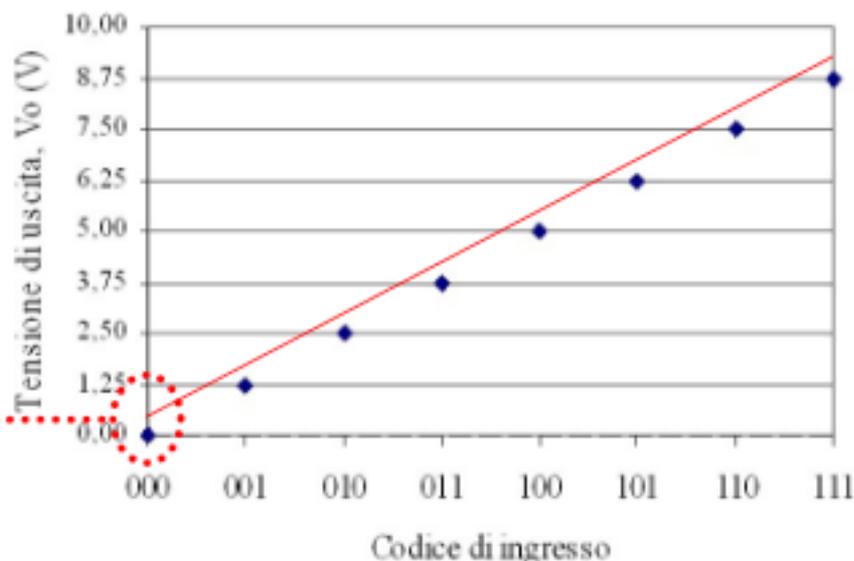
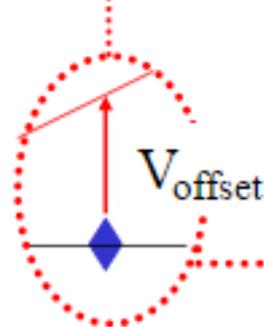
# DAC reali

- Scostamenti dall'andamento lineare dovuti a:
  - Offset
  - Guadagno
  - Non linearità

## OFFSET del DAC

La presenza dell'offset comporta che, in corrispondenza del codice 000, l'uscita non sia nulla ma valga  $V_{\text{offset}}$ .

$$V_o = V_R \sum_{i=1}^n \left( \frac{D_i}{2^i} \right) + V_{\text{offset}}$$



L'effetto è una traslazione rigida della curva caratteristica di una quantità pari a  $V_{\text{offset}}$ .

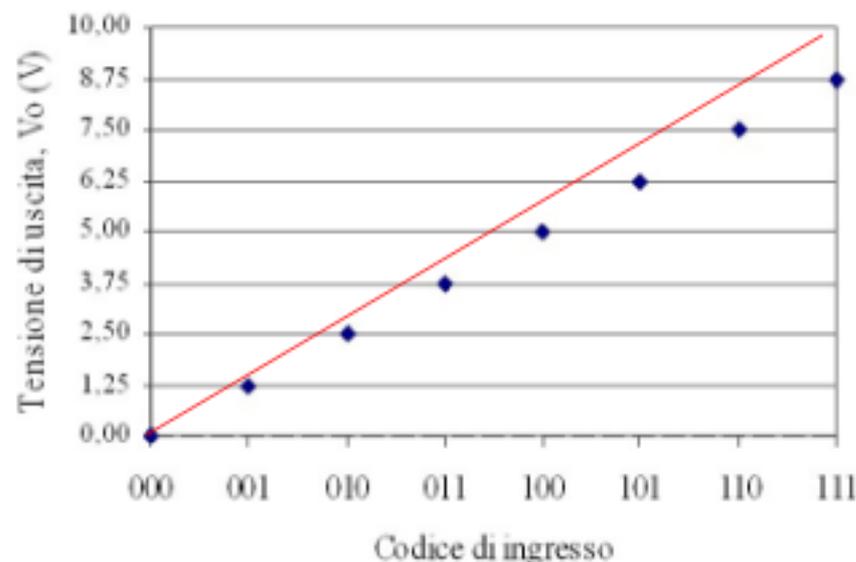
$V_{\text{offset}}$  è normalmente dell'ordine dei mV

## ERRORE DI GUADAGNO del DAC

La presenza di un guadagno non costante al variare del codice di ingresso comporta che il valore dell'uscita analogica differisca dal valore ideale

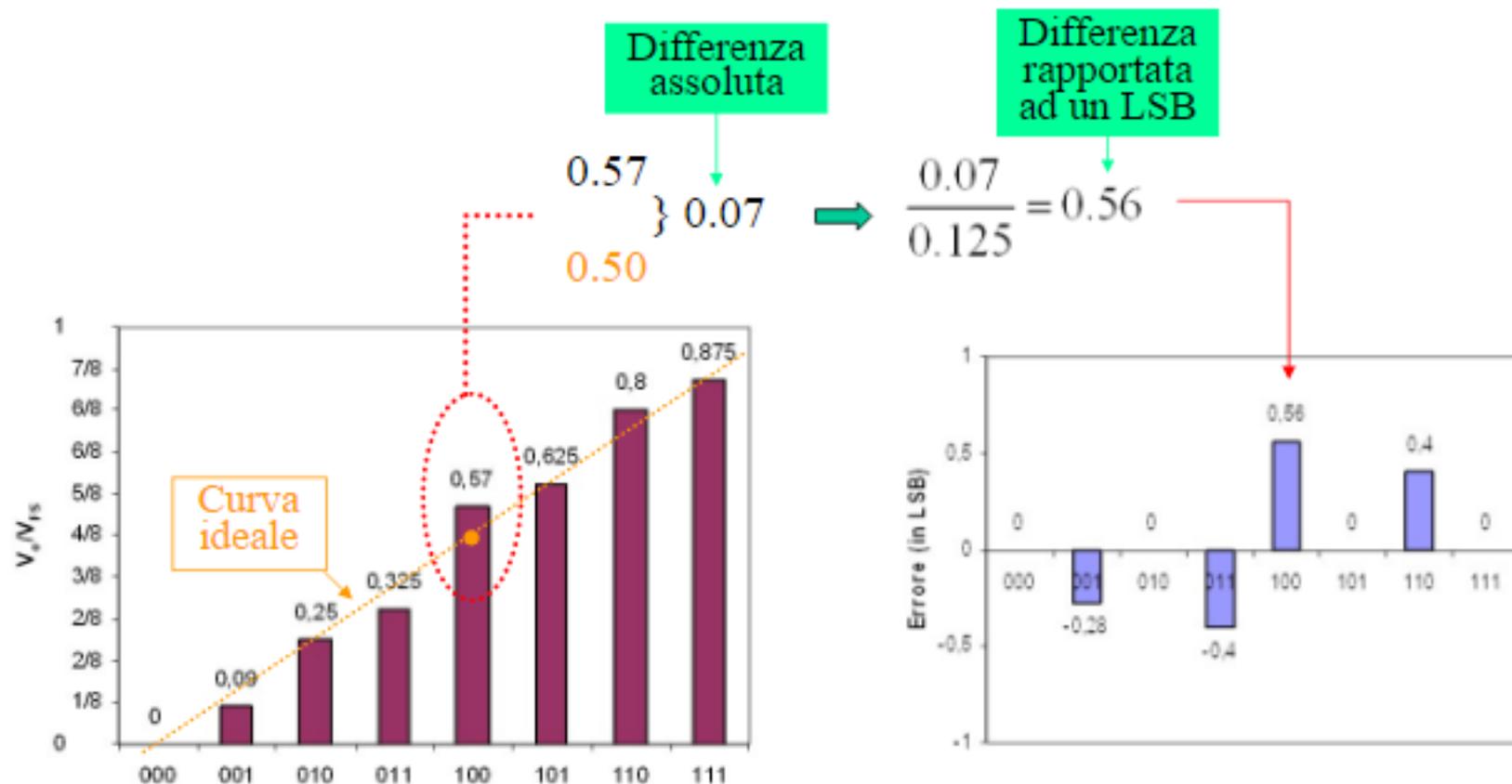
Normalmente lo scostamento aumenta all'aumentare del codice di ingresso e può essere rappresentato con un fattore moltiplicativo  $K$  nella relazione ingresso/uscita.

$$V_O = K \cdot V_R \sum_{i=1}^n \left( \frac{D_i}{2^i} \right)$$



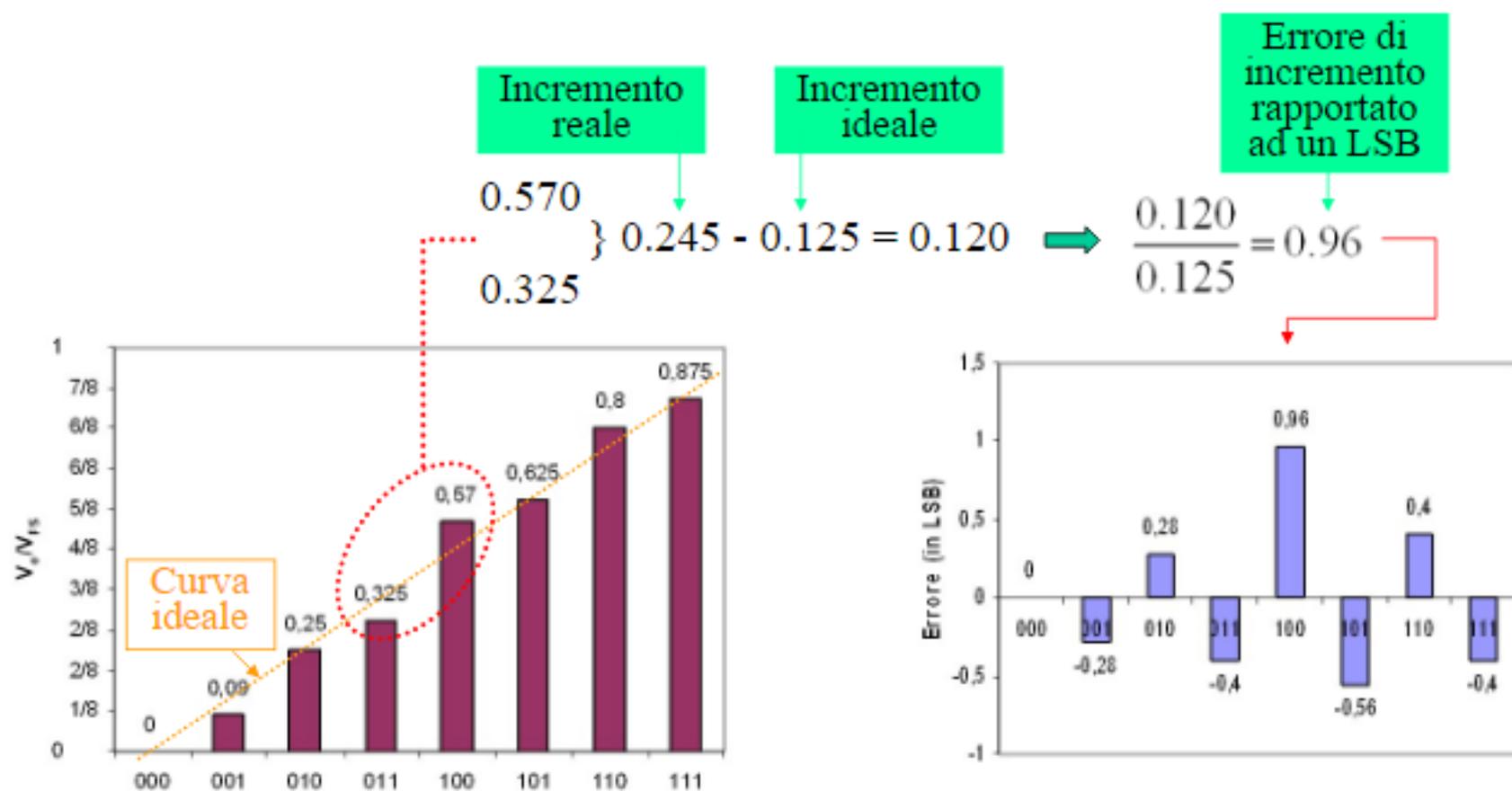
L'effetto è una inclinazione diversa della curva caratteristica.

# ERRORE DI LINEARITA' INTEGRALE



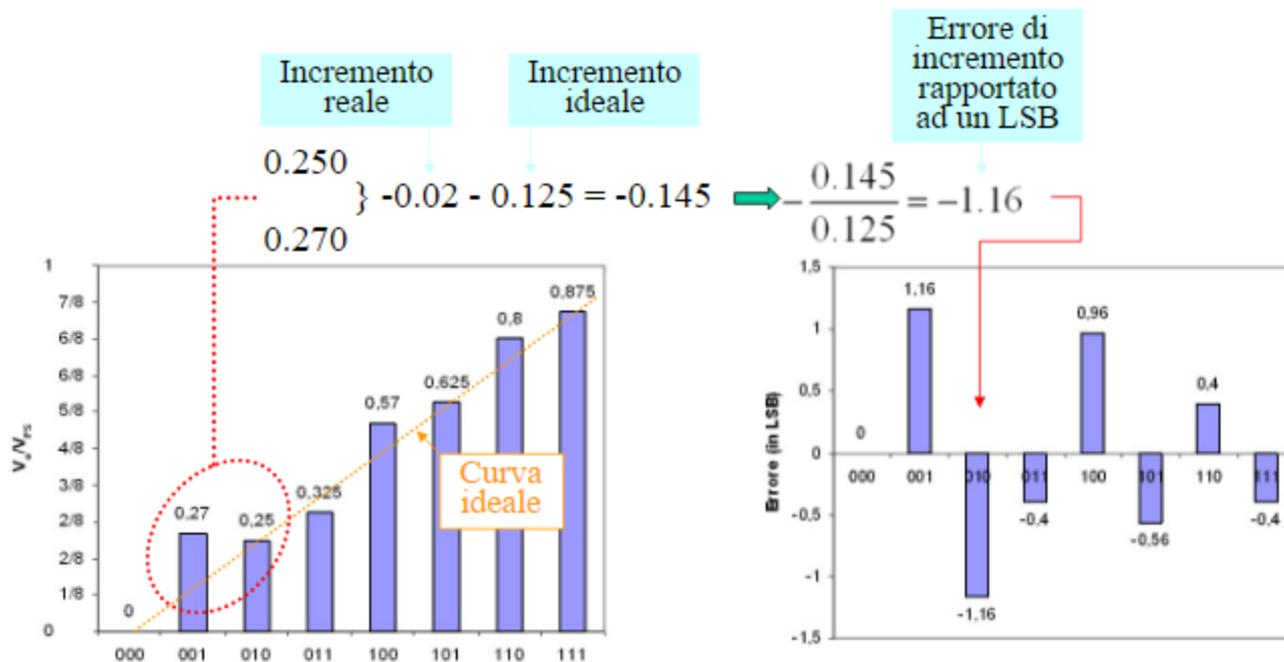
Nei DAC di buone prestazioni gli errori di linearità integrale sono inferiori a  $\pm 1$  LSB

# ERRORE DI LINEARITA' DIFFERENZIALE



Nei DAC di buone prestazioni gli errori di linearità differenziale sono inferiori a  $\pm 0.5$  LSB

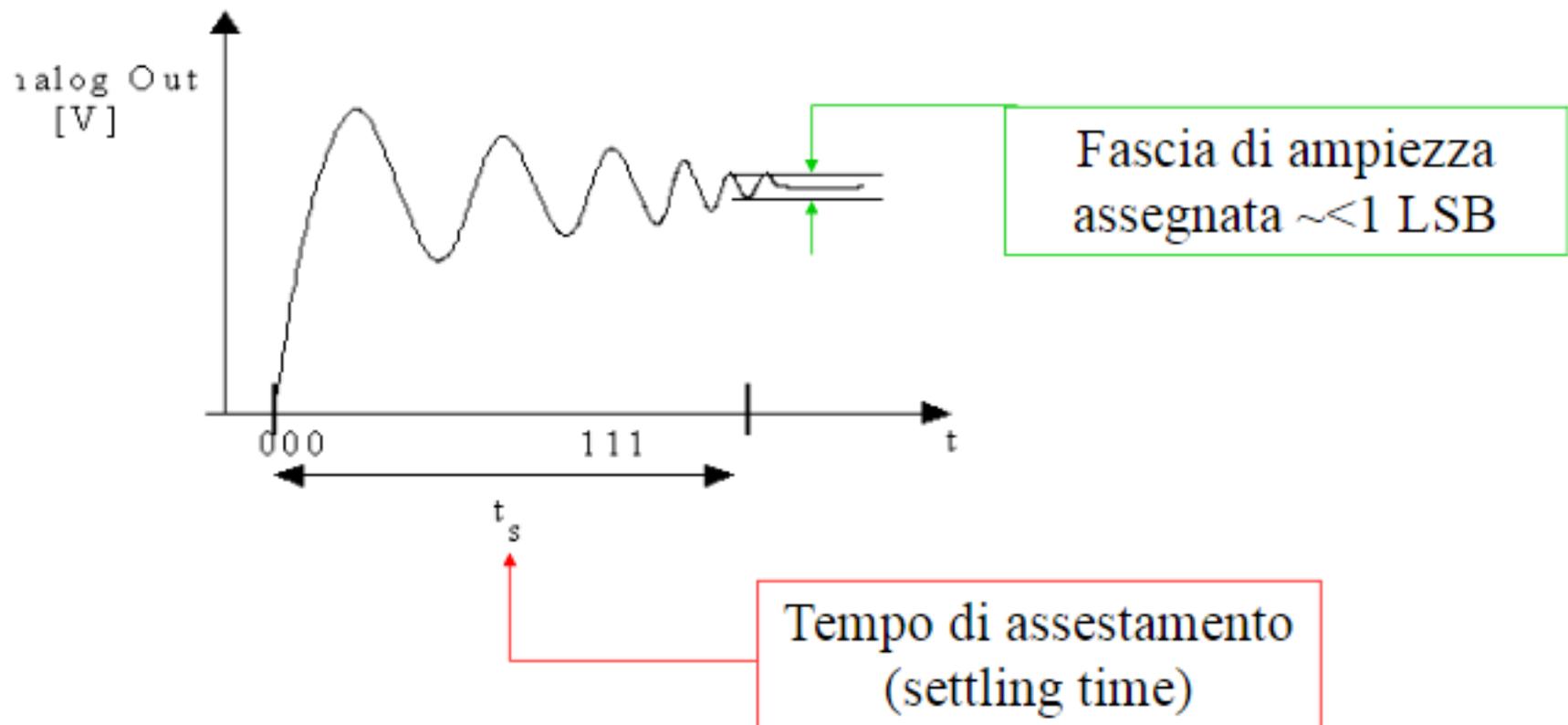
## MONOTONICITA' DEL DAC



La monotonicità è essenziale nei sistemi di controllo, dove un comportamento NON monotono può portare ad instabilità del sistema.

# SETTLING TIME

Commutazione della parola di ingresso da 00...000 a 11...111



## GLITCHES NEL SEGNALE DI USCITA

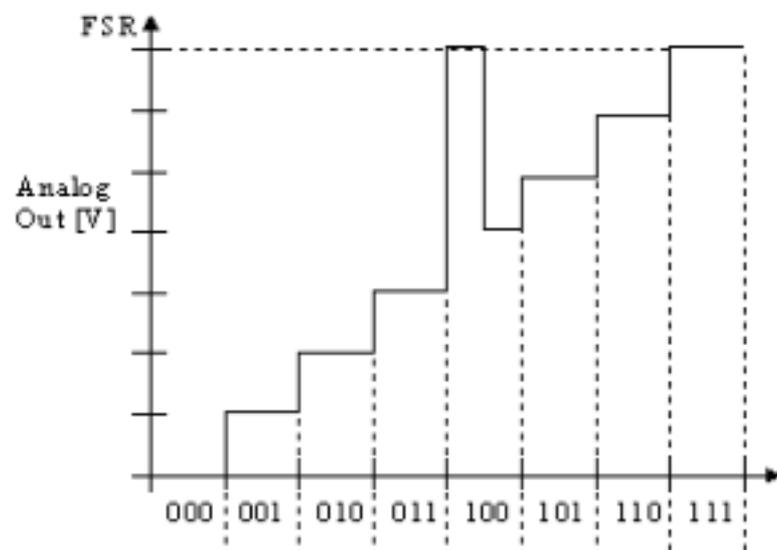
Il glitch è un impulso di breve durata che può comparire all'uscita del DAC nella transizione della risposta da un codice di ingresso al seguente.

E' dovuto alla commutazione non istantanea dei bit della parola, che produce codici di ingresso transitori e quindi uscite momentaneamente differenti da quella finale.

*Commutazione ideale*    100     $\longrightarrow$     011

*Commut. con glitch*    100  $\longrightarrow$  **111**  $\longrightarrow$  011

Bit lento nel commutare



Codice momentaneo spurio

## ALTRI PARAMETRI CARATTERISTICI DEI DAC REALI

- **Stabilità**

*E' indice di quanto il comportamento di una DAC sia sensibile all'età, alla temperatura, alla tensione di alimentazione, ecc.*

- **Accuratezza**

*E' la peggior differenza che si può riscontrare tra l'uscita del convertitore reale ed il corrispondente valore ideale (espressa in LSB).*

- **Precisione**

*E' indice della capacità del DAC di fornire sempre lo stesso valore analogico di uscita a parità di codice di ingresso.*