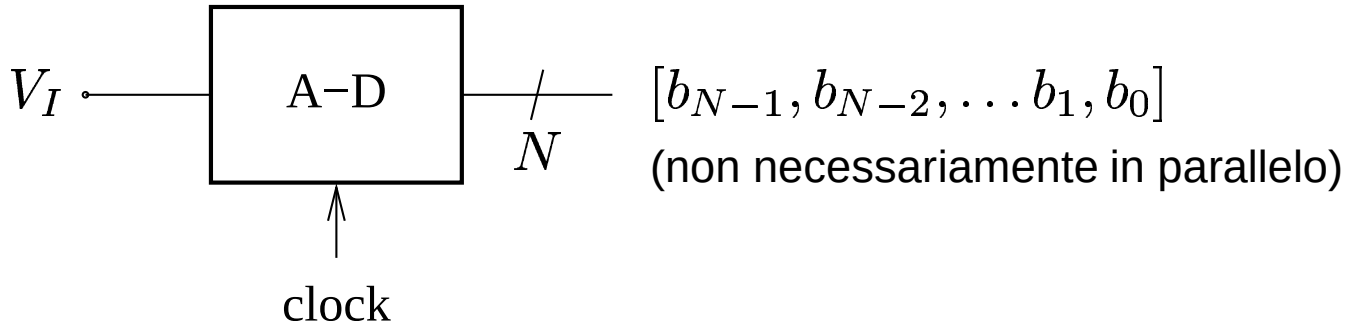
Conversione Analogico - Digitale

Funzione:

- convertire una grandezza analogica (tensione) in formato digitale;

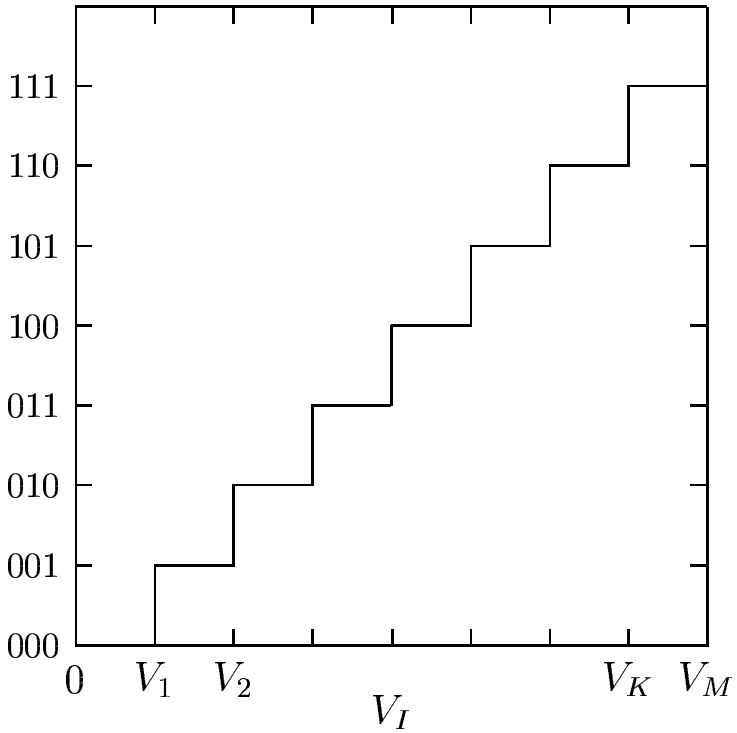
cioè convertire un livello di tensione in una stringa di bit.



Scopo, vantaggi:

- possibilità di elaborazione digitale della grandezza convertita (p. es. mediante strumenti di calcolo: computer, microcontrollori, microprocessori ...)
- si tratta di fatto di un voltmetro digitale.

Conversione A-D



$b_{N-1} \dots b_0$	$\leftrightarrow$	V_I
0 0 0		$0 \div V_1$
0 0 1		$V_1 \div V_2$
...		...
1 1 1		$V_K \div V_M$

$$V_2 - V_1 = V_3 - V_2 = \ldots = \Delta V$$

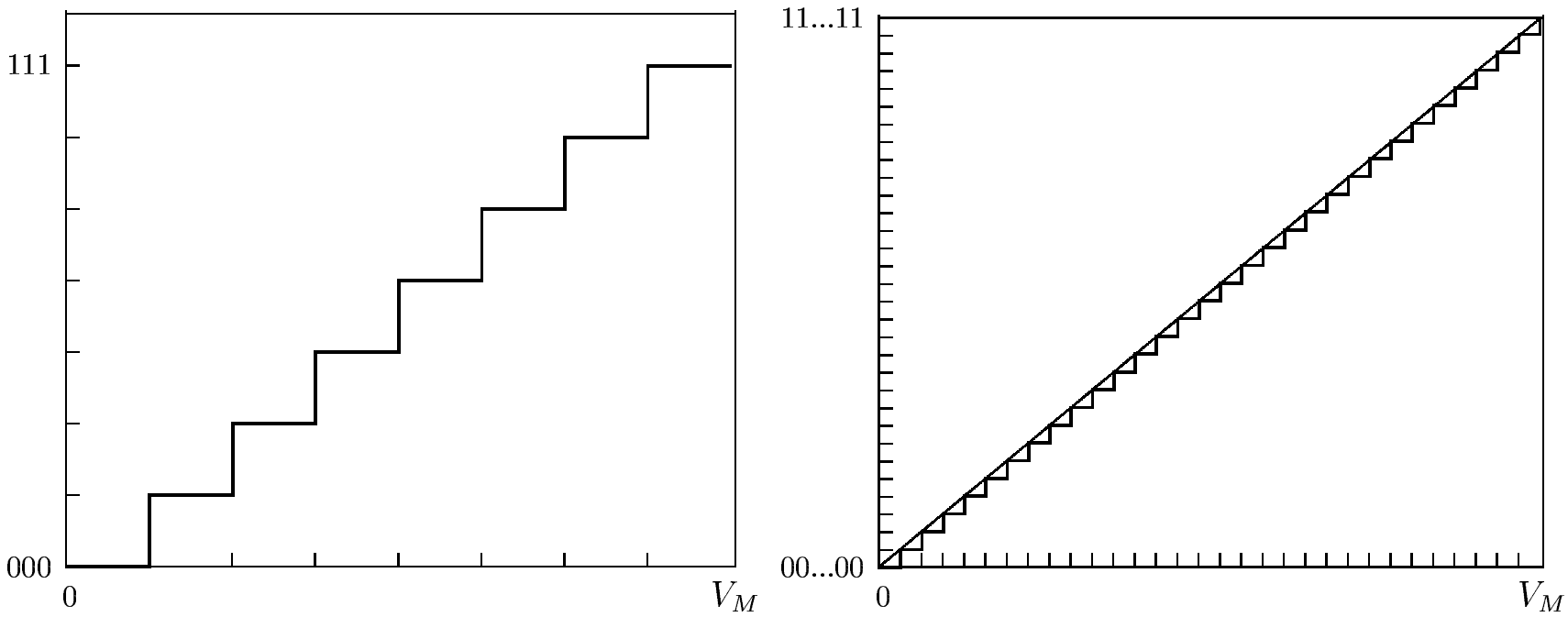
In che senso è un voltmetro digitale? È <u>davvero</u> un voltmetro digitale?

- la corrispondenza $[b_{N-1} \dots b_0] \leftrightarrow V_I$ non è biunivoca;

$\rightarrow$ c'è un errore nella conversione (errore **di quantizzazione**).

- l'errore diminuisce all'aumentare del numero di stringhe diverse (cioè del numero di bit)

Conversione A-D



L'accuratezza del voltmetro digitale aumenta all'aumentare del numero N di bit del convertitore;

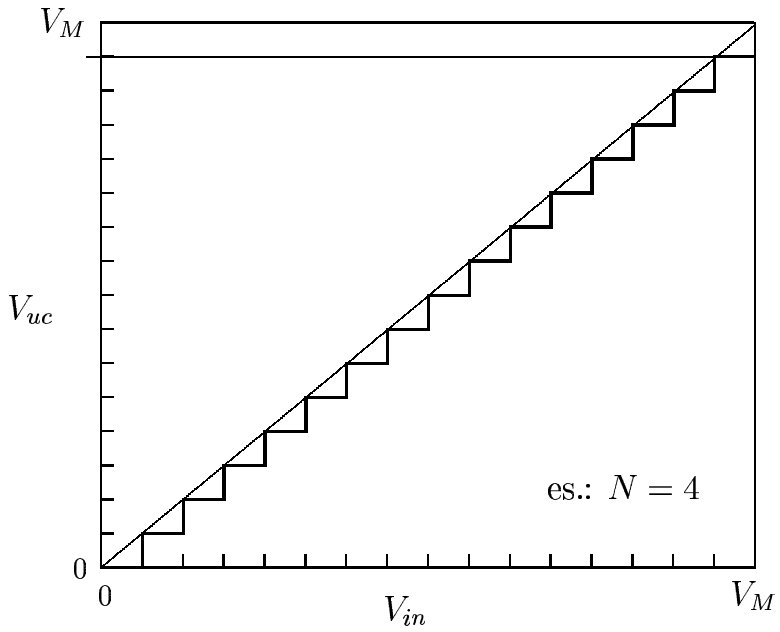
Un convertitore a *infiniti bit* sarebbe un voltmetro privo di errore di quantizzazione (caratteristica perfettamente lineare);

La differenza tra la caratteristica (ideale) lineare e quella effettiva misura l'errore di quantizzazione.

Conversione A-D

Può essere utile “vedere” le stringhe di bit come numeri (o tensioni):

$$[000\ldots00] \leftrightarrow V_{uc} = 0 \qquad [111\ldots11] \leftrightarrow V_{uc} = \frac{2^N - 1}{2^N} V_M$$



$$V_{uc} = \frac{V_M}{2^N}(b_{N-1}2^{N-1} + b_{N-2}2^{N-2} + \ldots + b_1 2^1 + b_0)$$

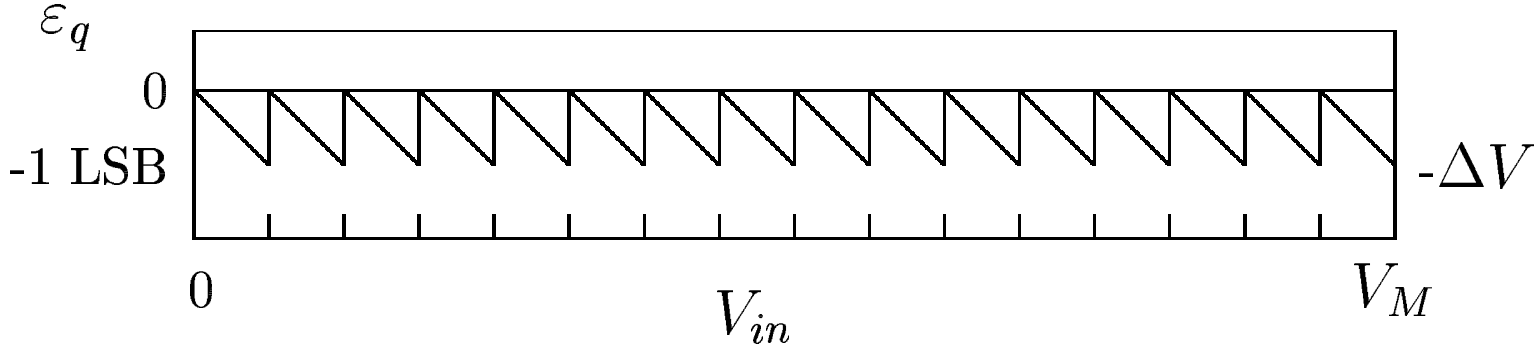
$$N = 4: \quad [0000] \leftrightarrow 0 \qquad [1111] \leftrightarrow \frac{15}{16} V_M$$

Questo permette di analizzare l’andamento dell’errore di quantizzazione:

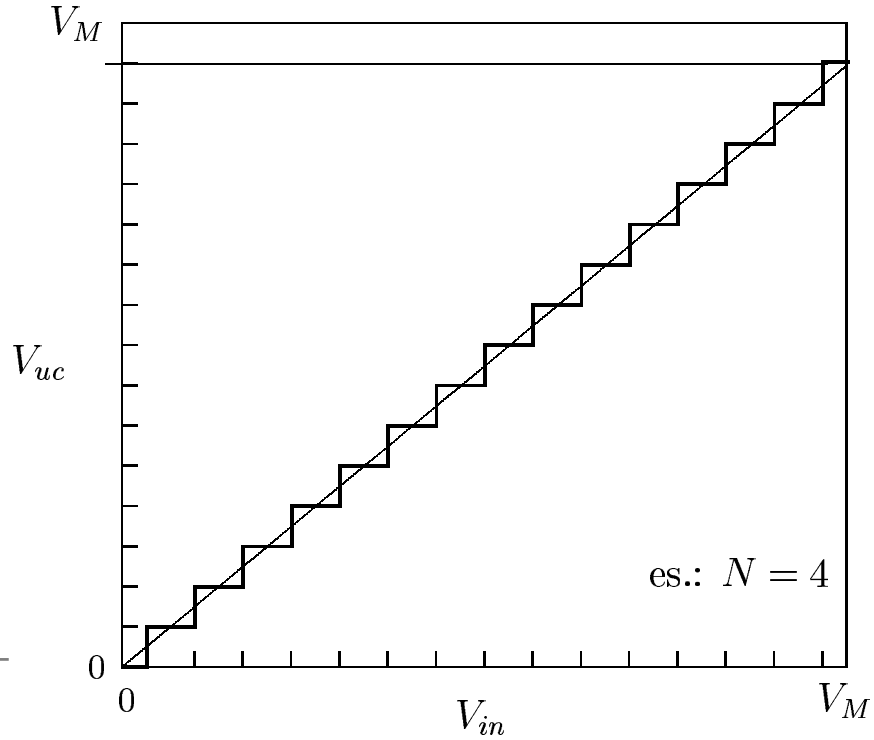
$$\varepsilon_q = V_{uc} - V_{in}$$

Conversione A-D

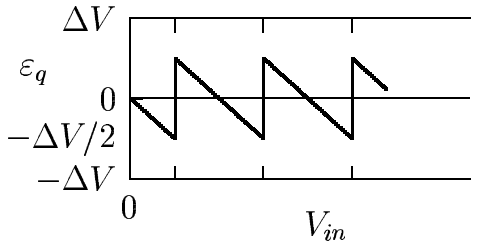
Andamento dell'errore di quantizzazione (4 bit):



L'errore è tutto negativo ($V_{uc} < V_{in},\ \forall\ V_{in}$); il valor medio è diverso da 0.



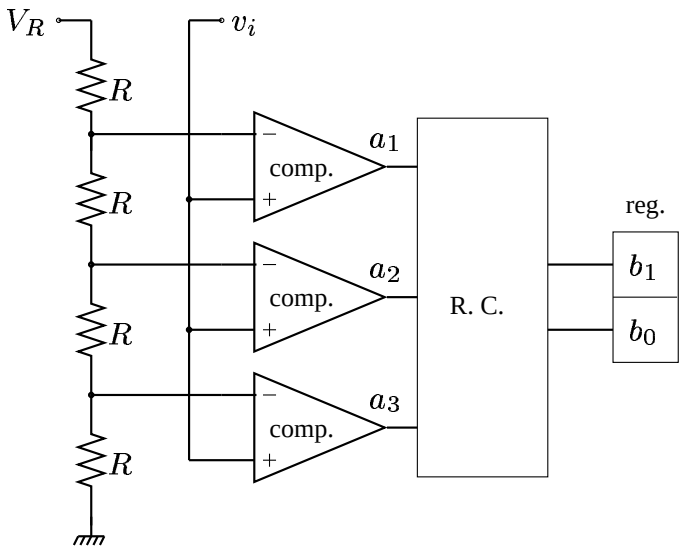
$\Rightarrow$



- $\overline{\varepsilon_q} = 0$;
- $\varepsilon_{q,MAX} = \Delta V/2$

Esempi di Convertitori A-D

Convertitore flash: (schema di principio)



V_{in}	a_1	a_2	a_3	b_1	b_0
$[0, V_R/4]$	0	0	0	0	0
$[V_R/4, V_R/2]$	0	0	1	0	1
$[V_R/2, 3V_R/4]$	0	1	1	1	0
$[3V_R/4, V_R]$	1	1	1	1	1

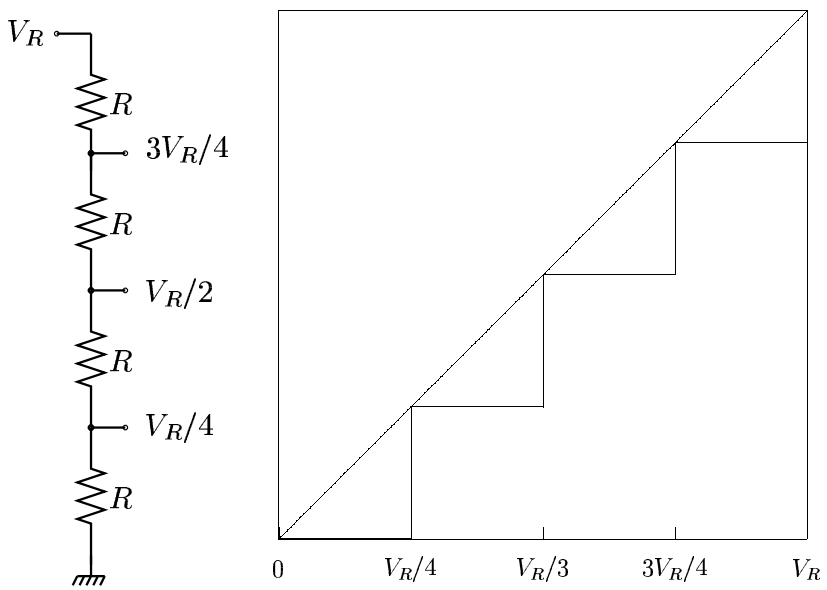
- $2^N - 1$ comparatori, 2^N resistenze
- Rete Combinatoria a $2^N - 1$ ingressi ed N uscite
- la tolleranza sulle resistenze ha effetti sulle soglie.

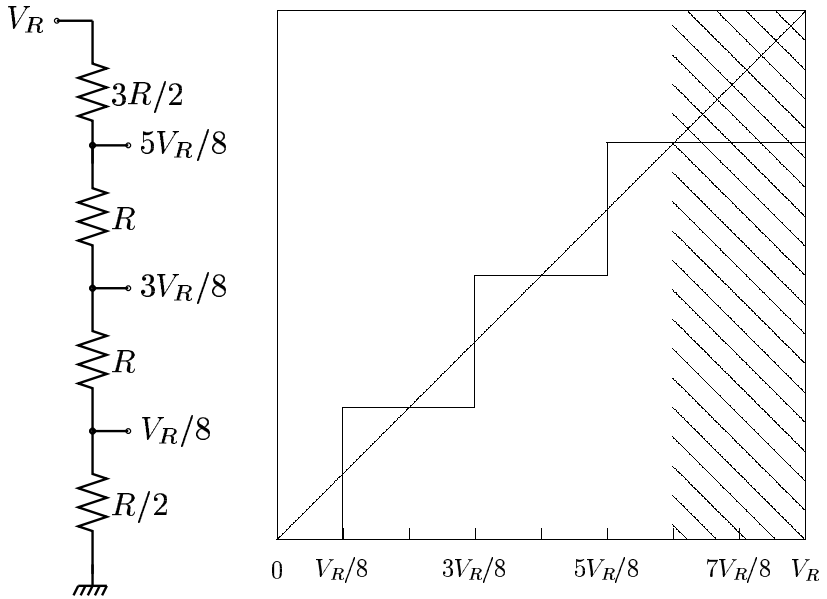
☹ complessità rapidamente crescente con N;

☺ veloce!

Esempi di Convertitori A-D

Convertitore flash: (partitore modificato)





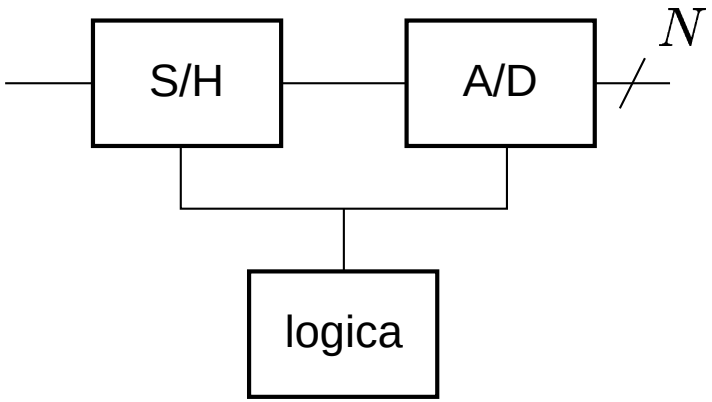
(Appunti)

– Modificando i valori delle resistenze è possibile ottenere la caratteristica “ideale”.

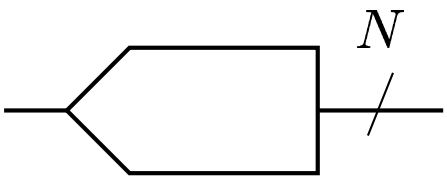
? come utilizzare <u>tutta</u> la dinamica d’ingresso $(0 \div V_R)$?

Conversione A-D

Architettura di un convertitore A-D:



(Simbolo)



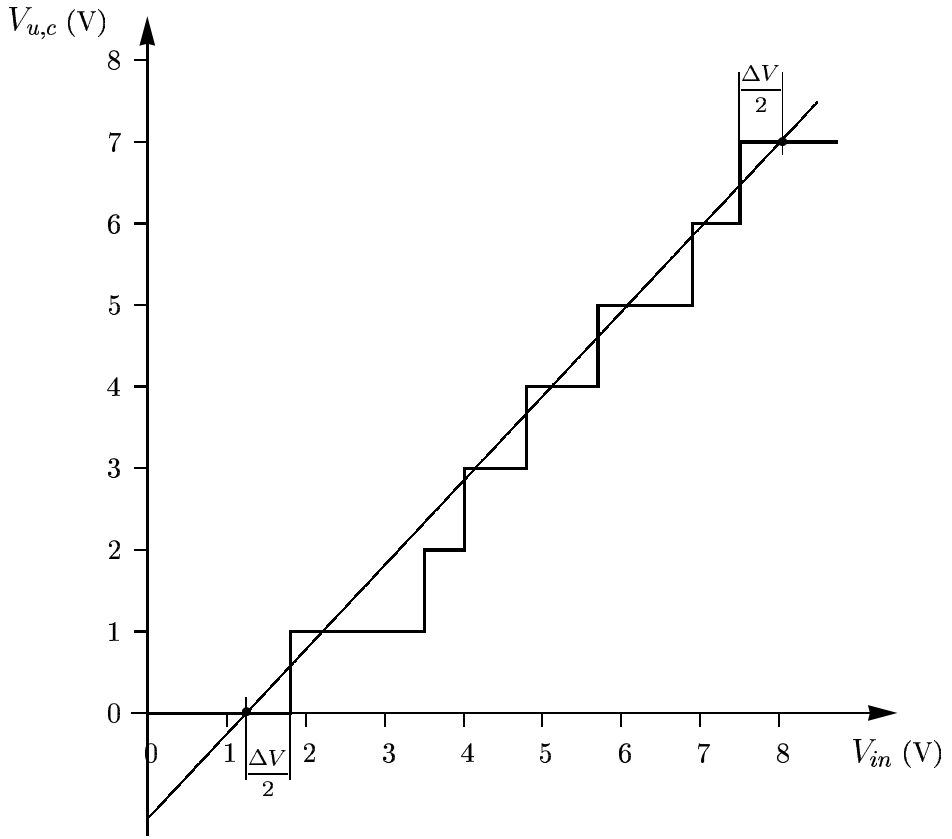
Caratteristiche:

1. Errore di quantizzazione ε_q;
2. Risoluzione $R = \dfrac{\Delta V}{V_M} = \dfrac{1}{2^N}$;
3. Velocità di conversione $10^3 \div 10^{10}$ Sa/sec;
4. Sensitività ΔV.

⚠ : generalmente Risoluzione e Velocità sono in contrasto

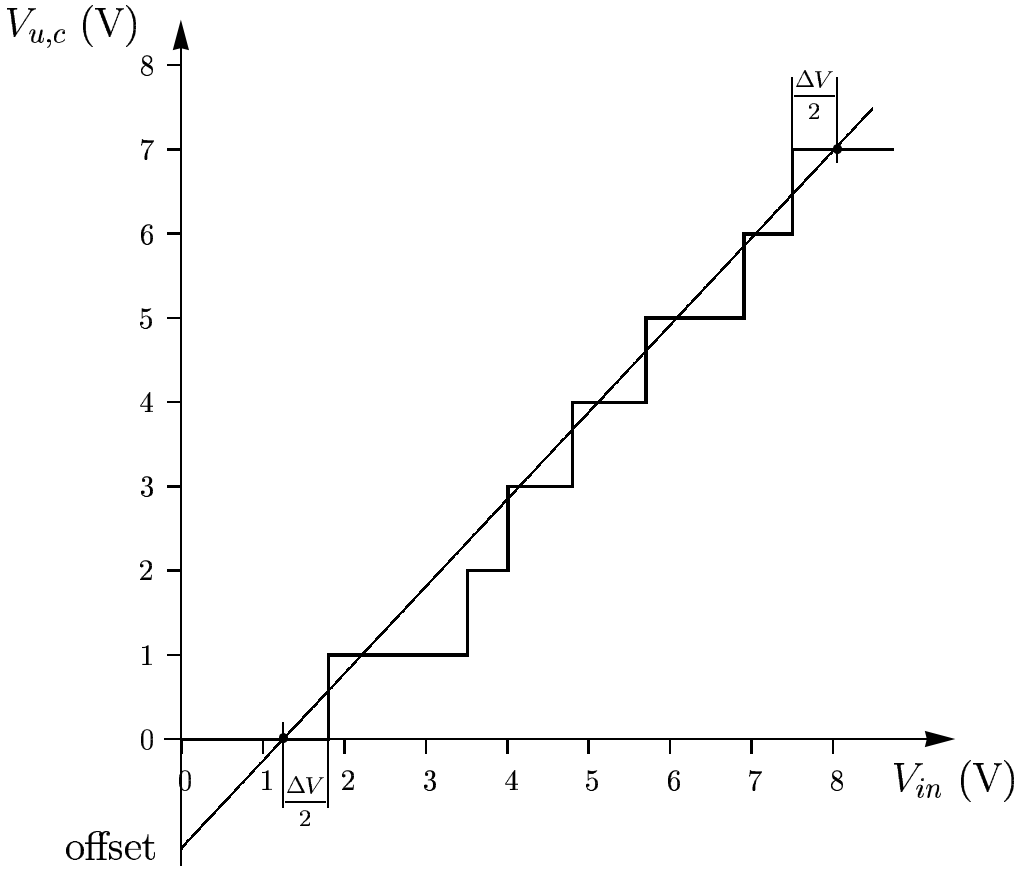
Caratterizzazione dei Convertitori A-D - Parametri statici

- **End point line:** congiunge i punti estremi della caratteristica, scelti a distanza $\Delta V/2$ dalla prima e dall'ultima transizione (esternamente).



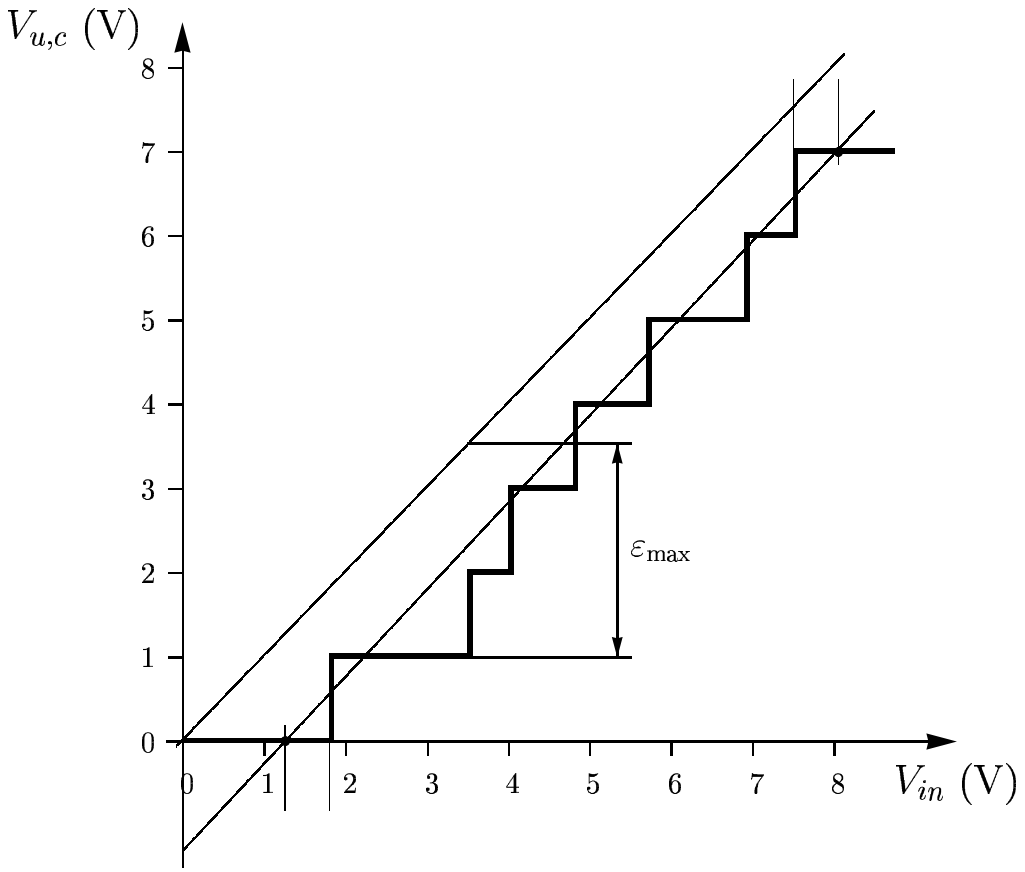
Caratterizzazione dei Convertitori A-D - Parametri statici

- **Offset:** intercetta della EPL sull'asse verticale;
- **Guadagno:** pendenza della EPL.



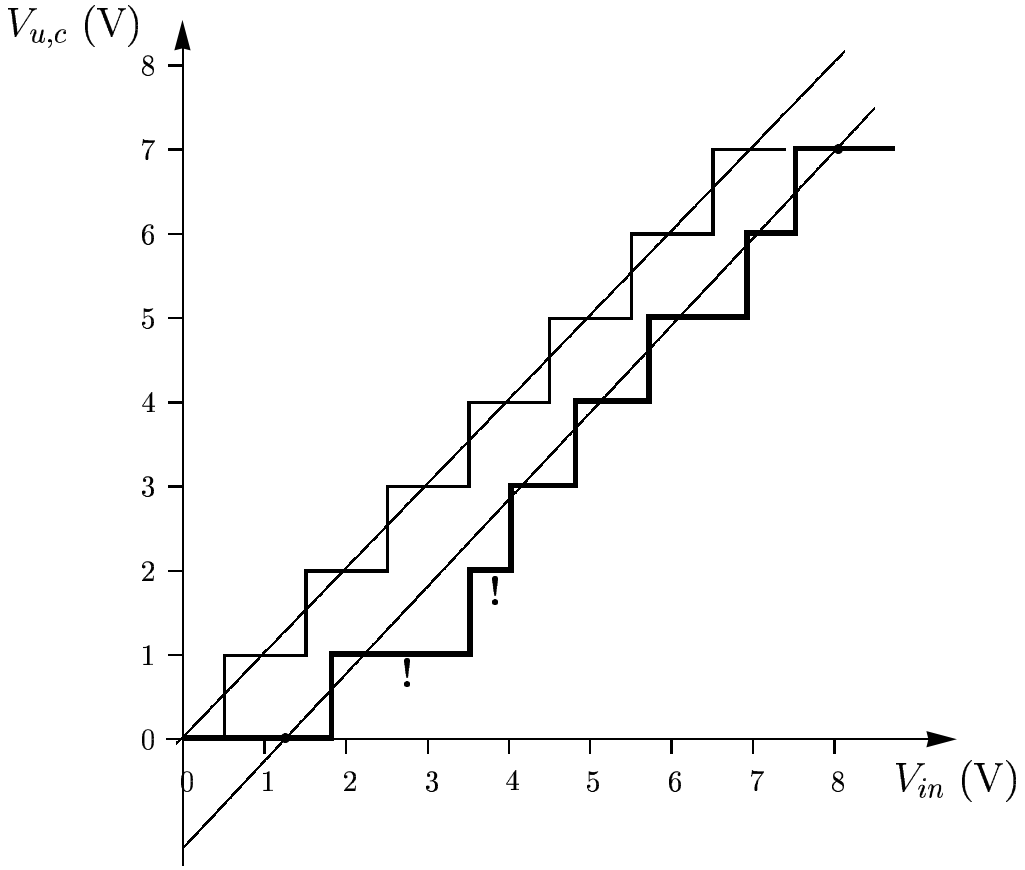
Caratterizzazione dei Convertitori A-D - Parametri statici

- **Errore massimo:** ($\varepsilon_{\max}$) distanza verticale massima tra la retta $V_{uc} = V_{in}$ e la caratteristica di trasferimento.



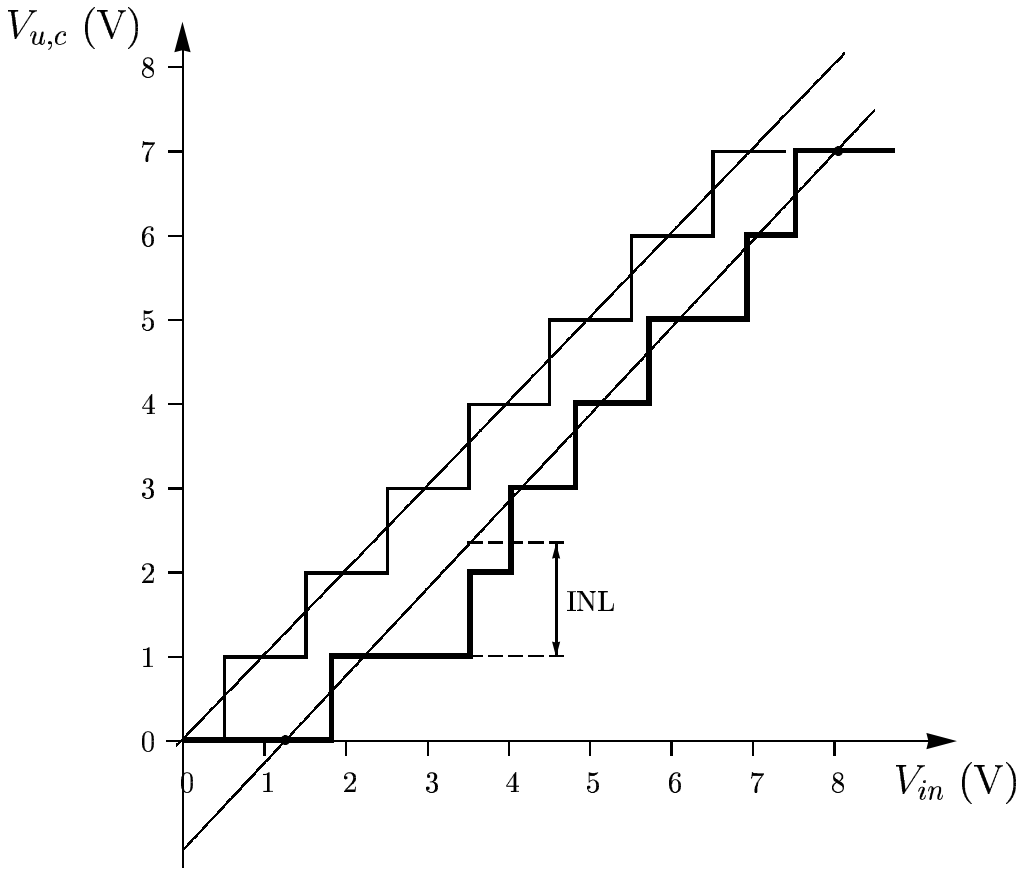
Caratterizzazione dei Convertitori A-D - Parametri statici

- **Non linearità differenziale:** (DNL) massima differenza di larghezza (orizzontale) tra i gradini della caratteristica di trasferimento reale e quelli della caratteristica ideale.



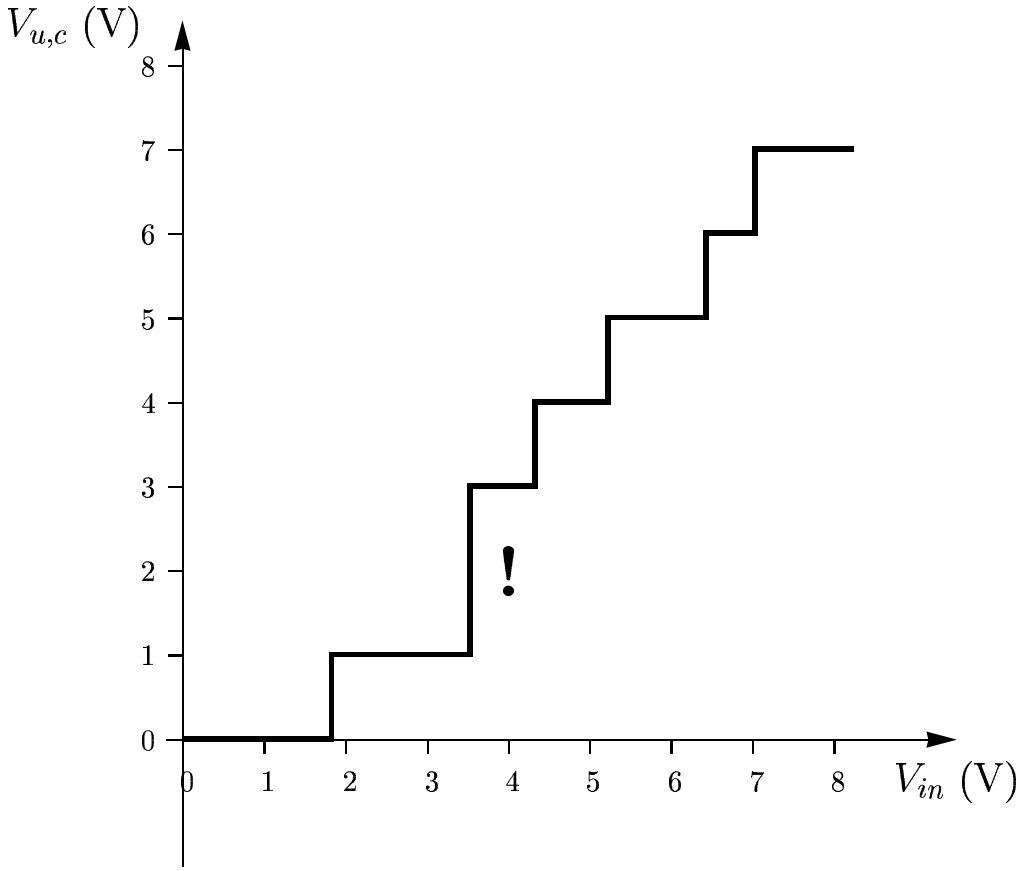
Caratterizzazione dei Convertitori A-D - Parametri statici

- **Non linearità integrale:** (INL) massima distanza verticale tra la caratteristica di trasferimento e la corrispondente EPL.



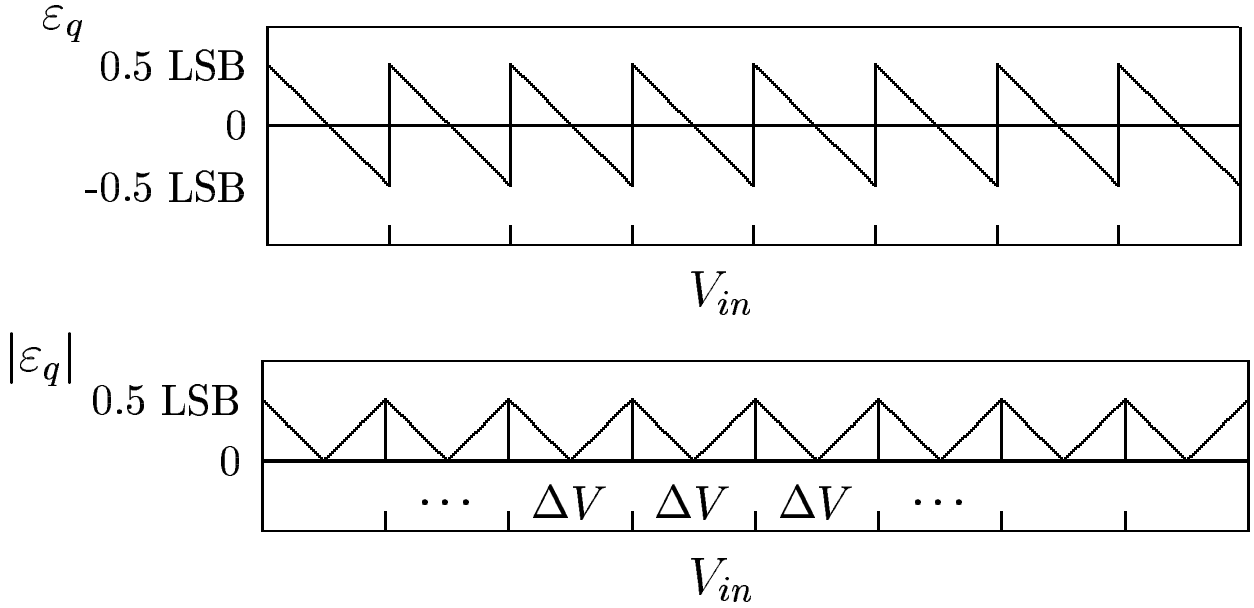
Caratterizzazione dei Convertitori A-D - Parametri statici

- **Codici mancanti:**



Caratterizzazione dei Convertitori A-D - Parametri dinamici

- **Rumore di quantizzazione**: valore quadratico medio dell'errore di quantizzazione nel caso in cui la V_{in} assuma con uguale probabilità tutti i valori compresi tra V_{MIN} e V_{MAX}.



$$|\varepsilon_q(V_{in})| = V_{in} \quad \text{per} \quad 0 < V_{in} < \Delta V/2$$

$$\overline{\varepsilon^2_{\mathrm{RMS}}} = \frac{2}{\Delta V}\int_0^{\Delta V/2}[\varepsilon(V_{in})]^2 d(V_{in}) = \frac{2}{\Delta V}\int_0^{\Delta V/2}(V_{in})^2 d(V_{in}) = \frac{\Delta V^2}{12}$$

Caratterizzazione dei Convertitori A-D - Parametri dinamici

- **Rapporto Segnale-Rumore**: per ingresso sinusoidale, di ampiezza tale da utilizzare tutta la dinamica d'ingresso:

$$v_i(t) = \frac{V_{MAX}}{2}[1 + \sin(\omega t)]$$

- Solo rumore di quantizzazione (e solo componente variabile del segnale):

$$\mathrm{SNR} = \frac{[v_s]^2_{\mathrm{RMS}}}{\varepsilon^2_{\mathrm{RMS}}} = \frac{V^2_{MAX}}{2 \cdot 4}\frac{12}{\Delta V^2} = \frac{V^2_{MAX}}{2 \cdot 4}\frac{12}{(V_{MAX}/2^N)^2} = \frac{3}{2}(2^N)^2$$

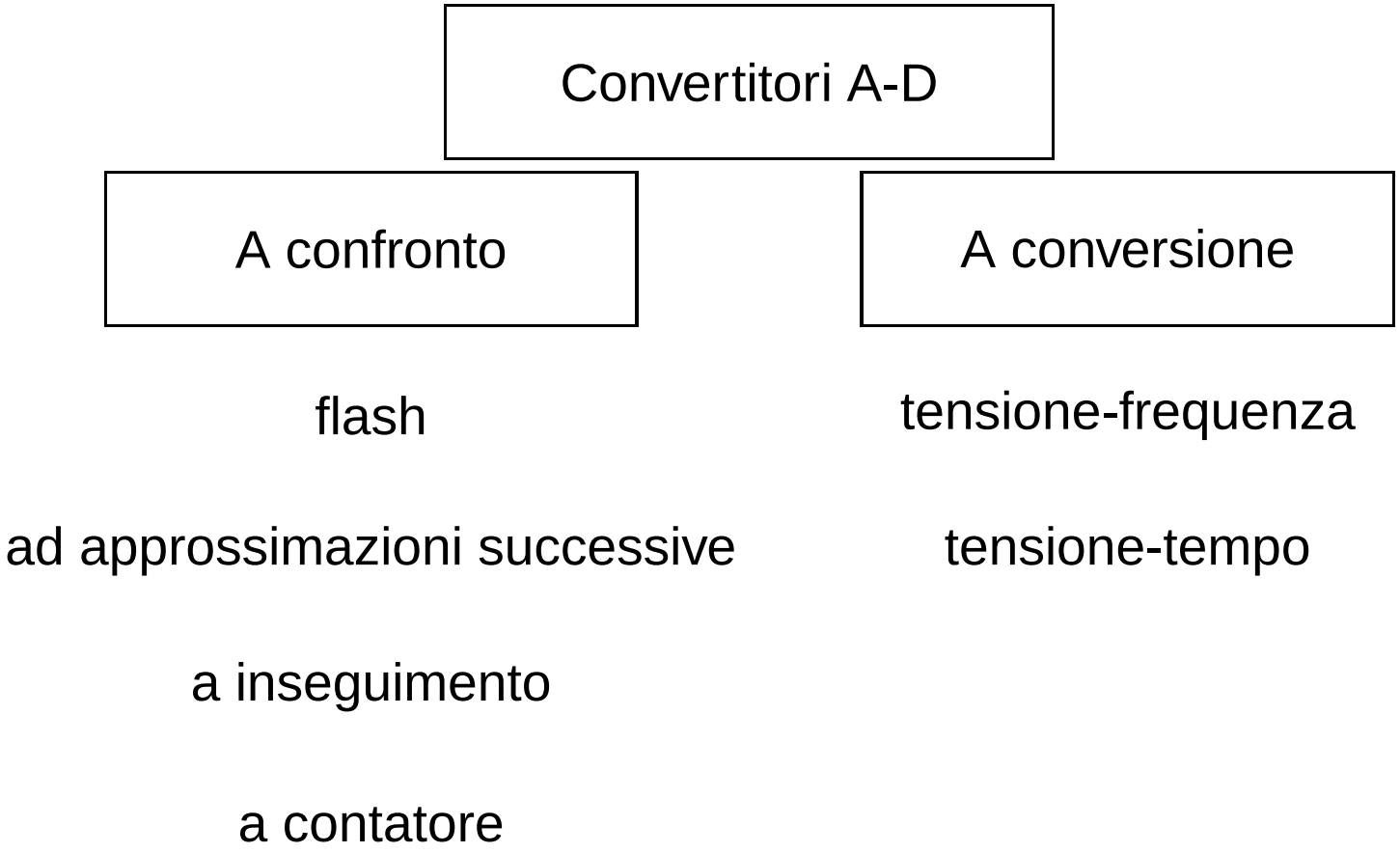
- Espresso in dB:

$$\mathrm{SNR}|_{\mathrm{dB}} = 10\log(\mathrm{SNR}) = 10\log\frac{3}{2} + 20N\log 2 = 1.76 + 6.02N \qquad [\mathrm{dB}]$$

⚠ Solo teorico: esistono altre sorgenti di rumore!

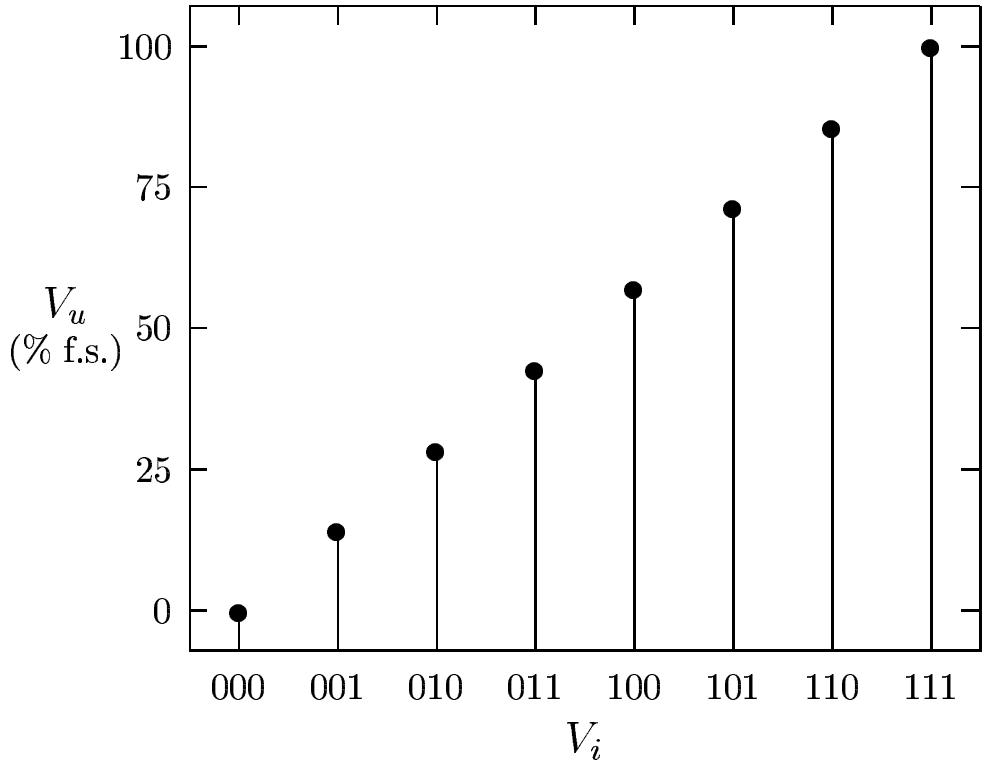
Convertitori A-D

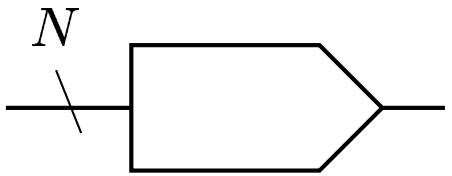
Classificazione:



Conversione Digitale-Analogico

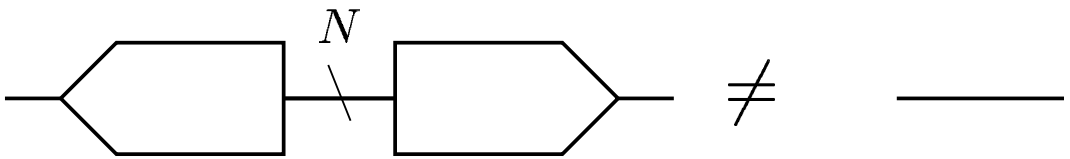
È concettualmente l'operazione inversa rispetto alla conversione A-D





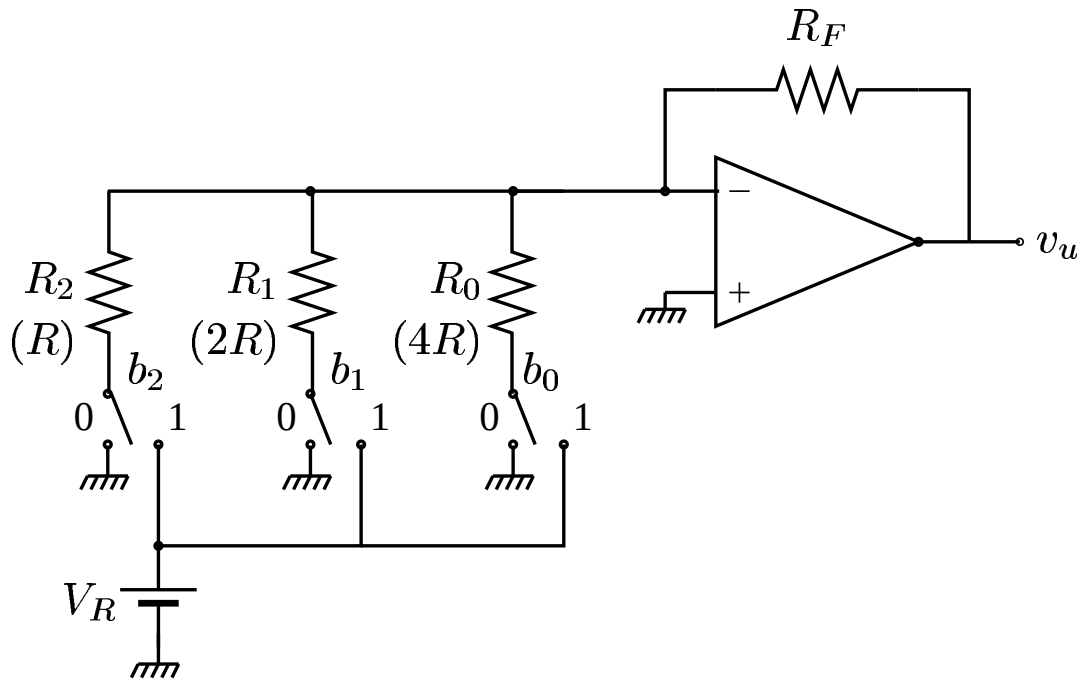
$$V_U = \frac{V_{REF}}{2^N}(b_{N-1}2^{N-1}+b_{N-2}2^{N-2}+\ldots+b_1 2+b_0), \quad 0 \le V_U \le V_{REF}\frac{2^N-1}{2^N}$$

⚠ :



Conversione D-A

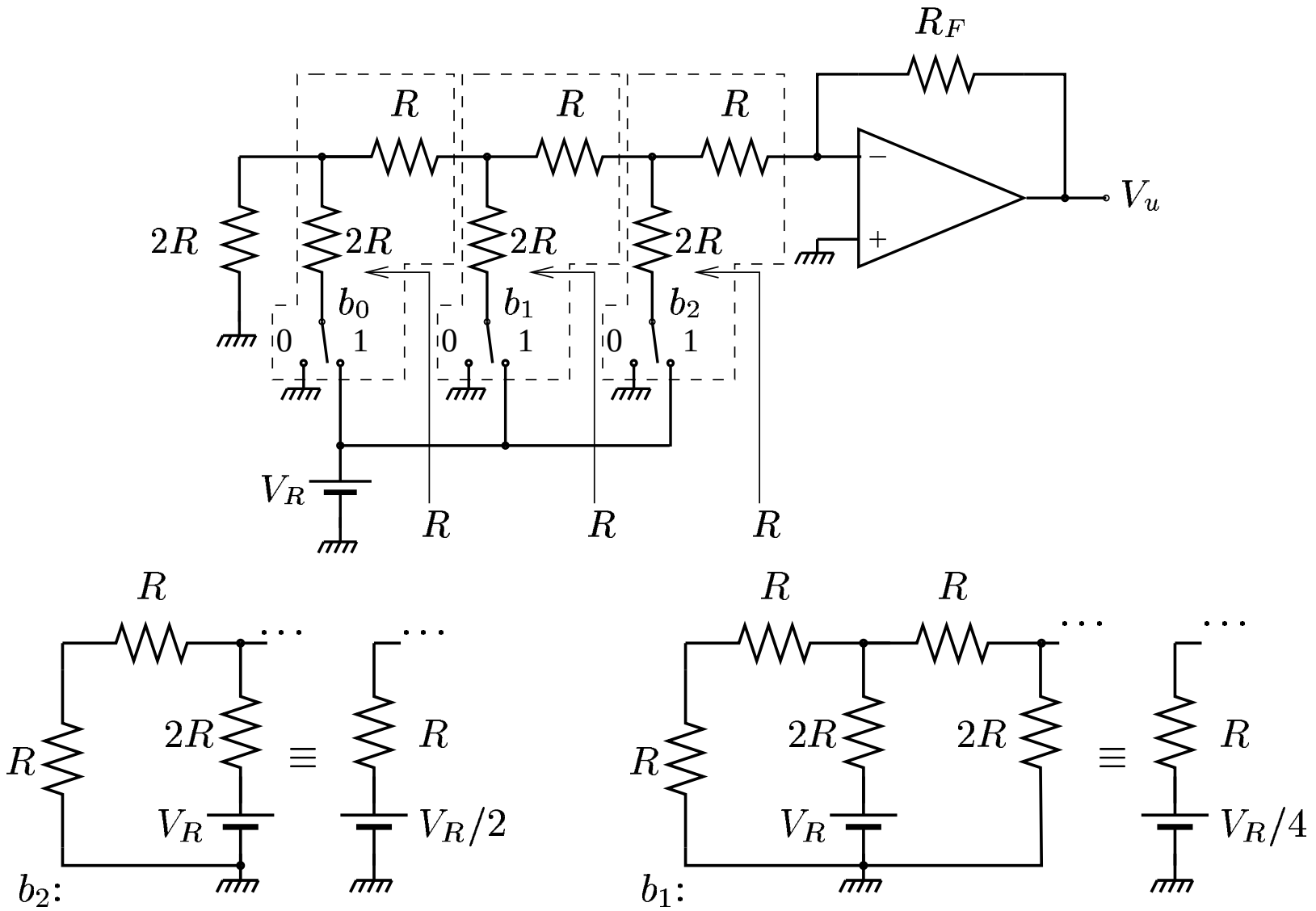
Convertitore a resistenze pesate



$$
\begin{aligned}
V_U &= -V_R \left(b_2 \frac{R_F}{R_2} + b_1 \frac{R_F}{R_1} + b_0 \frac{R_F}{R_0} \right) = -V_R \frac{R_F}{R} \left(b_2 + b_1 \frac{1}{2} + b_0 \frac{1}{4} \right) \\
&= -V_R \frac{R_F}{4R} \left(4b_2 + 2b_1 + b_0 \right) \qquad \text{(ampl. invertente)}
\end{aligned}
$$

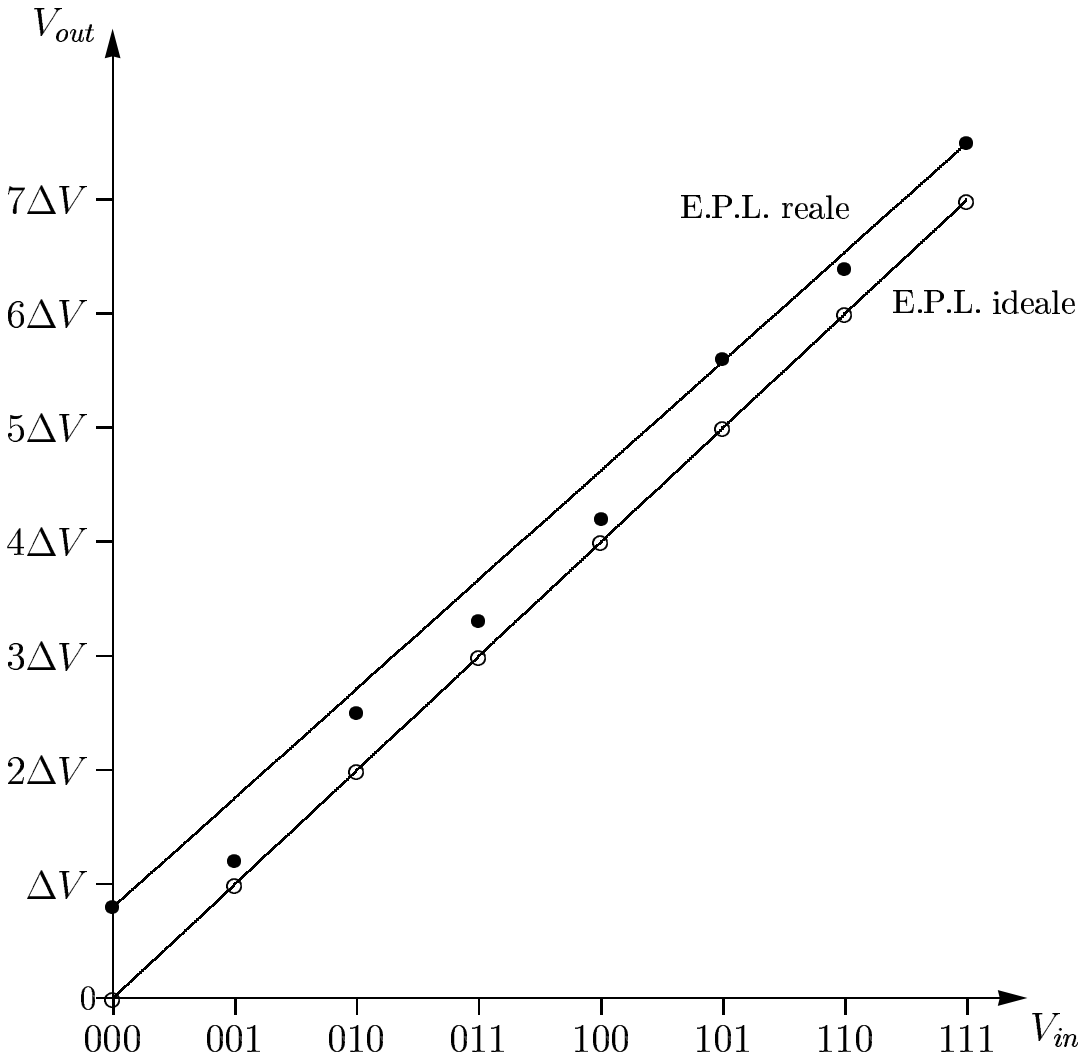
Conversione D-A

Convertitore *ladder* (o R-2R)



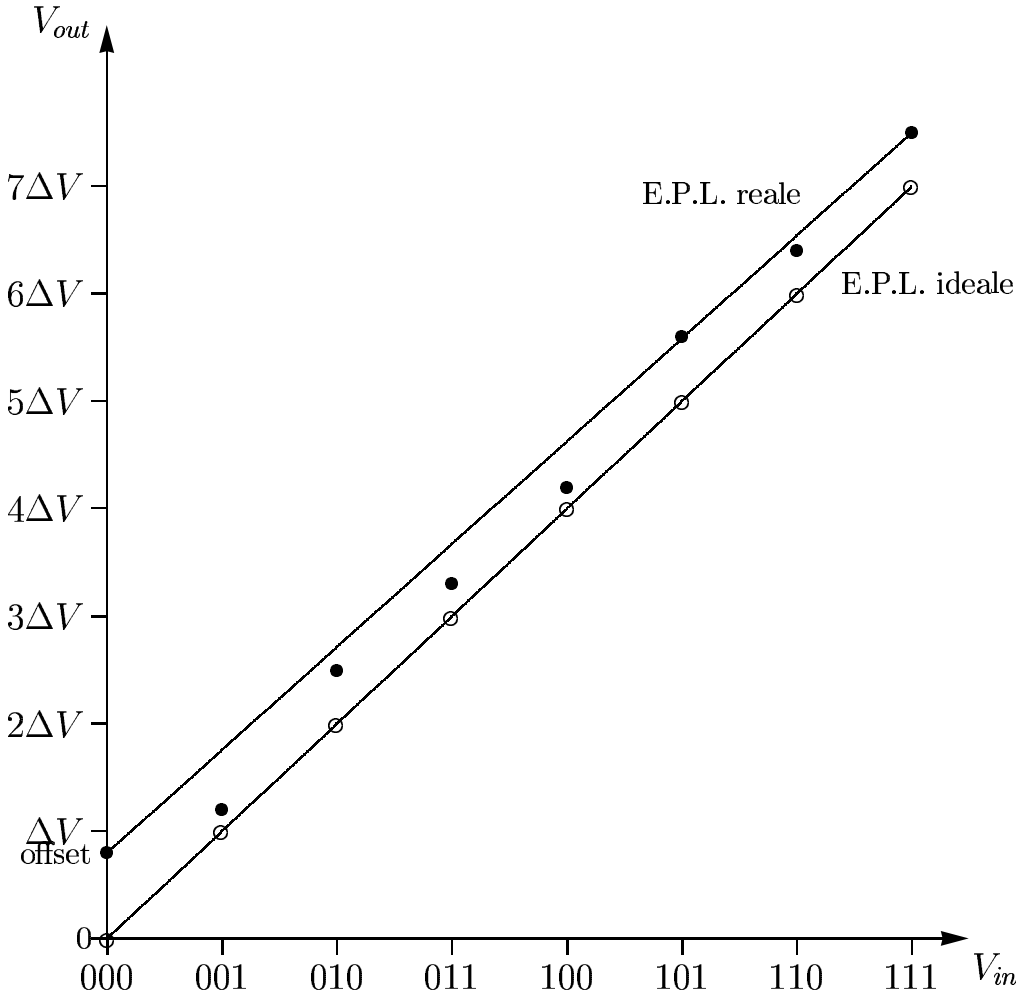
Caratterizzazione dei Convertitori D-A - Parametri statici

- **End point line:** congiunge i punti estremi della caratteristica.



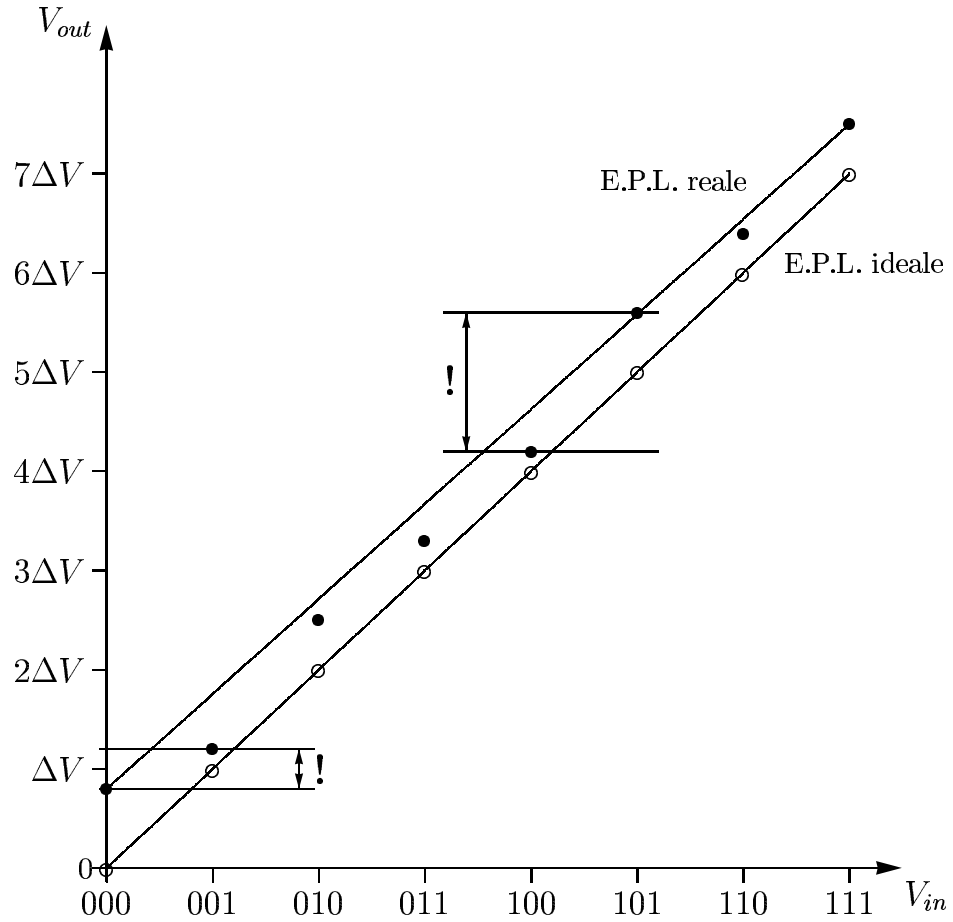
Caratterizzazione dei Convertitori D-A - Parametri statici

- **Offset:** intercetta della EPL sull'asse verticale;
- **Guadagno:** pendenza della EPL (errore di guadagno).



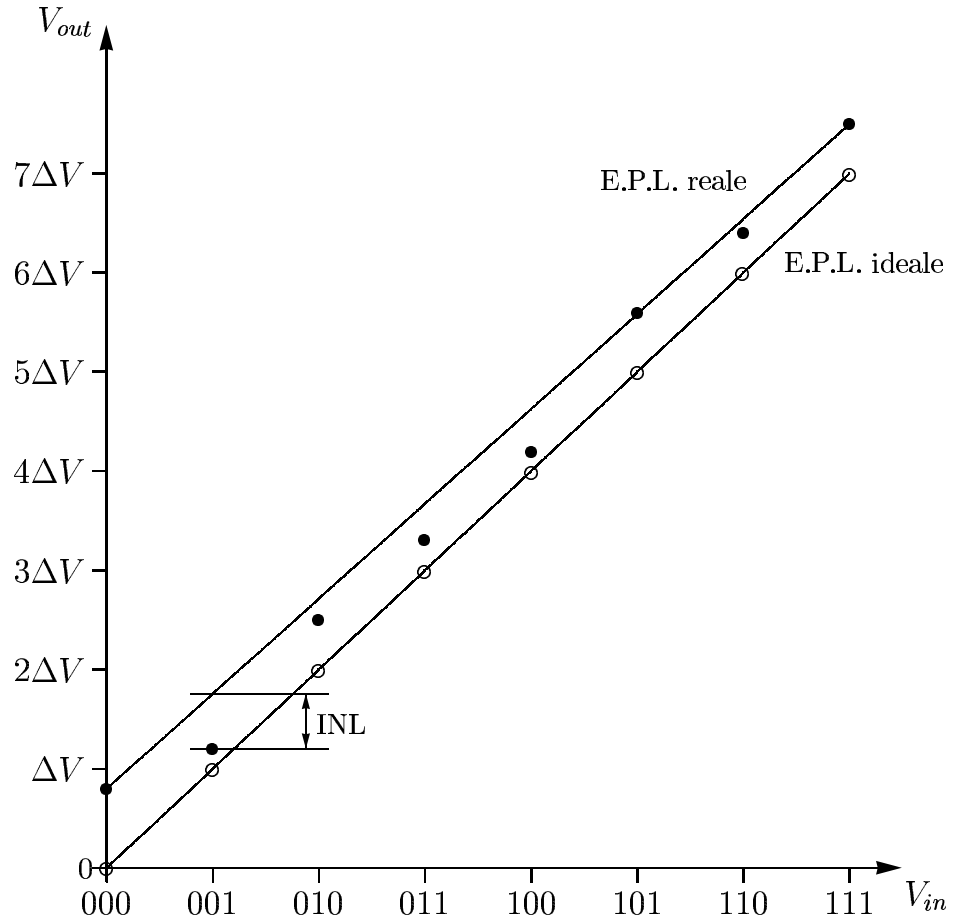
Caratterizzazione dei Convertitori D-A - Parametri statici

- **Non linearità differenziale:** (DNL) massimo scostamento, rispetto al caso ideale (quindi rispetto a ΔV) della variazione della tensione d'uscita relativa al salto tra due codici d'ingresso consecutivi; generalmente espresso in LSB ($\Delta V = 1$ LSB).



Caratterizzazione dei Convertitori D-A - Parametri statici

- **Non linearità integrale:** (INL) massima tra le distanze verticali tra ogni punto della caratteristica reale e la EPL (reale); generalmente espressa in LSB



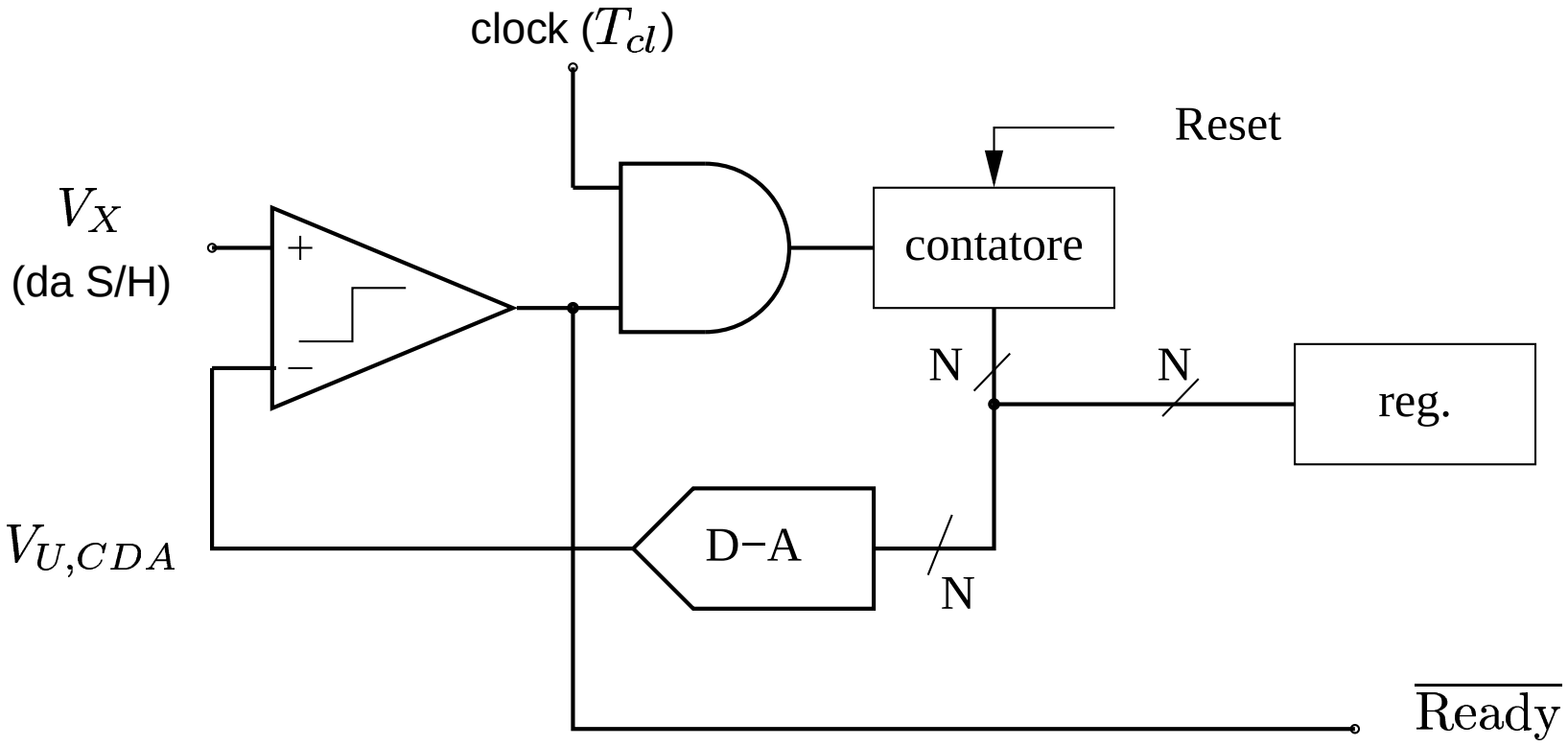
Caratterizzazione dei Convertitori D-A - Parametri dinamici

- **Tempo di assestamento**: tempo necessario all'uscita per stabilizzarsi in seguito alla transizione peggiore possibile (da $[0, \ldots, 0]$ a $[1, \ldots, 1]$);
- **Glitch**: possibilità che in seguito alla variazione della configurazione in ingresso, l'uscita assuma valori diversi (corrispondenti ad altre configurazioni) prima di andare a regime.

⚠ il valore dei parametri statici e dinamici è generalmente influenzato dalla tensione di riferimento (V_R).

Convertitori a confronto

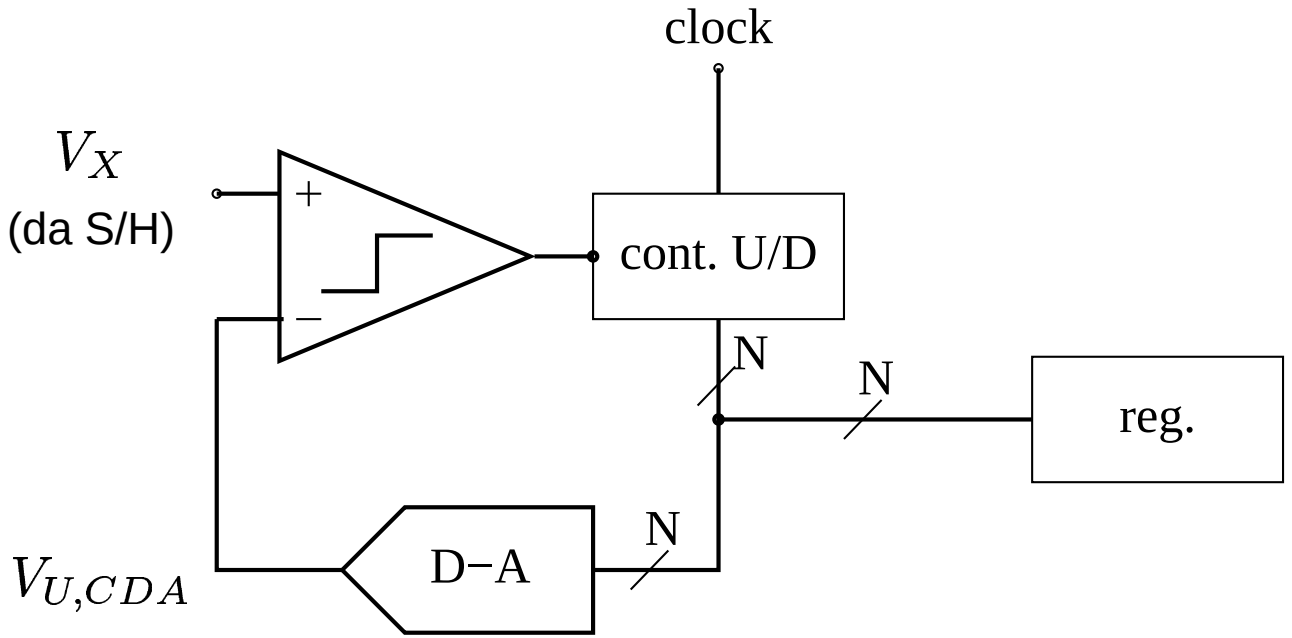
Convertitore a contatore



- tempo di conversione dipendente dal valore della tensione V_X
- $T_{\text{conv,max}} = 2^N T_{cl}$
- $f_{\max} \simeq 10\text{kSa/s}$.

Convertitori a confronto

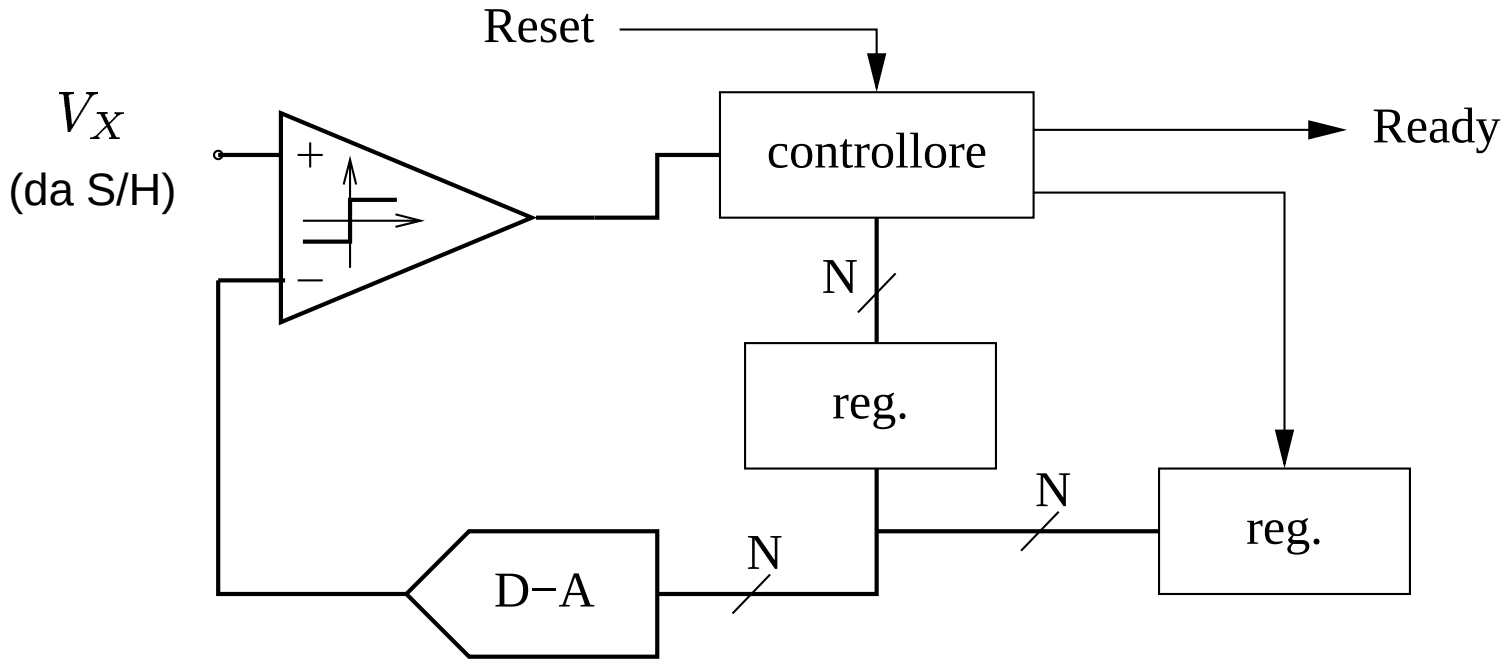
Convertitore a inseguimento (*tracking*)

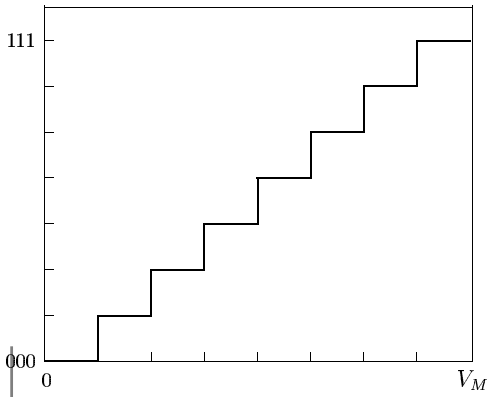


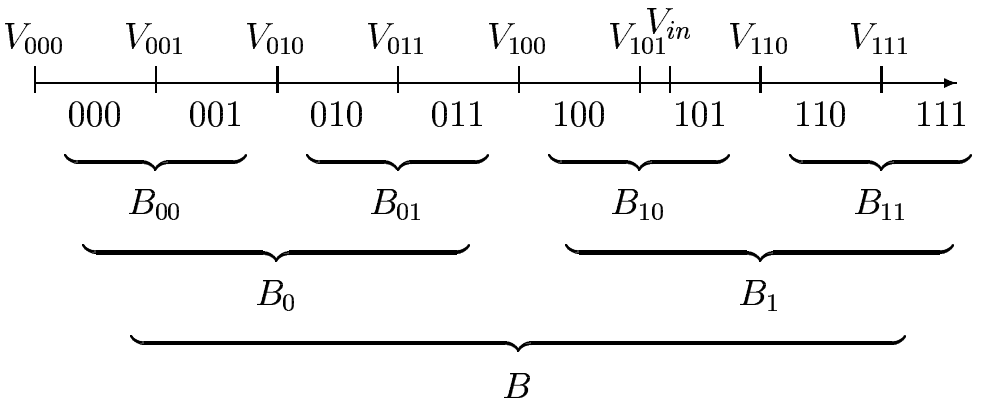
- tempo di conversione dipendente dalla differenza tra il valore della tensione V_X e il valore precedente

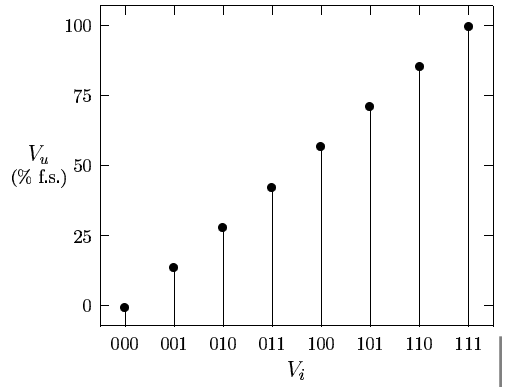
Convertitori a confronto

Convertitore ad approssimazioni successive



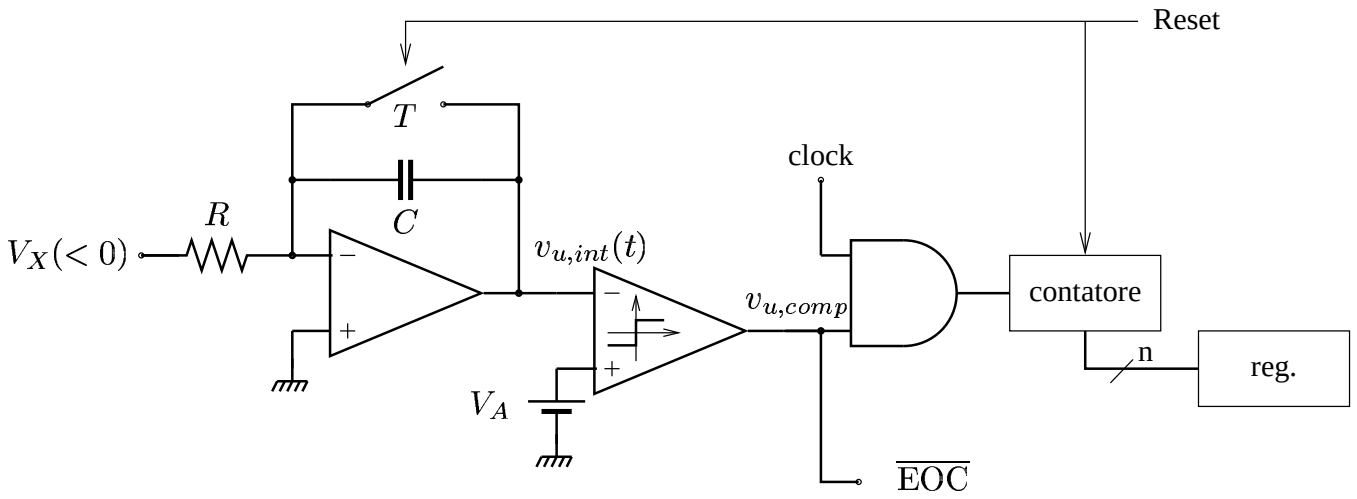


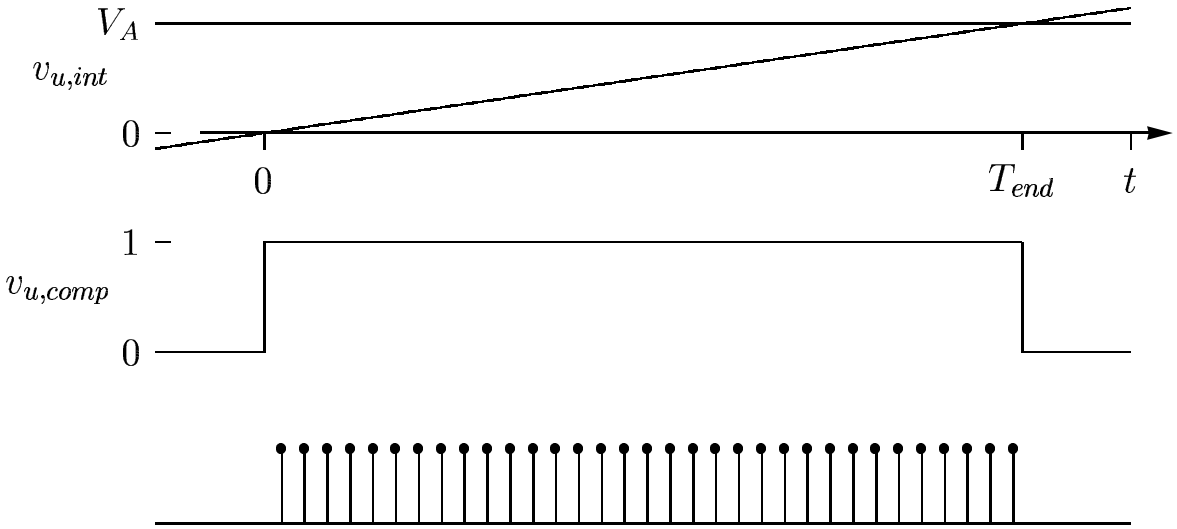




Altri convertitori A-D

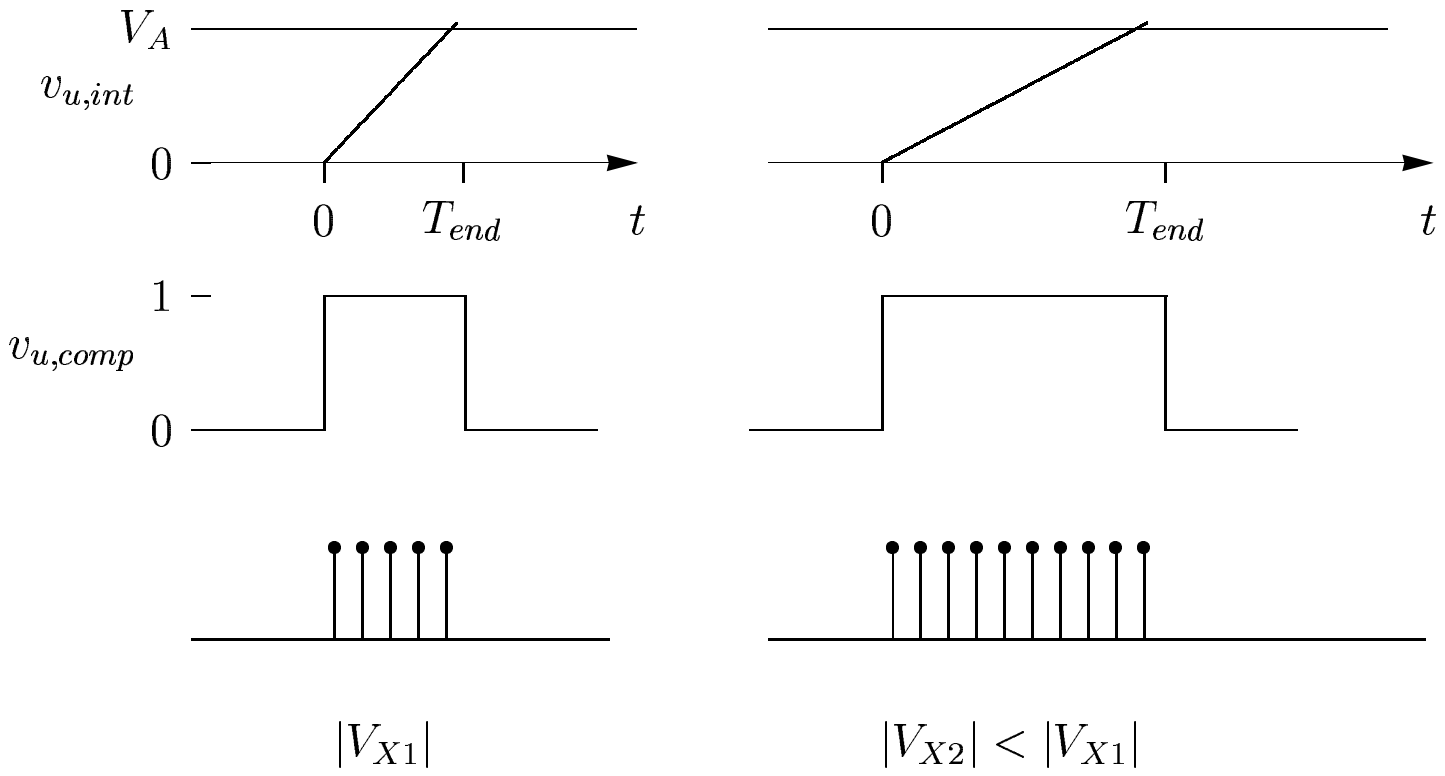
Convertitore integratore a singola rampa





$$T_{end} = \frac{V_A}{|V_X|} RC$$

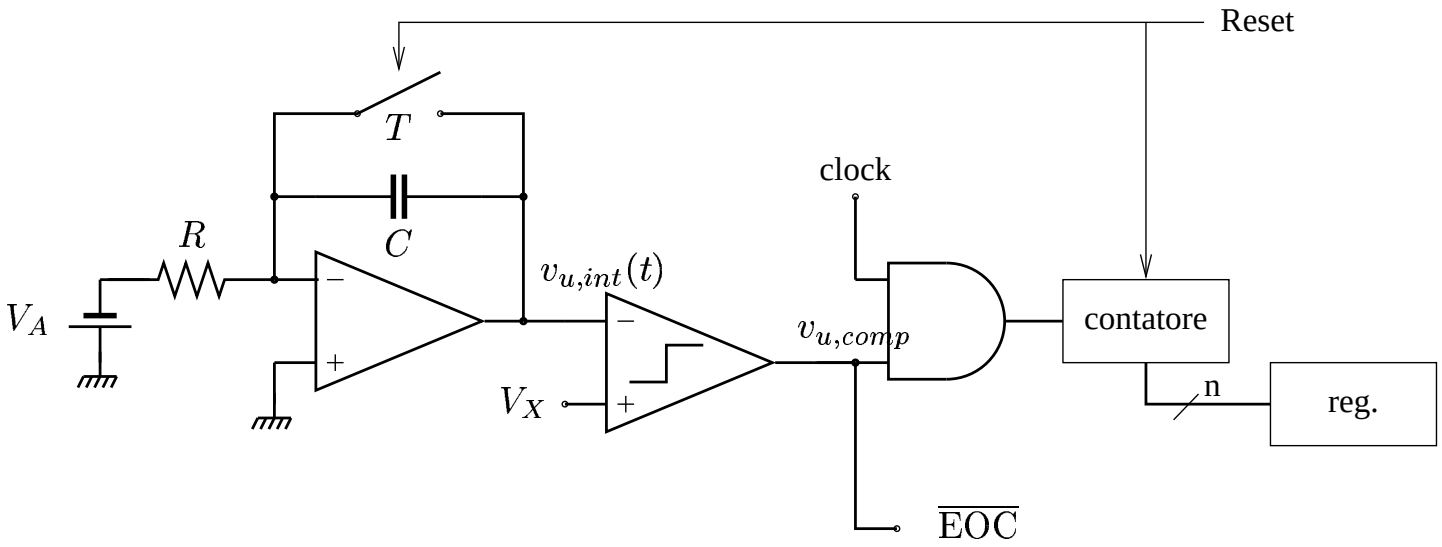
Convertitore a singola rampa

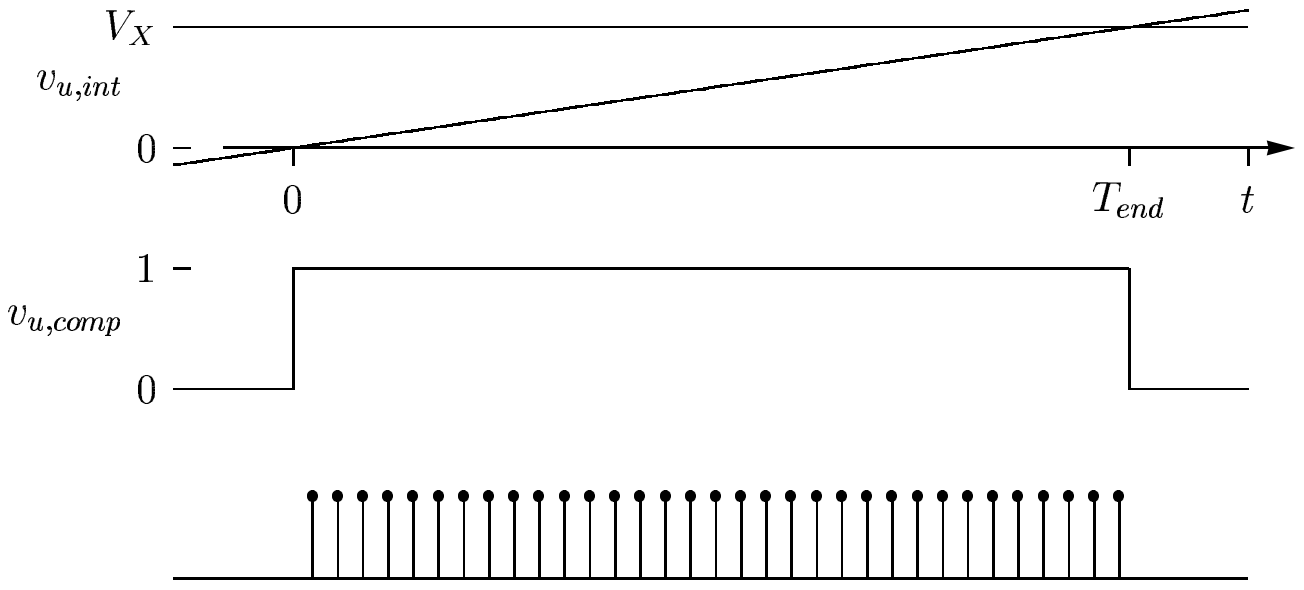


max tensione: $T_{end} = \dfrac{V_A}{|V_X|} RC = T_{cl} \quad \Rightarrow \quad |V_X| = \dfrac{V_A}{T_{cl}} RC$

min tensione: $T_{end} = \dfrac{V_A}{|V_X|} RC = (2^N - 1) T_{cl} \Rightarrow \quad |V_X| = \dfrac{V_A}{(2^N - 1) T_{cl}} RC$

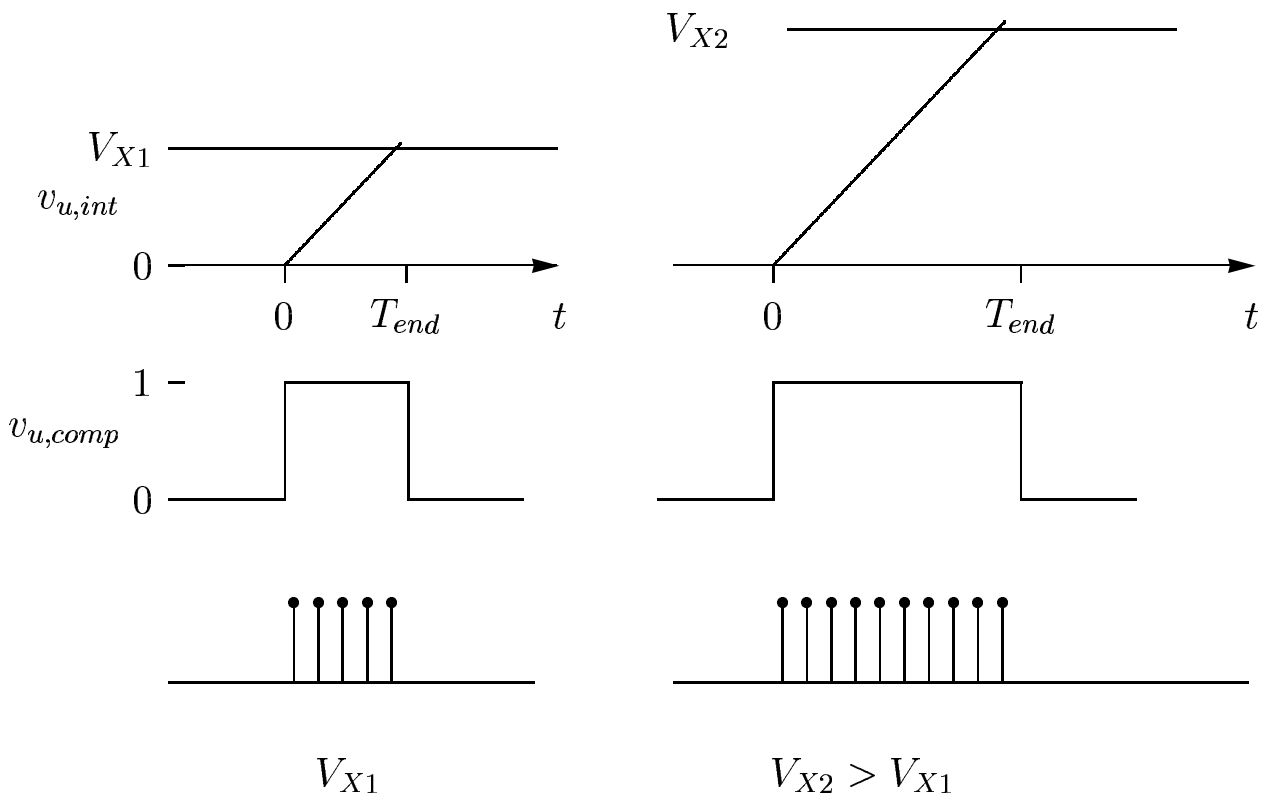
Convertitore a singola rampa (2)





$$T_{end} = \frac{V_X}{|V_A|} RC$$

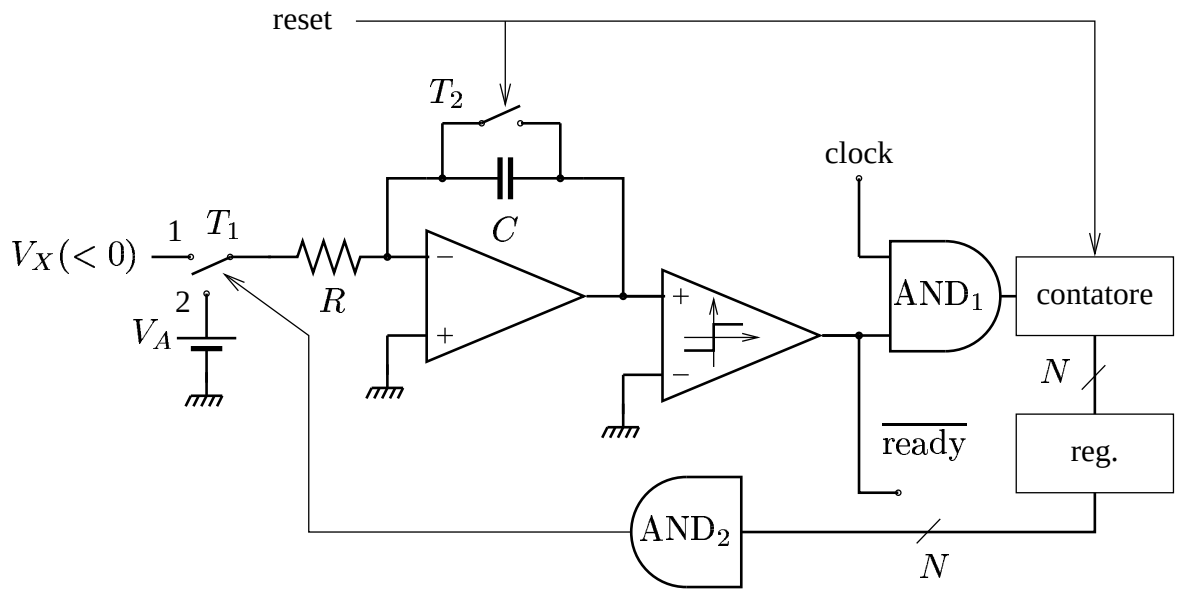
Convertitore a singola rampa (2)

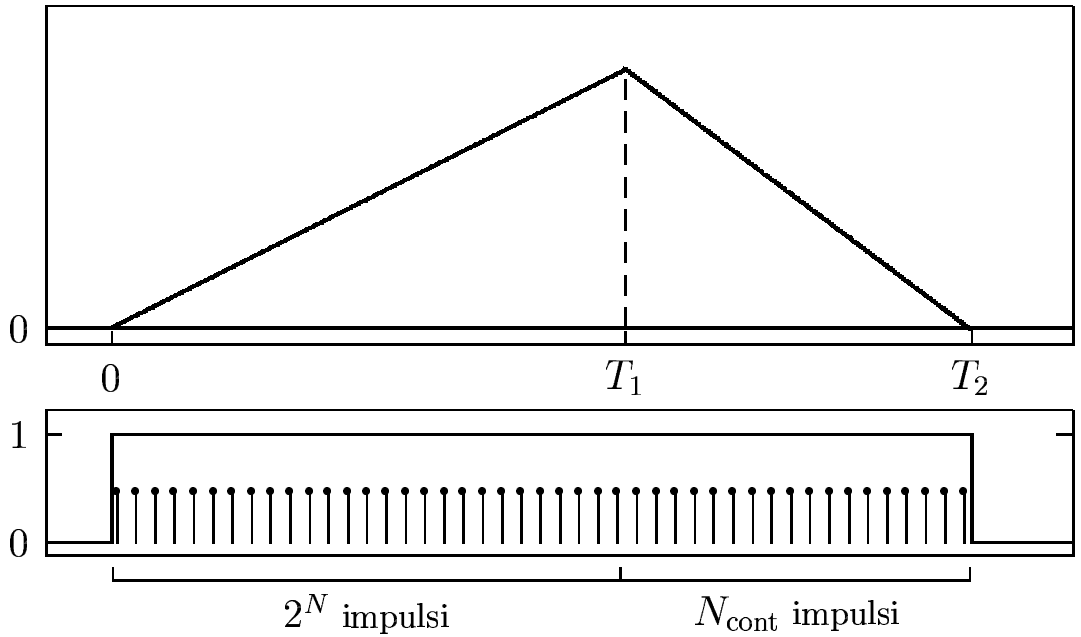


min tensione: $T_{end} = \frac{V_X}{V_A} RC = T_{cl} \quad \Rightarrow V_X = \frac{T_{cl}}{RC} V_A$

max tensione: $T_{end} = \frac{V_X}{V_A} RC = (2^N - 1) T_{cl} \quad \Rightarrow V_X = \frac{(2^N - 1) T_{cl}}{RC} V_A$

Convertitore a doppia rampa



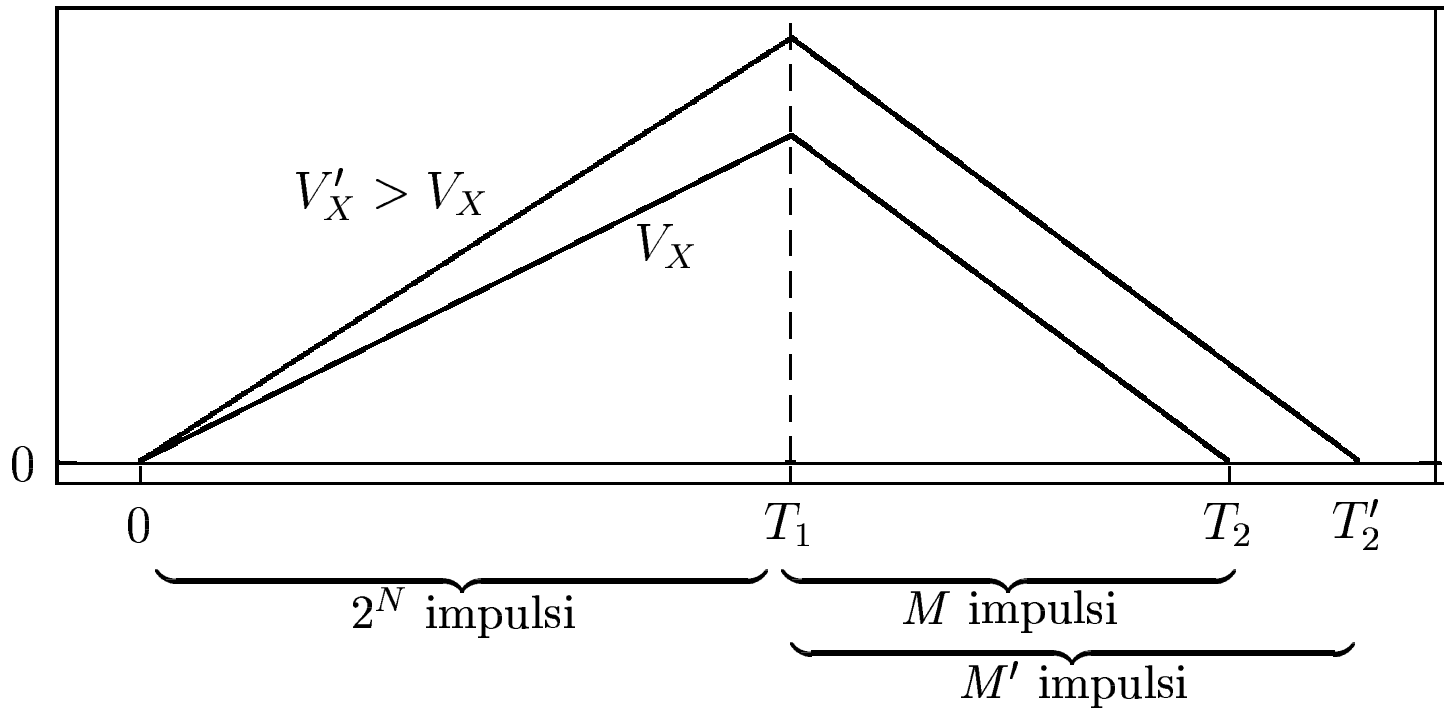


$$v_u = \frac{|V_X|}{RC}t, V_U(T_1) = \frac{|V_X|}{RC}2^N T_{cl}$$

$$v_u = V_U(T_1) - \frac{V_A}{RC}(t - T_1) = 0$$

$$\rightarrow T_2 - T_1 = \frac{|V_X|}{V_A}2^N T_{cl}$$

Convertitore a doppia rampa

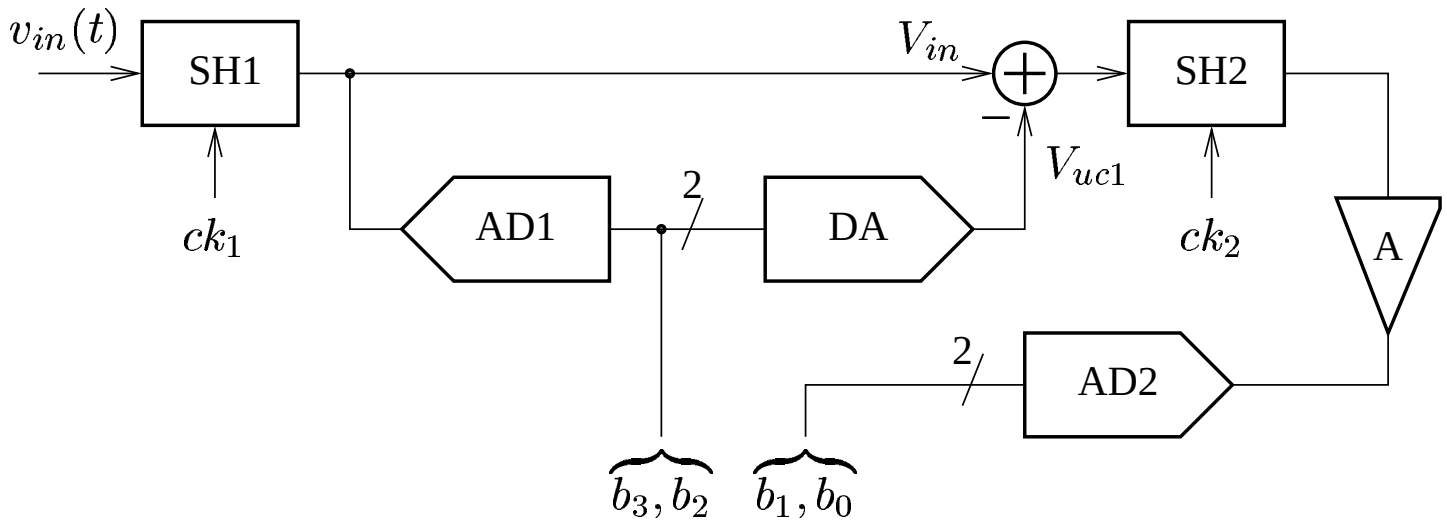


$$T_1 = 2^N T_{cl}, \quad V(t) = \frac{V_X}{RC} t \quad (t < T_1), \qquad V(t) = V(T_1) - \frac{V_A}{RC}(t - T_1) \quad (t > T_1)$$

$$V_X: \quad V(T_1) = \frac{V_X}{RC} 2^N T_{cl}, \quad V(T_2) = 0 \Rightarrow T_2 - T_1 = \frac{V_X}{V_A} 2^N T_{cl}, \quad M = \frac{V_X}{V_A} 2^N$$

$$V'_X: \quad V(T_1) = \frac{V'_X}{RC} 2^N T_{cl}, \quad V(T_2) = 0 \Rightarrow T'_2 - T_1 = \frac{V'_X}{V_A} 2^N T_{cl}, \quad M' = \frac{V'_X}{V_A} 2^N$$

Architettura flash-pipeline



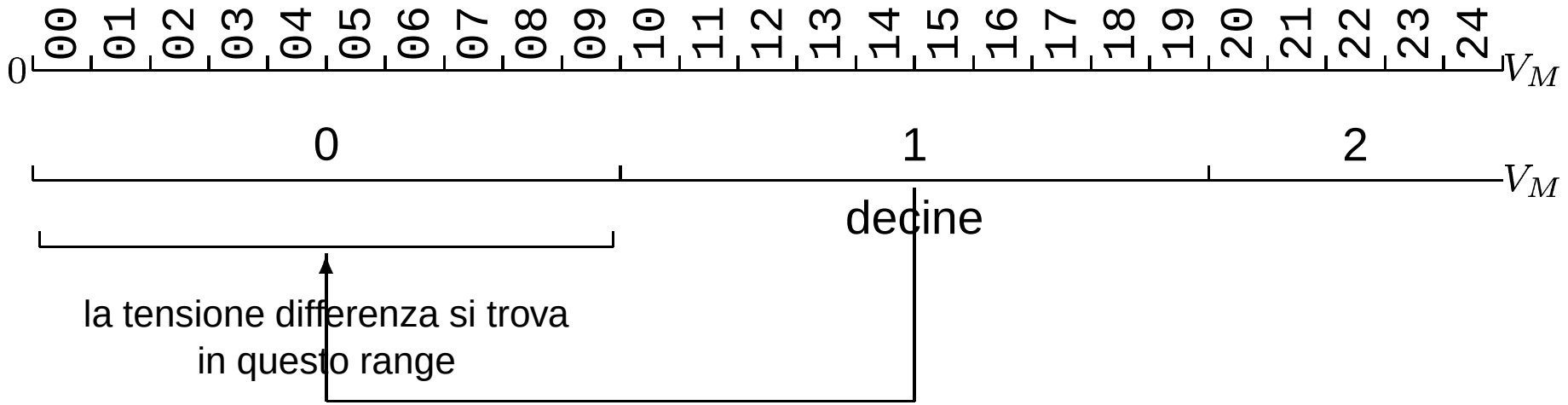
- necessità di sincronizzare le due conversioni A-D;
- *tempo di latenza* (pressoché) doppio rispetto al conv. monostadio;
- possibilià di lavorare in *pipeline*;

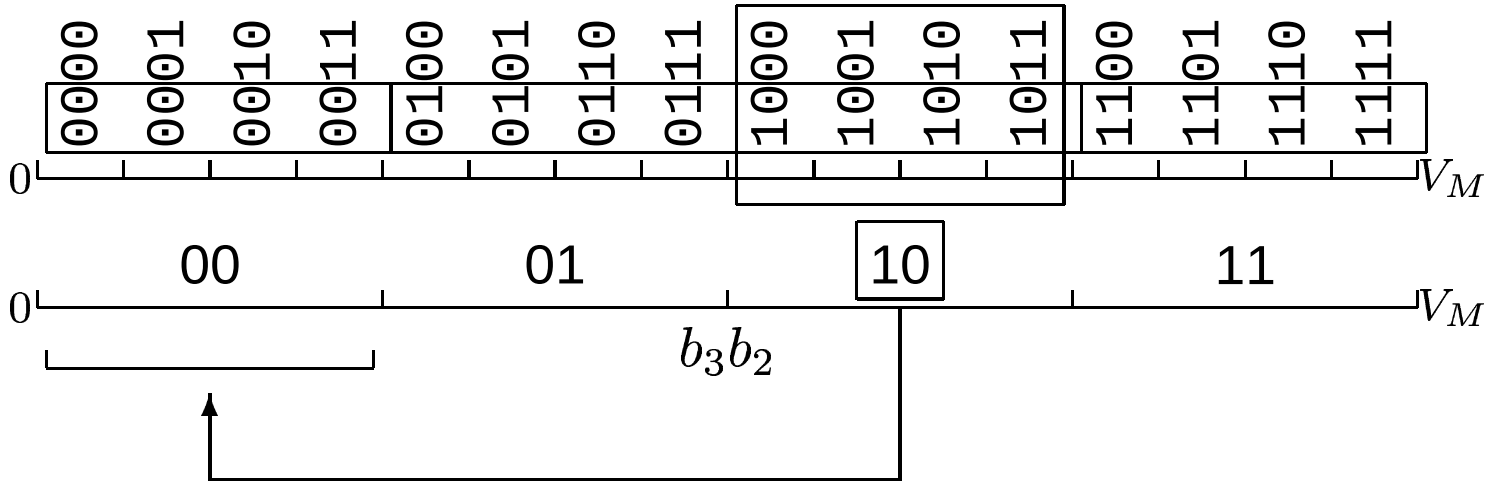
$\Rightarrow$ *throughput* come nel caso monostadio;

- amplificatore: per utilizzare convertitori A-D con stessa dinamica.

Convertitore flash-pipeline

Principio di funzionamento





Convertitori A-D

Altre caratteristiche:

- rumore termico (in realtà non solo termico):

  con ingresso costante ($V_M/2$) l'uscita varia!

  statistica gaussiana, costruttore fornisce σ

- SINAD: SIgnal to Noise And Distortion (invece che SNR):

  sinusoide in ingresso $\rightarrow$ spettro dell'uscita (v.figura)

$$\text{SINAD}=\frac{V_{s,eff}}{\sqrt{P_{D,5}+P_n}}$$

- Numero di bit efficaci (Effective Number Of Bits, ENOB);

  numero di bit di un convertitore con solo errore di quantizzazione e SNR pari a SINAD

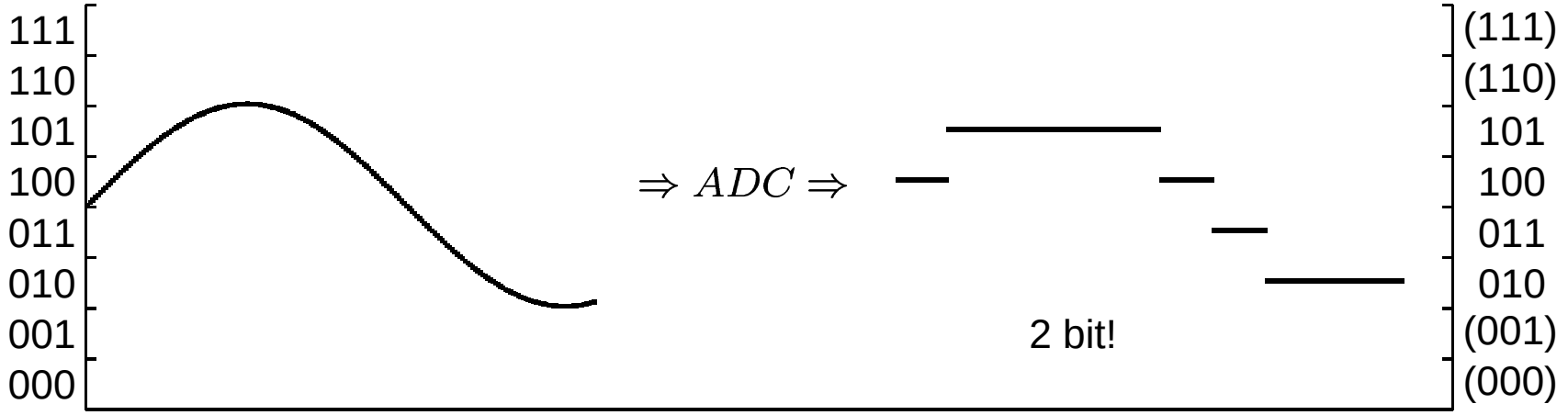
$$\text{SINAD}= 1.76 + 6.02 \text{ ENOB}$$

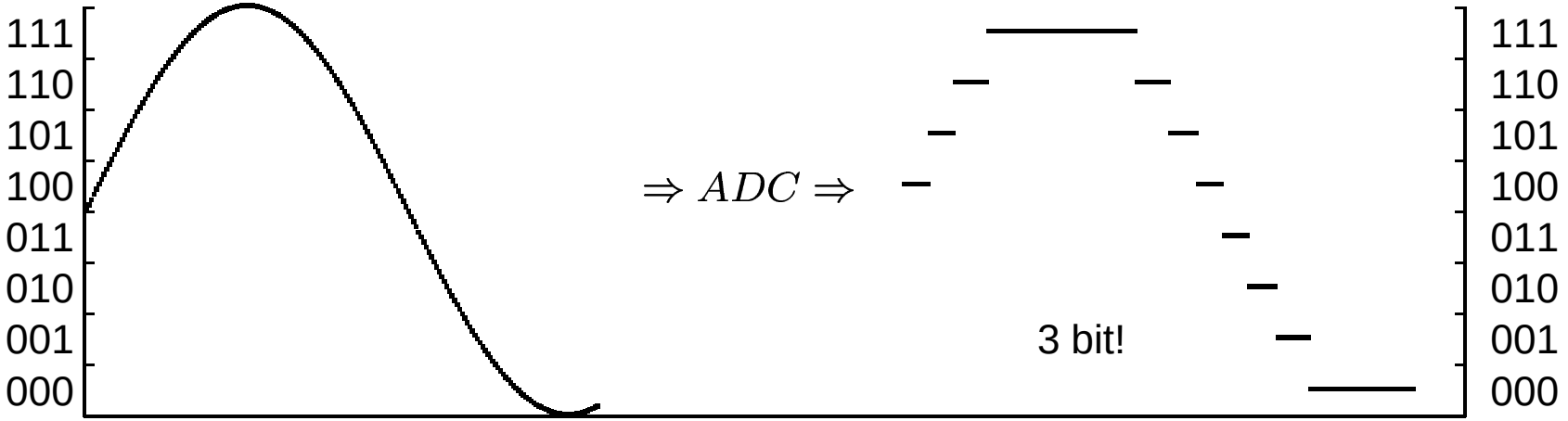
- Range dinamico.

Conversione A-D e D-A

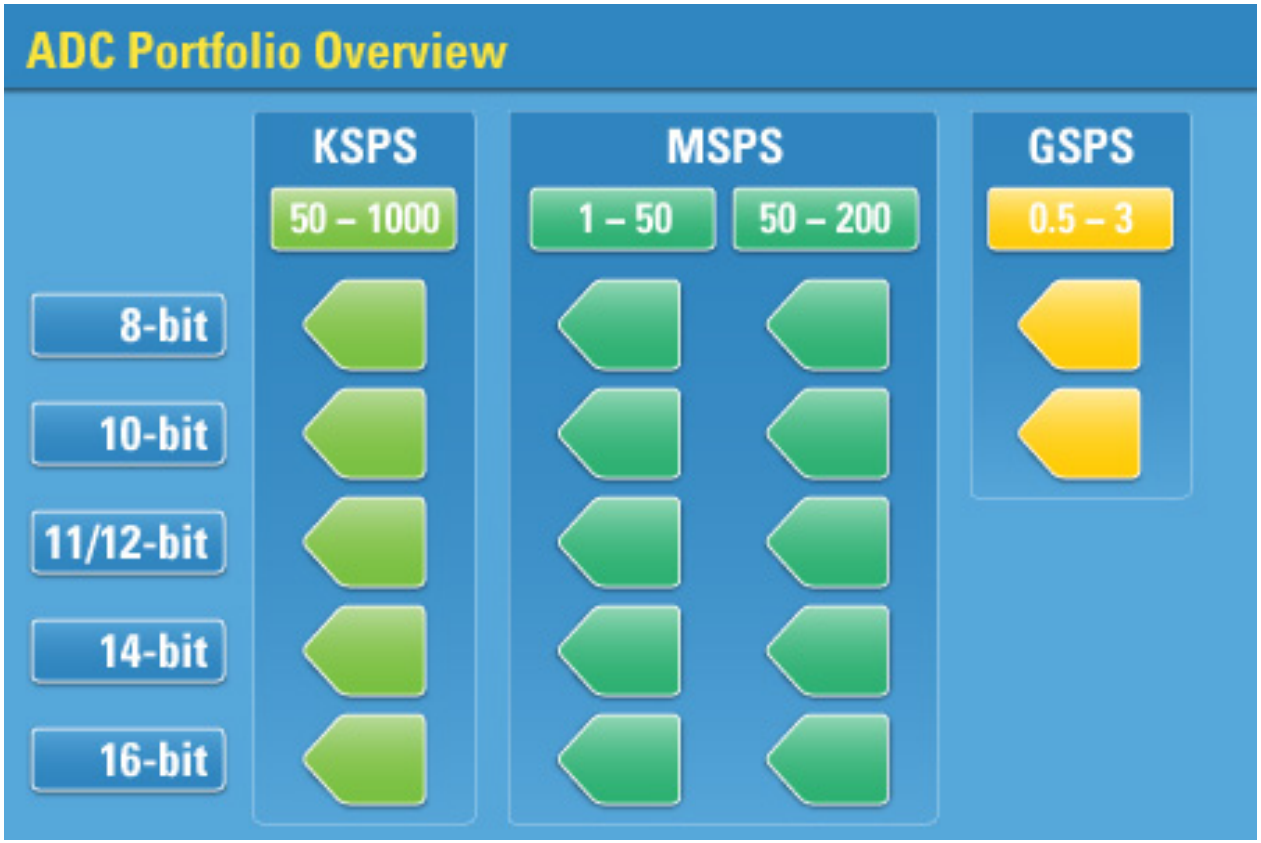
Altre considerazioni

- adattamento di dinamica;





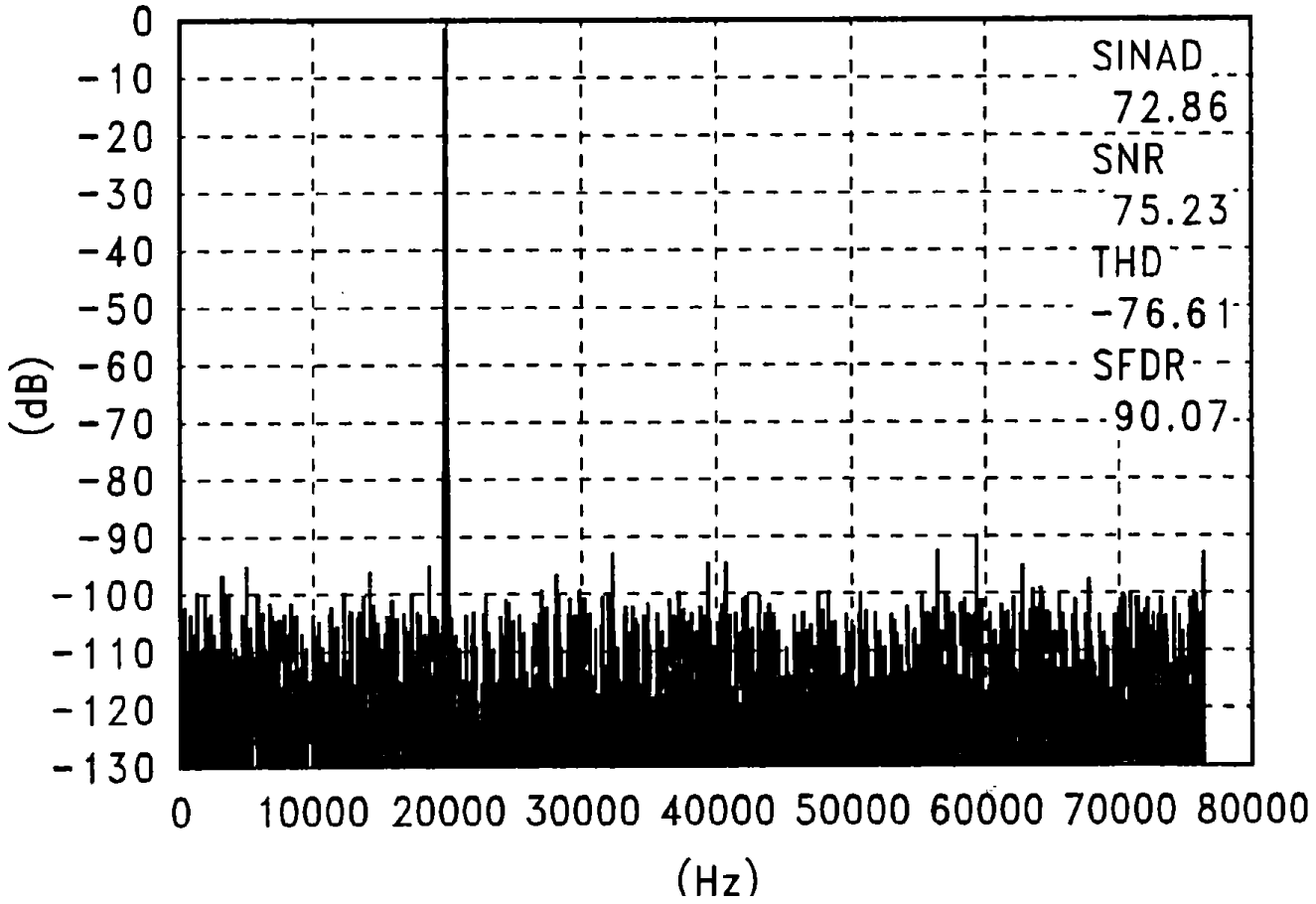
Convertitori A-D - panoramica



fonte: National Semiconductor (`http://www.national.com`)

Convertitori A-D — SNR e SINAD

Half Scale Differential 20 kHz Sine Wave Input,
f_S = 153.6 kHz



fonte: National Semiconductor (`http://www.national.com`)