



Facoltà di Ingegneria
Università degli Studi di Firenze
Dipartimento di Elettronica e Telecomunicazioni

Voltmetri Numerici per tensioni continue

Ing. Andrea Zanobini

Dipartimento di Elettronica e Telecomunicazioni

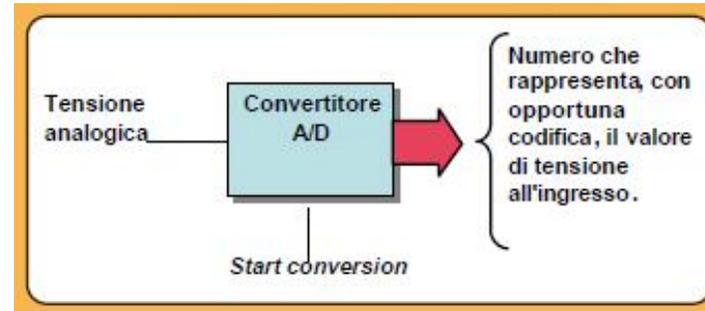
Contenuti:

1. Cenni alla conversione analogico-digitale (A/D) (ADC): errori, velocità e risoluzione.
2. Voltmetri *spot*: potenziometrici, ad approssimazioni successive, flash (*più veloci* \Rightarrow *oscilloscopi numerici* V_{AC}).
3. Voltmetri *a integrazione*: il voltmetro a rampa e doppia rampa (*più lenti* \Rightarrow *Multimetri numerici per* V_{DC}).
4. Caratteristiche metrologiche.

ADC - Convertitori analogico-digitali (cenni)

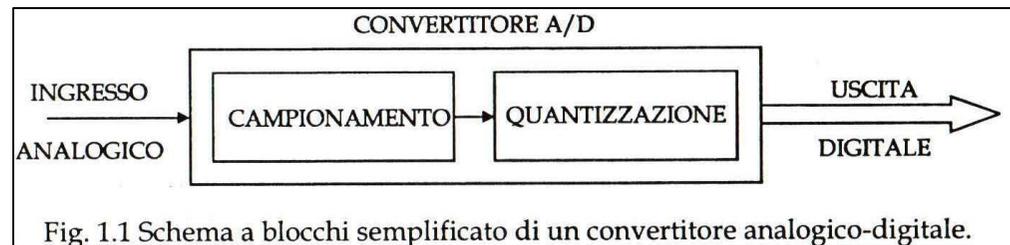
Generalità

- Consentono la valutazione numerica dell'ampiezza di una tensione applicata al loro ingresso
- Restituiscono un numero da cui si può risalire alla tensione applicata



ADC

- Molteplici principi di funzionamento dipendenti da:
 - accuratezza
 - tempo di misurazione
 - complessità circuitale
 - automazione della misurazione
 - costo dello strumento
 - evoluzione tecnologica dei componenti elettronici



ADC

- Due grandi categorie:
 - 'Spot'
 - Flash
 - Ad approssimazioni successive
 - ~~Subranging~~ → Potenziometrici
 - Ad 'integrazione'
 - A Rampa semplice
 - A Doppia rampa
 - ~~Sigma Delta~~

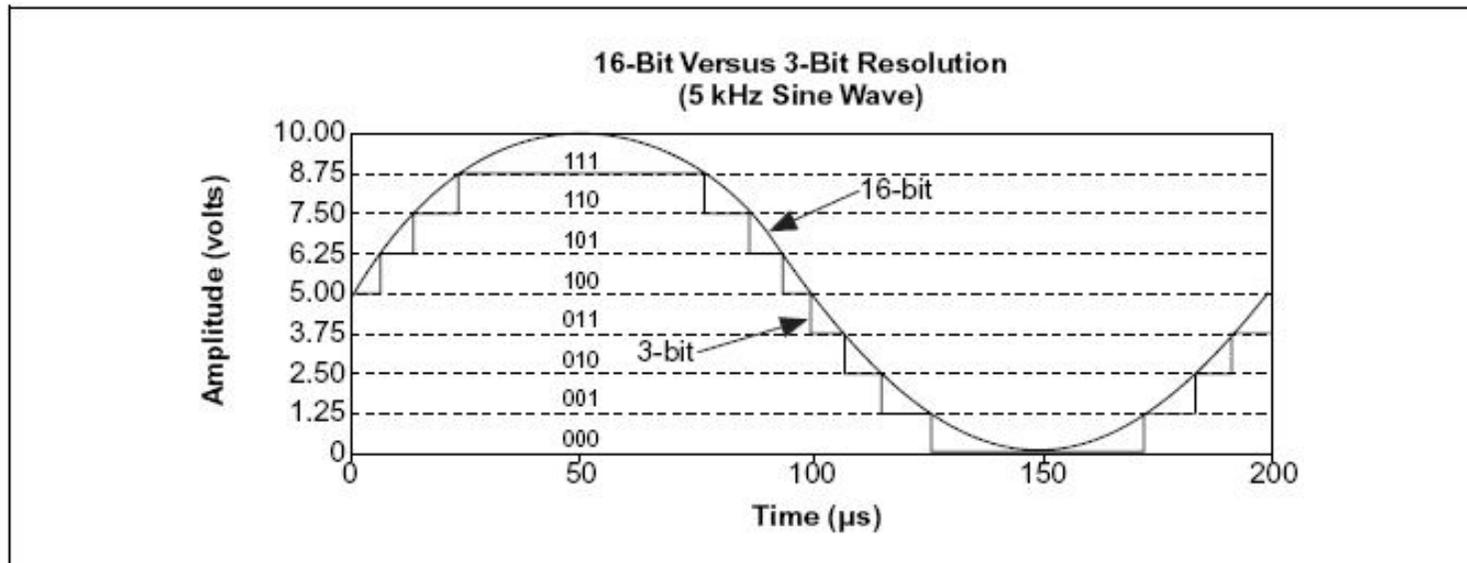
I parametri fondamentali: velocità e risoluzione

La miniaturizzazione dei circuiti integrati e l'aumento della loro velocità di operazione hanno permesso la costruzione di convertitori con caratteristiche impensabili solo qualche anno fa (**ADC a 14 bit con velocità di 1 GS/s**)

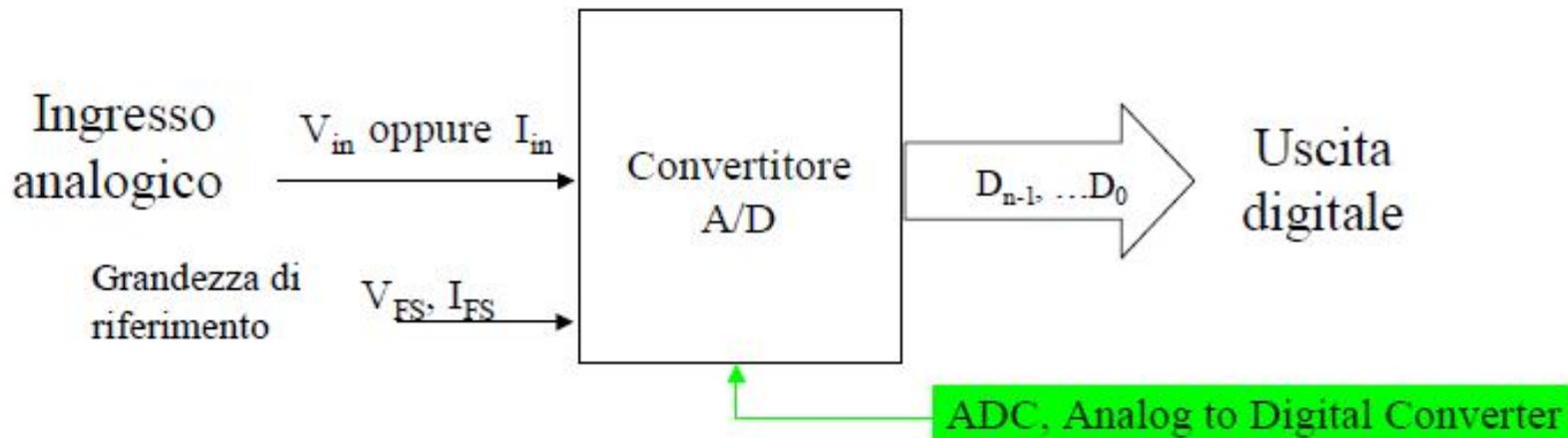
Numero di bit e risoluzione

Una formula unica si ottiene facendo riferimento all' "full range", definito come differenza tra la massima tensione misurabile e la minima tensione misurabile

$$LSB = \frac{FR}{2^N}$$



ADC - Convertitori analogico-digitali (cenni)



$D_{n-1} \dots D_0$ ← Parola digitale di uscita

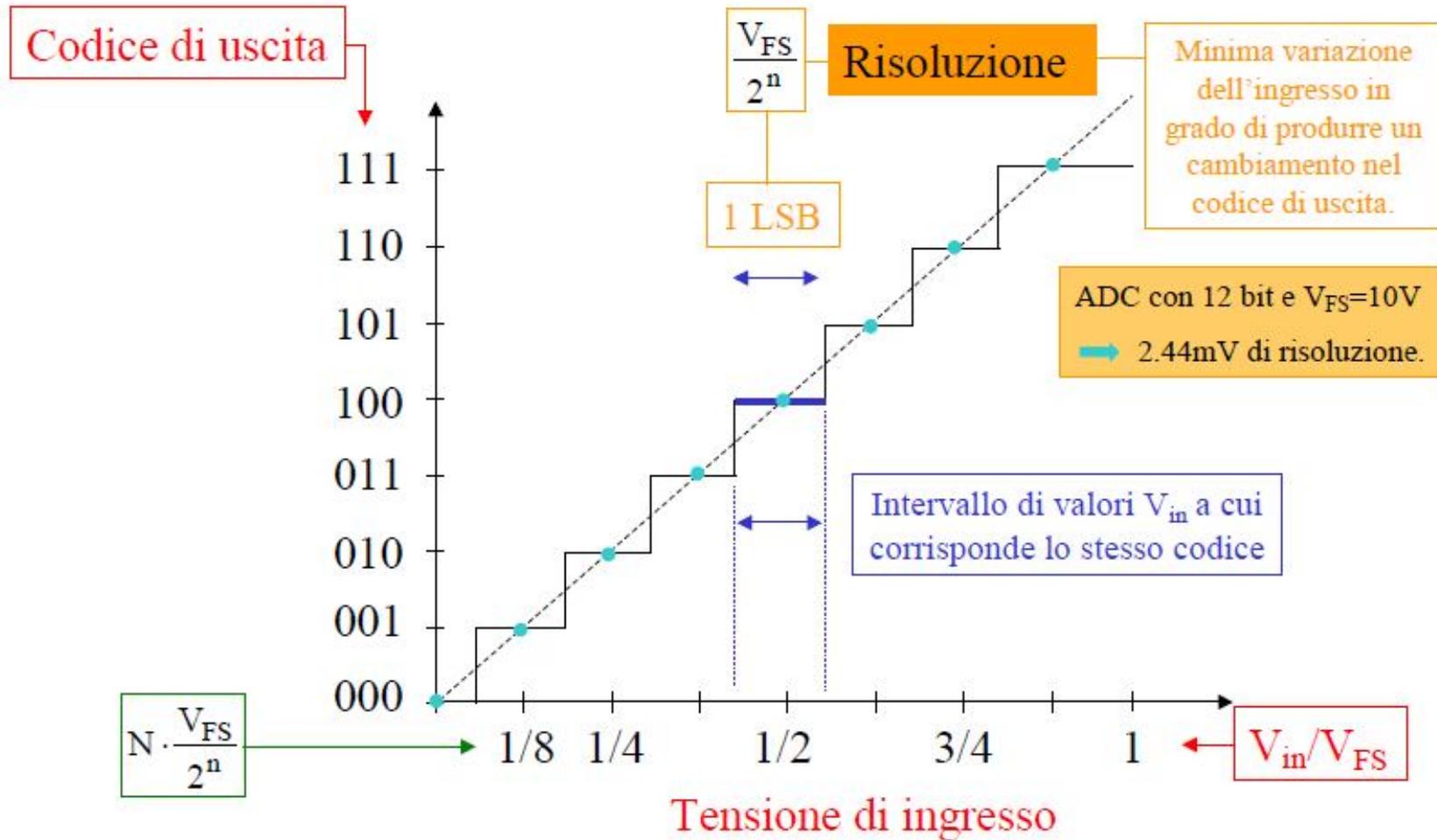
└─ BIT meno significativo – LSB, Least Significant Bit

└─ BIT più significativo –MSB, Most Significant Bit

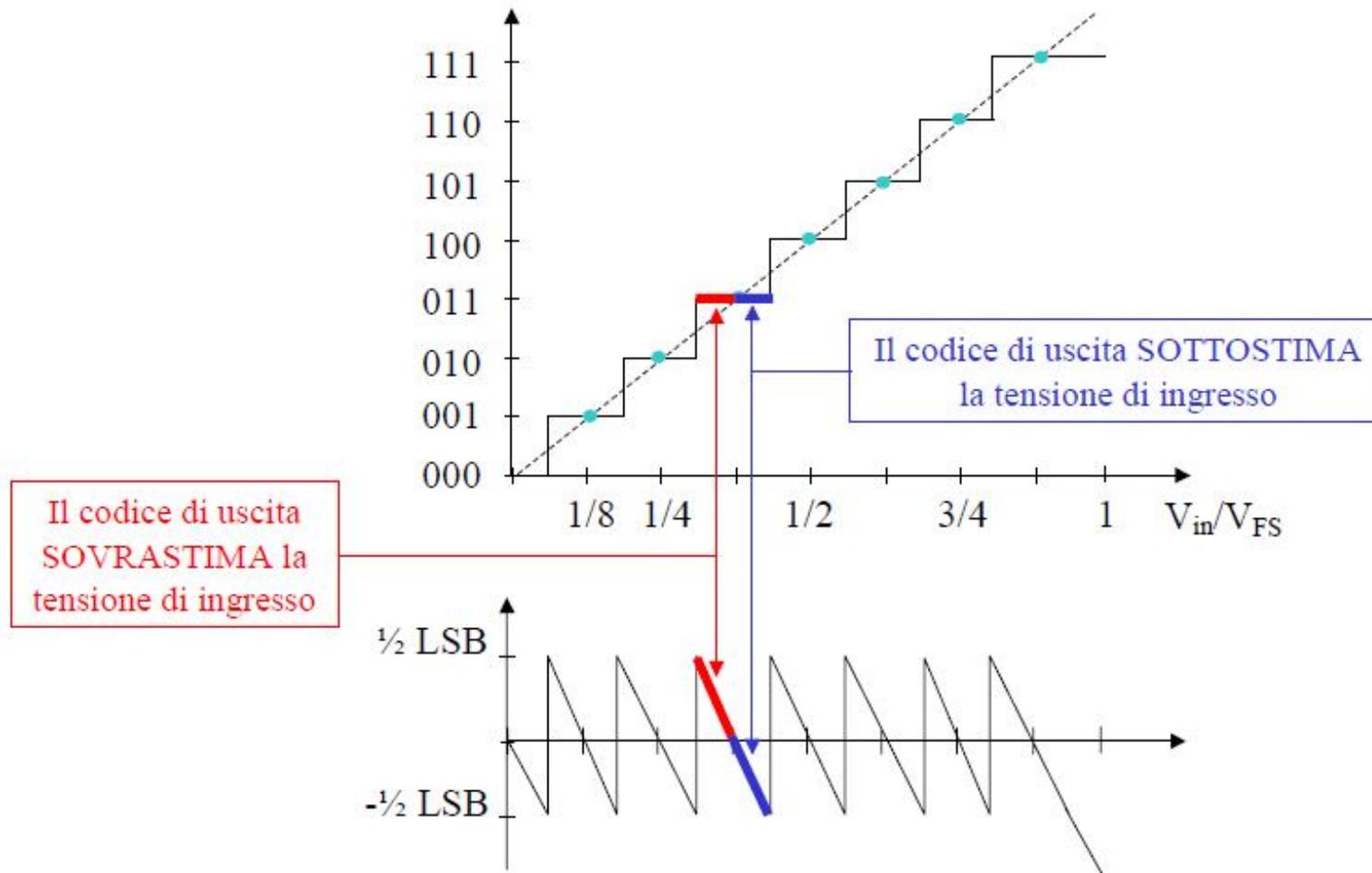
N è il numero decimale intero corrispondente alla parola digitale $D_{n-1} \dots D_0$:

$$N = D_{n-1}2^{n-1} + D_{n-2}2^{n-2} + \dots + D_0 \cdot 2^0$$

RELAZIONE INGRESSO-USCITA di un ADC IDEALE



ERRORE DI QUANTIZZAZIONE



Errori nella conversione

- Poiché i valori numerici assegnati ad una qtà analogica sono scelti tra un insieme discreto di numeri reali, un numero digitale è sempre un'approx del segnale originale analogico.
- La differenza tra il segnale originale analogico e il valore quantizzato è chiamata **errore di quantizzazione**.
- **L'errore di offset** è definito come lo spostamento, comune a tutti i codici, delle transizioni rispetto ai valori ideali delle tensioni nella corrispondente caratteristica ideale

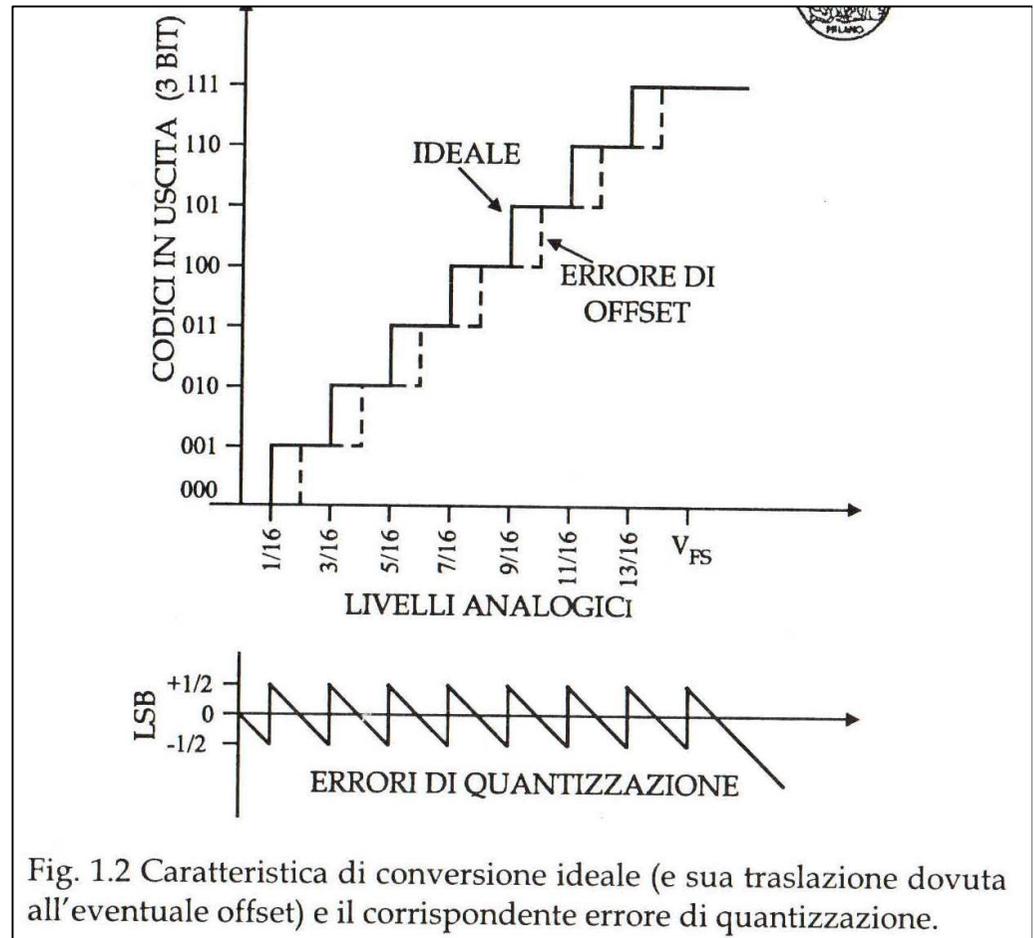
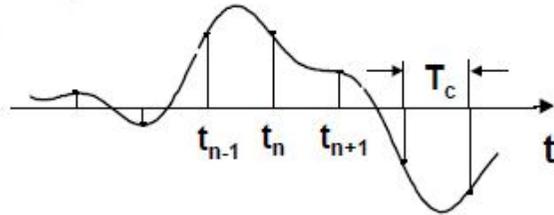


Fig. 1.2 Caratteristica di conversione ideale (e sua traslazione dovuta all'eventuale offset) e il corrispondente errore di quantizzazione.

Convertitori spot

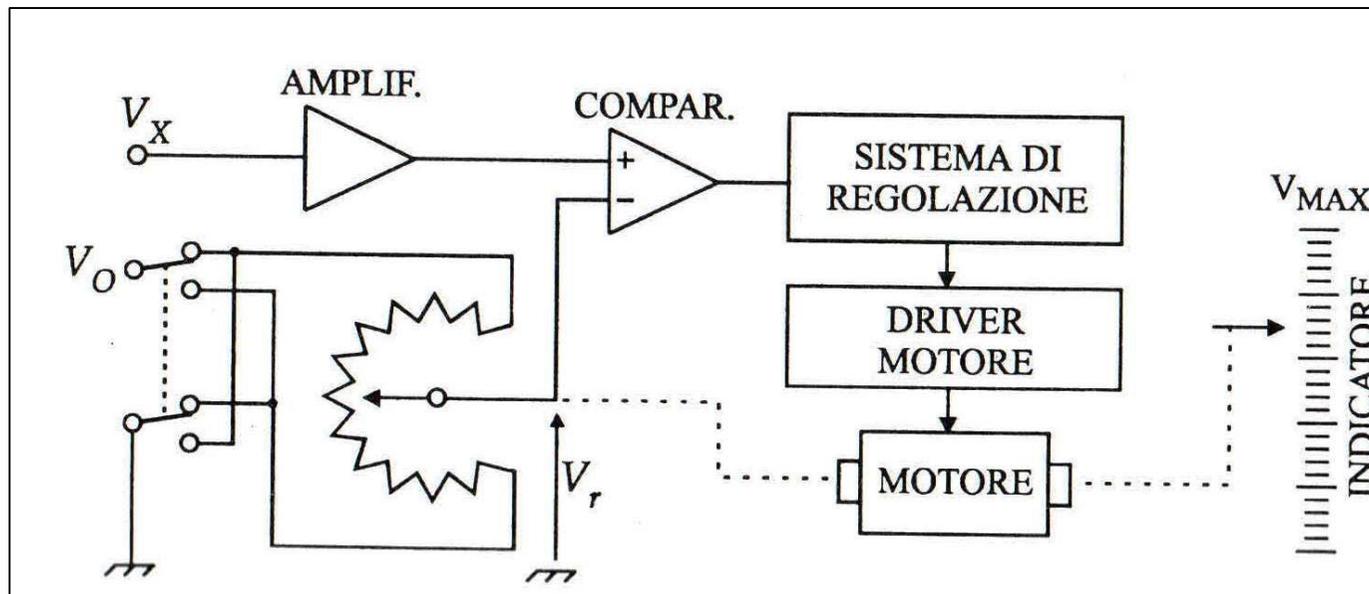
- Forniscono un'uscita legata al valore dell'ingresso in uno specifico 'istante di campionamento'
- Sono caratterizzati da:
 - Intervallo di campionamento
 - Risoluzione



Confronto tensione-tensione

Voltmetri potenziometrici:

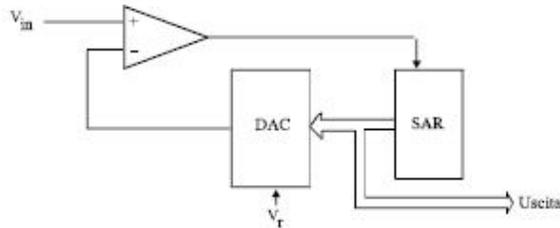
Il rapporto $V_r/V_0 = k < 1$ viene variato finchè il comparatore lo ritiene identico a V_x .



....Incertezza - Risoluzione??

Convertitori ad approssimazioni successive

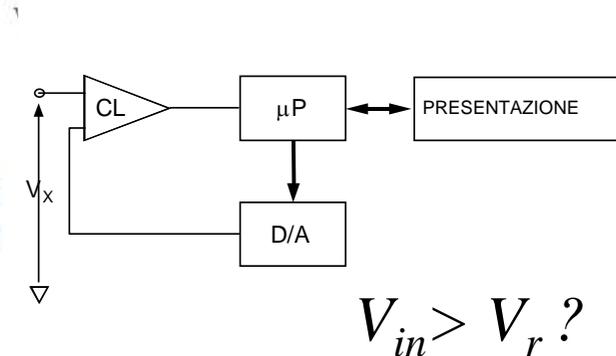
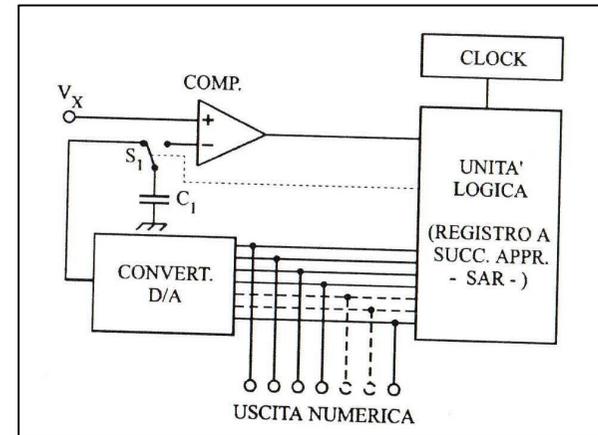
- Si confronta la tensione di ingresso con la tensione generata da un convertitore Digitale/Analogico (DAC) comandato per approssimare la tensione



- Esempio convertitore a 4 bit (unipolare) FS=16 V
- Tensione in ingresso 11.2 V

| Passo | Codice | Tensione | Confronto |
|-------|--------|----------|--------------|
| 1 | 1000 | 8 | DAC minore |
| 2 | 1100 | 12 | DAC maggiore |
| 3 | 1010 | 10 | DAC minore |
| 4 | 1011 | 11 | (fine) |

- Si inizia a metà scala
- Ogni volta si incrementa o decrementa il codice del DAC di un valore pari a metà del passo precedente



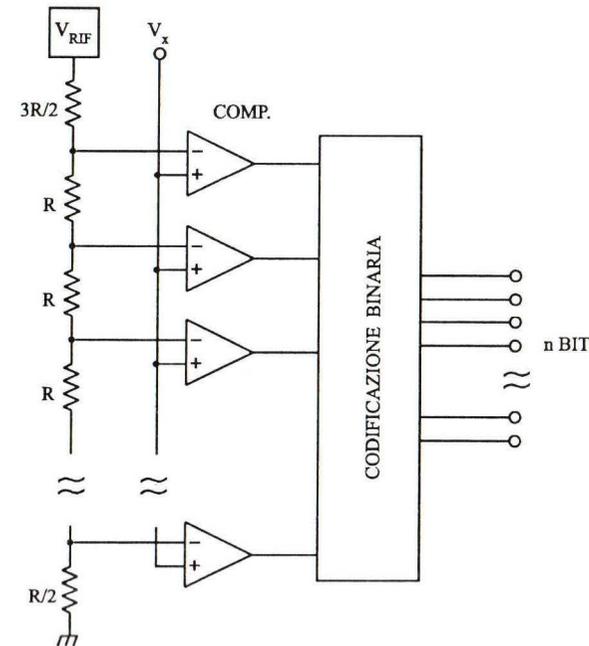
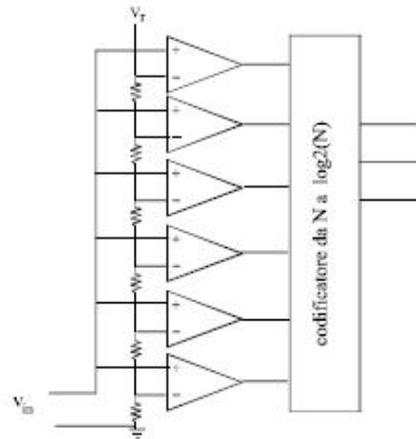
- Pregi
 - Poco costoso: un comparatore un circuito SAR
 - Converte N bit in N colpi di clock
- Difetti
 - Meno veloce del convertitore flash
 - Richiede una tensione in ingresso stabile per tutto il periodo di conversione (sample&hold)

(μs)

....Incertezza - Risoluzione??

Convertitori flash

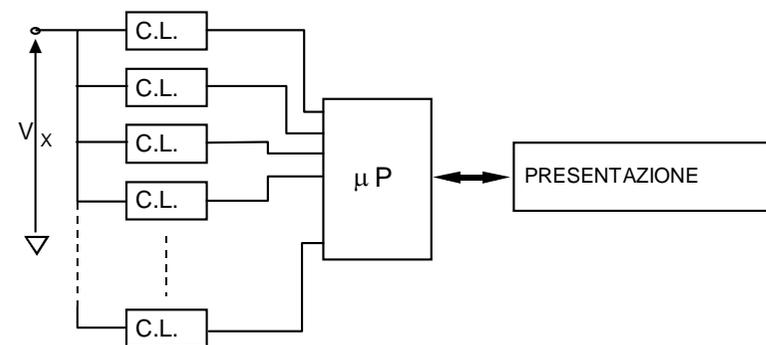
- Si confronta la tensione da misurare con una serie di comparatori
- Un comparatore per ogni livello (non bit !) di uscita



Convertitori flash

- Pregi:
 - Veloce: tempo di conversione pari a al tempo di un comparatore (+tempo di codifica)
- Difetti:
 - Costoso (8 bit = 256 comparatori)
 - Bassa impedenza di ingresso (8 bit = 256 ingressi in parallelo)

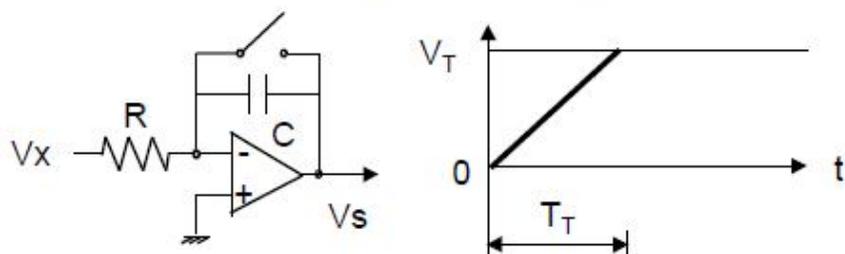
....Incertezza - Risoluzione??



Convertitori ad 'integrazione'

- Forniscono un'uscita legata al valore 'medio' dell'ingresso in un certo intervallo di tempo
- Sono caratterizzati da
 - Tempo di integrazione
 - Tempo di conversione
 - Risoluzione

A rampa semplice (1)



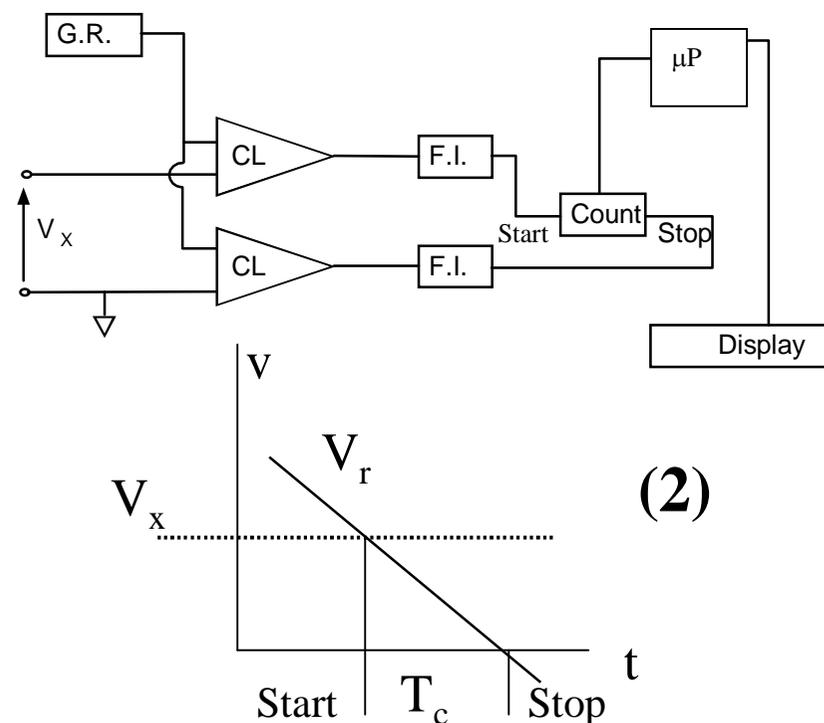
Se la tensione in ingresso è costante:

$$V_u(t) = -\frac{1}{RC} V_x t \Rightarrow V_x = -\frac{V_T}{T_T} RC$$

Conversione tensione-freq./tempo

A rampa semplice

- Si effettua l'integrale del segnale di ingresso
- Il risultato si ottiene dal tempo impiegato per raggiungere un valore di tensione prefissato

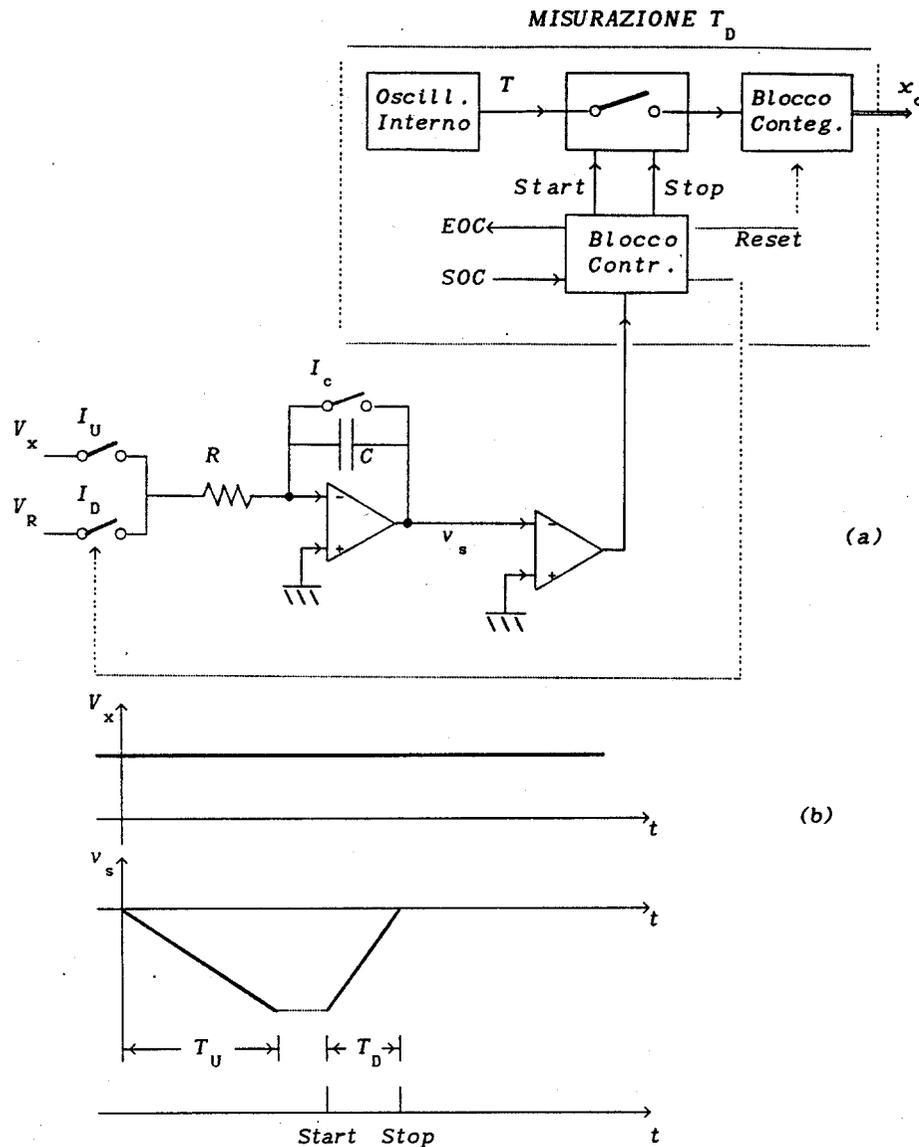


(2)

VOLTMETRICI NUMERICI A DOPPIA INTEGRAZIONE

Doppia Rampa

- In questo tipo di voltmetri si realizza la conversione tra la tensione di ingresso e un intervallo temporale.
- Per questa conversione si fa uso di un integratore e di un contatore.
- Nell'attività di integrazione vi sono due momenti: si carica un condensatore tramite la tensione da convertire V_x e successivamente si scarica usando una tensione di riferimento V_r
- Viene valutato il **tempo** necessario alla scarica del condensatore



VOLTMETRICI NUMERICI AD INTEGRAZIONE (2)

Dopo un tempo T_u , fissato a priori, la rampa raggiunge il valore:

$$V_s (T_u) = -\frac{1}{RC} V_x T_u$$

All'istante T_u il blocco di controllo provvede all'apertura di I_u , alla chiusura di I_d e all'avvio dell'impulso di *start*. All'ingresso dell'integratore si trova adesso V_r con polarità opposta a V_x e il condensatore prende a scaricarsi. Questa *fase è detta di rundown* ed avrà termine quando la tensione ai capi di C vale 0, dopo un tempo T_d ottenibile dalla relazione:

$$V_s (T_u + T_d) = V_s (T_u) - \frac{1}{RC} V_r T_d = 0; \quad V_x = -V_r \frac{T_d}{T_u} = -V_r \frac{N_d}{N_u} \frac{T_c}{T_c} \quad (N_d \pm 1)$$

Essendo V_r nota, V_x può essere espressa in forma codificata solo in funzione di N_u e N_d indipendentemente da C , R e T_c . **L'accuratezza** del voltmetro dipende dunque solo dalla stabilità di V_r e dalla linearità delle rampe

LEGAME TRA RISOLUZIONE E TEMPO DI MISURAZIONE

- Mentre T_u (*runup*) non presenta errori di quantizzazione perchè la durata di questo intervallo viene scelta pari a un multiplo di T_c (sincronizzata), T_d (*rundown*) presenta errore di quantizzazione
- Questo errore si propaga nella valutazione di V_x , che viene valutata con risoluzione finita. Si ottiene:

$$\Delta_v = \frac{|V_r|}{N_u} = \frac{|V_x|}{N_d} \approx \frac{FS}{N_{Dmax}}$$

- Fissati dunque un fondo scala FS e un numero massimo di conteggi , il valore del passo di quantizzazione Δ_v rimane fissato indipendentemente da V_r e N_u .
- Al contrario per un dato FS, Δ_v diminuisce all'aumentare del numero massimo dei conteggi previsto per il *rundown*

► **Analisi di possibili contributi all'incertezza**

- tensione di offset dell'integratore
- tensione di offset del comparatore di soglia
- eventuali ritardi tra le varie operazioni che devono essere sincronizzate
- non linearità della rampa di integrazione
- cariche residue del condensatore

Caratteristiche metrologiche:

- **I voltmetri numerici in commercio sono caratterizzati da: portate, numero di cifre, accuratezza, velocità di lettura, interfaccia.**
- **Campo di misura per ottimi dispositivi: 10 nV-1000 V.**
- **Accuratezza proporzionata alla risoluzione e dunque al numero di cifre, un valore plausibile potrebbe essere 100 μ V.**
- **Velocità massima di lettura correlata alla risoluzione, un valore plausibile potrebbe essere di 1000 letture al secondo.**

Confronto Semplice/Doppia rampa

- Rampa semplice: devono essere misurati V_T, T_T, R, C

$$V_x = \frac{V_T}{T_T} RC$$

- Doppia rampa devono essere misurati: V_r ed il rapporto T_d/T_u

$$V_x = V_r \frac{T_d}{T_u}$$

Doppia rampa: non contano le derivate di R,C e della base tempi

Riferimenti Bibliografici

- ✓ Bava, Galzerano, Norgia, Ottoboni, Svelto: **Misure Elettroniche di Laboratorio**, Pitagora Editrice Bologna
- ✓ Pisani: **Misure Elettroniche - Strumentazione Elettronica**, Politeko Edizioni
- ✓ Offelli, Petri: **Lezioni di Strumentazione Elettronica**, CittàStudiEdizioni