

# La struttura dei sistemi embedded: periferiche, sensori e attuatori

Braione Pietro, revisione Domenico G. Sorrenti

Sistemi Embedded



# Obiettivi

- Veloce revisione delle tecniche di gestione dei dispositivi periferici normalmente presenti nei sistemi embedded
- Timer, convertitori AD e DA, teorema del campionamento
- Sensoristica
- Attuazione (elettrica)



# Periferiche

- Dispositivi che eseguono funzioni standard single-purpose
- Sensori e attuatori interfacciano il sottosistema computazionale con il sistema fisico
- In alcuni casi le funzionalità di una periferica potrebbero essere implementate programmando un processore general-purpose
- Occorre valutare i trade-off su complessità, dimensioni, consumi e costi del sistema



# Comunicazioni con le periferiche

- Ne parliamo ora perché l'interazione con le periferiche avviene in maniera simile (o uguale, se ricordate) all'accesso in memoria
- Le periferiche si controllano scrivendo nei loro registri di controllo, e inviando/ricevendo dati nei/dai loro registri dati
- Come si accede a tali registri?
  - Periferiche mappate in memoria: una parte degli indirizzi dello spazio di indirizzamento viene non fatto decodificare alla memoria, ma è utilizzato (viene fatto decodificare) dalla periferica, per leggere/scrivere i suoi registri
  - Spazio di indirizzamento per l'I/O: con istruzioni assembly dedicate per accedervi (es. 8051 e x86)



# Controllo di programma (polling)

- Il tipo di gestione di periferica più semplice, che richiede la minore complessità hardware e garantisce buone prestazioni a fronte di una totale dedizione della MCU al trasferimento.
- Utile nel caso di sistemi vincolati dai costi e che non debbano svolgere calcoli intensi e quei pochi calcoli dipendono da pochi dati ricevuti dalle periferiche.



# Interruzione di programma

- Il tipo di gestione di periferica forse più usato, richiede un minimo di complessità hardware e software
- Dà prestazioni decenti a fronte di una non completa dedizione della MCU al trasferimento
- Utile nel caso di sistemi che non devono scambiare grandi quantità di dati con le periferiche e se non sono scambi critici in termini di latenza



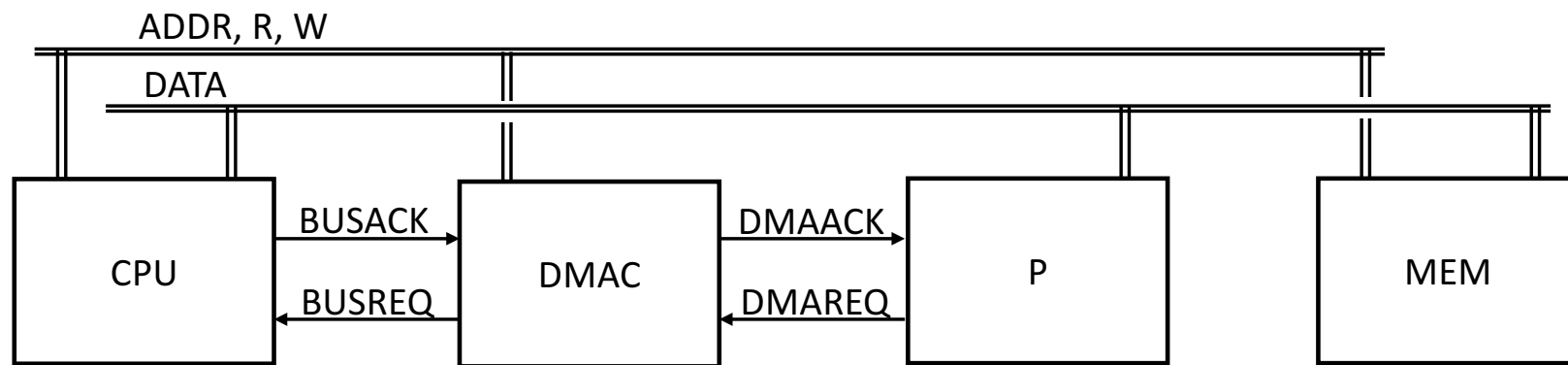
# Direct Memory Access (DMA)

- Il DMAC è un “tipo di periferica” utilizzata per trasferire in DMA i dati da un'altra periferica alla memoria e viceversa
- Utile nel caso di periferiche che generano grandi quantità di dati in pacchetti (es. hard disk) e che sono critiche come latenza



# Funzionamento DMA (1)

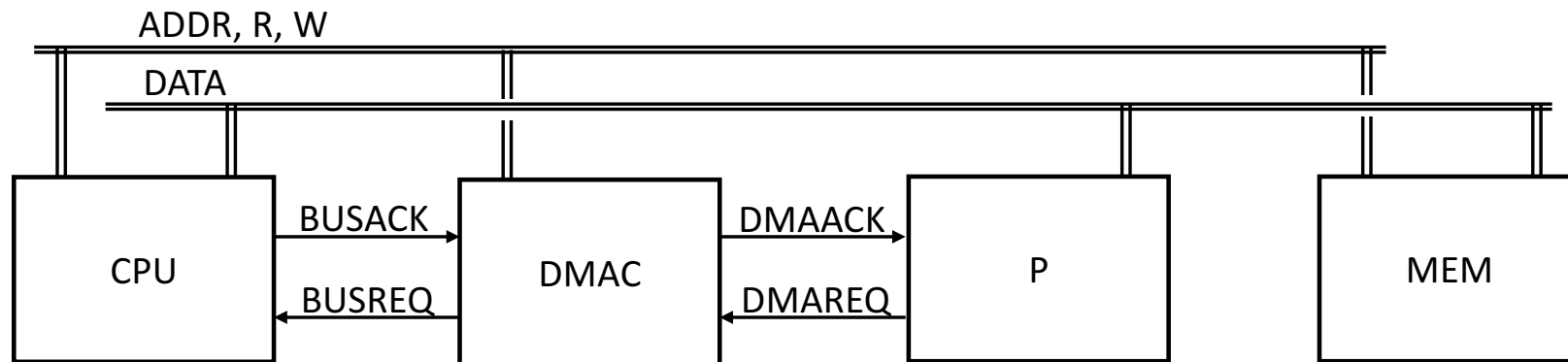
- Supponiamo che il processore debba richiedere alla periferica di effettuare, ad esempio, la lettura di un blocco di dati (trasferimento da periferica a memoria)
  - Il processore imposta il DMAC con l'indirizzo di destinazione dei dati e la quantità di dati
  - il processore fa partire il trasferimento agendo su un bit di controllo del DMAC
  - quando un dato diventa disponibile la periferica segnala al DMAC di iniziare il trasferimento (DMAREQ)





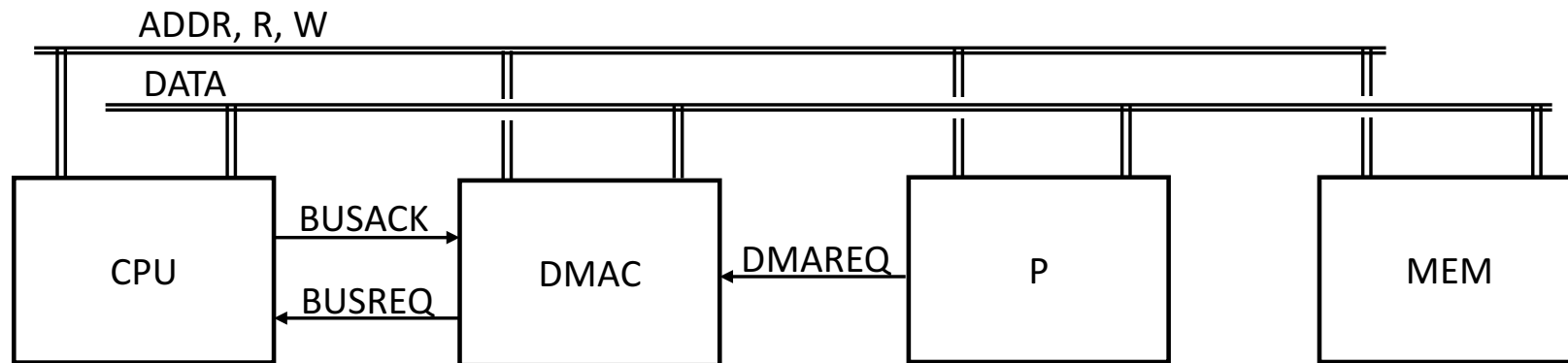
## Funzionamento DMA (2)

- Il DMAC chiede al processore di sospendere l'uso del bus (BUSREQ)
- Una volta ricevuto BUSACK dalla CPU (o dal bus arbiter, se esiste) il DMAC asserisce l'indirizzo destinazione ed invia DMAACK
- La periferica pone il dato sul bus dati ed il DMAC asserisce W



# Funzionamento DMA (3)

- Alternativa: Dual address model
  - Come sopra fino a ricevimento BUSACK
  - Quindi il DMAC legge il byte dal registro dati di P in un suo registro, e poi lo scrive in MEM



# Funzionamento DMA (4)

- Trasferimento multi-byte:
  - burst (in blocco),
  - cycle-stealing (un byte alla volta),
  - transparent (quando il processore non usa il bus)



# Timer

- Periferica che genera un segnale dopo un certo intervallo temporale
- Funzionamento:
  - Un segnale di clock viene generato dal timer stesso oppure ricevuto in input su un opportuno pin
  - Il clock può essere “scalato”, ossia passato attraverso un divisore (/ moltiplicatore) di frequenza, configurabile
  - Il clock viene utilizzato per decrementare un registro contatore ad ogni colpo; il valore iniziale del registro contatore è anch'esso configurabile
  - Quando il registro arriva a zero, viene generato il segnale di output
  - Il timer si può o meno (scelta configurabile) resettare al valore iniziale e riprendere il conteggio



# Esempio: timer Intel 8253

- Il timer integrato sui PC
- Diverse modalità di funzionamento:
  - One-shot, genera un interrupt
  - One-shot, genera un impulso della durata del conteggio
  - Periodico, genera un'onda quadra con un certo duty cycle
  - Periodico, genera un'onda quadra con duty cycle = 50%
  - ...



# Real-time clock

- Usato per mantenere data e ora
- Una batteria mantiene data e ora quando il sistema è spento
- Il tempo viene scandito precisamente utilizzando un oscillatore al quarzo



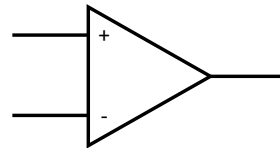
# Watchdog timer

- Un timer con funzionamento “rovesciato”
- Invece di produrre un segnale alla scadenza di un periodo di tempo, aspetta di ricevere in input un segnale entro il tempo impostato
- Nel caso in cui tale segnale non arrivi, può essere impostata una reazione (ad es., generare un segnale usato come interrupt)
- Utilizzato per verificare periodicamente che un sistema sia “vivo”



# Comparatori

- Ricevono in ingresso due segnali analogici
- Ritornano un segnale alto o basso (0 o 1) se il primo segnale è maggiore o minore del secondo



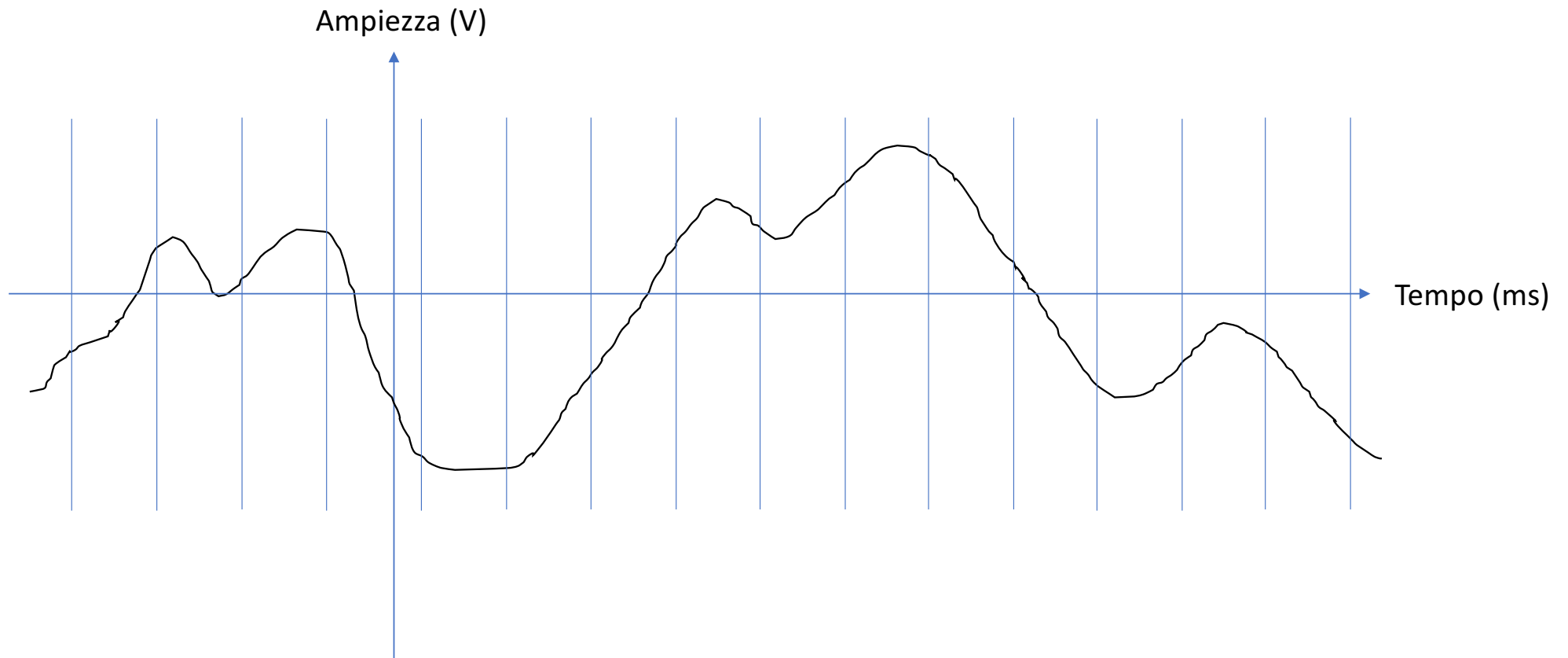


# Convertitori A/D

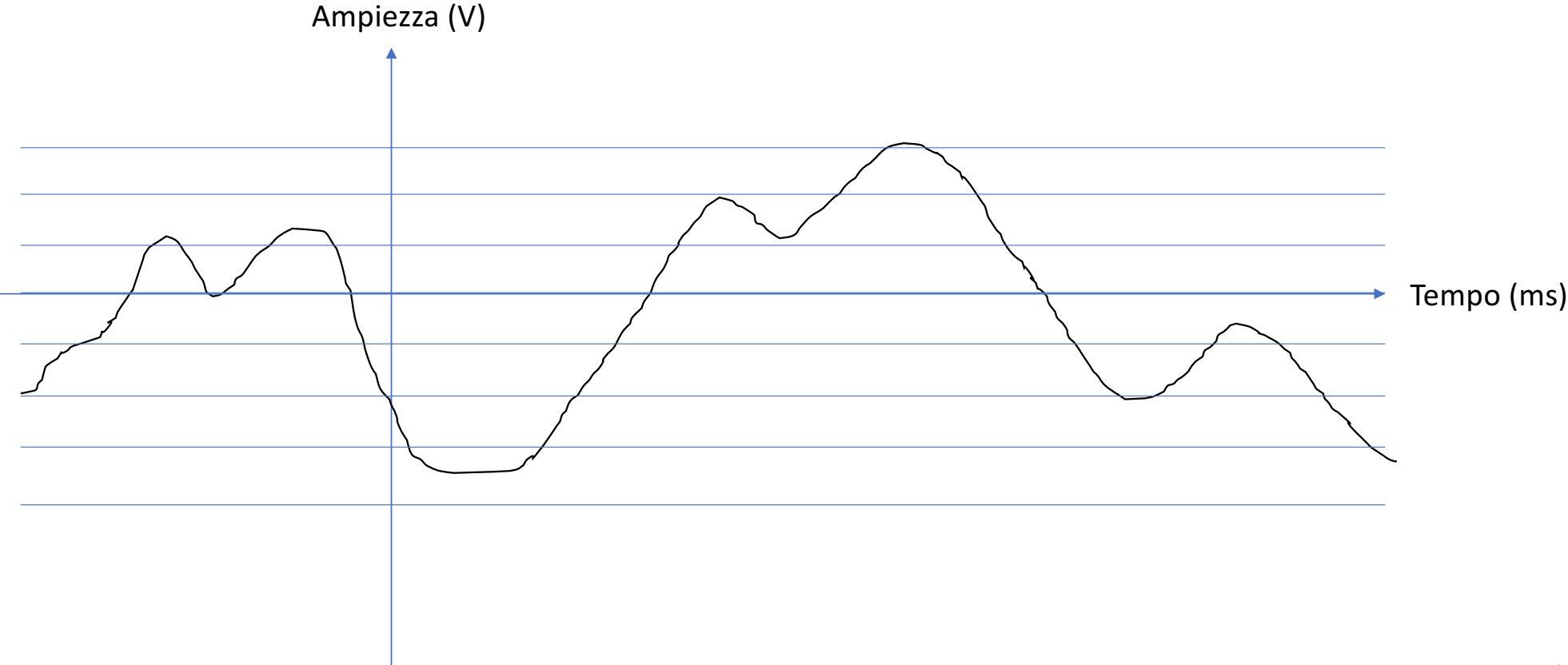
- Periferiche che convertono un segnale (elettrico) analogico in un segnale digitale
- Due fasi:
  - Campionamento / quantizzazione del dominio = il segnale analogico e continuo nel tempo viene discretizzato nel tempo, si osservano i suoi valori ad istanti spazati di un periodo regolare (da  $\mathbb{R}$  a  $\mathbb{N}$ )
  - Quantizzazione del codominio = il segnale campionato viene rappresentato con una sua misura intera, rispetto ad una certa unità di misura (da  $\mathbb{R}$  a  $\mathbb{N}$ )
  - Complessivamente il segnale passa da  $\mathbb{R} \times \mathbb{R}$  a  $\mathbb{N} \times \mathbb{N}$



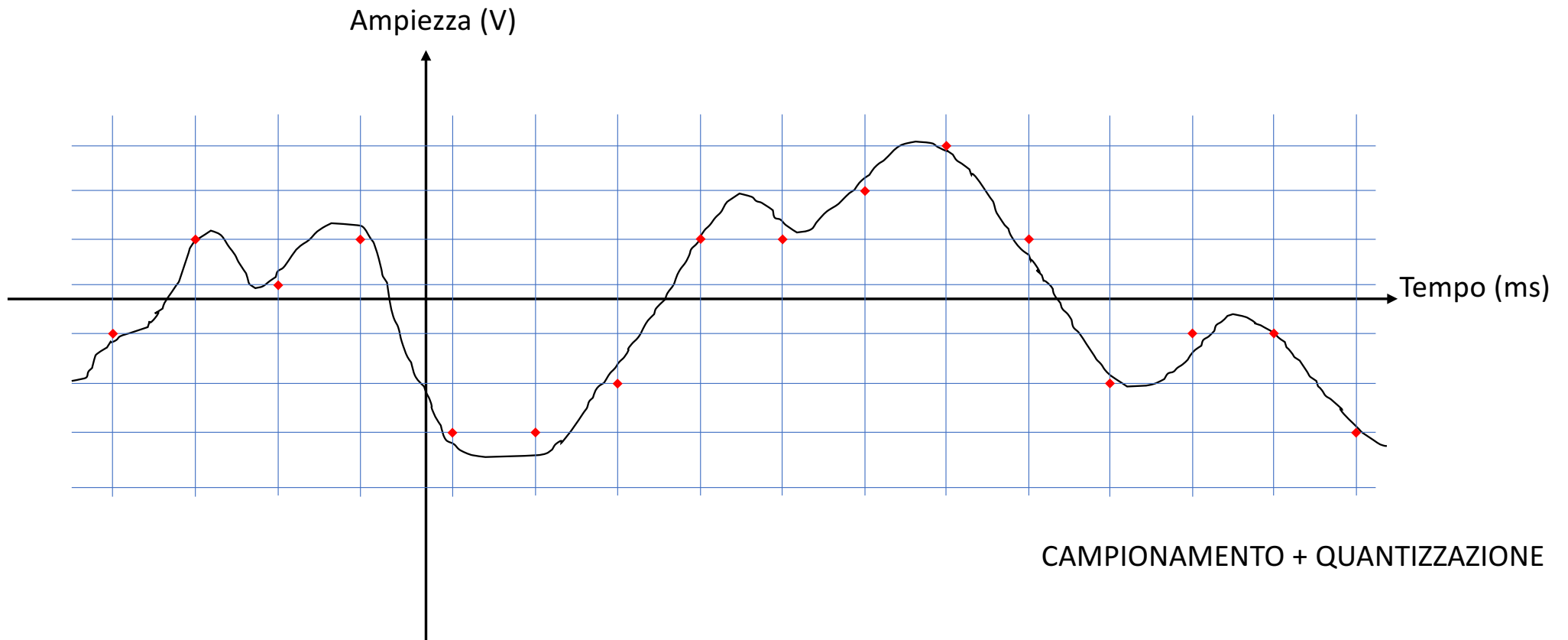
# Campionamento e quantizzazione - dominio



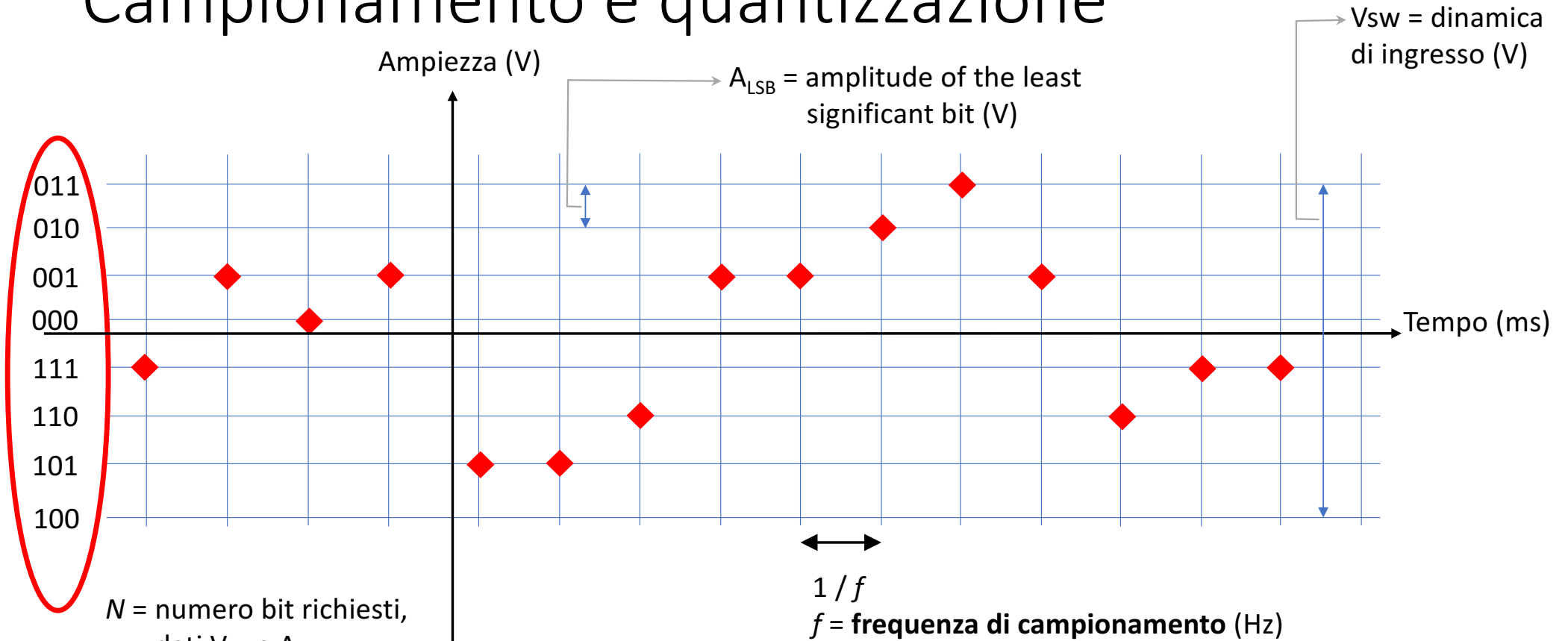
# Campionamento e quantizzazione - codominio



# Campionamento e quantizzazione



# Campionamento e quantizzazione



$N$  = numero bit richiesti,  
 dati  $V_{sw}$  e  $A_{LSB}$

$$N = \left\lceil \log_2 \left[ \frac{V_{sw}}{A_{LSB}} \right] \right\rceil$$

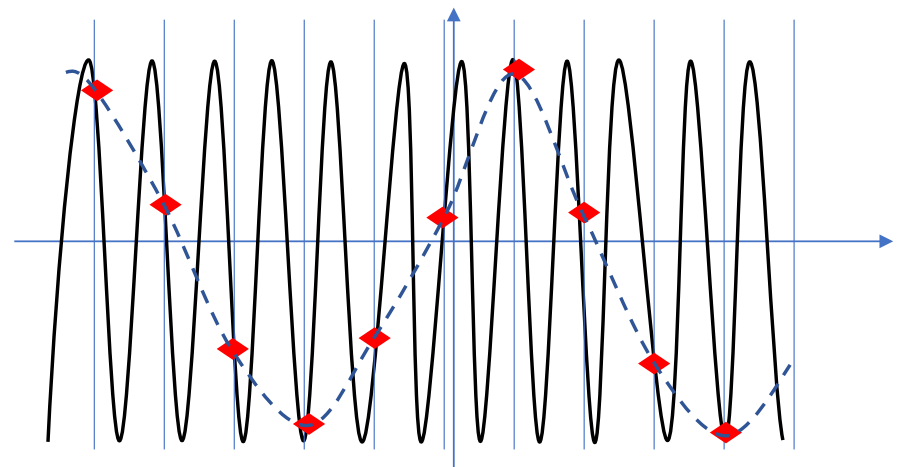
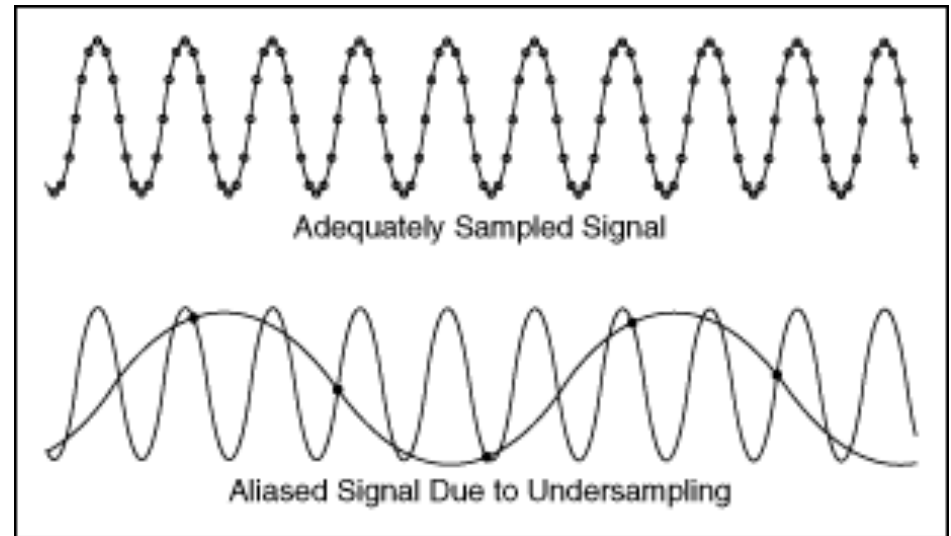
# Teorema del campionamento (Whittaker–Kotel'nikov–Shannon)

- Ogni segnale è ottenibile come sovrapposizione di componenti sinusoidali di frequenza e ampiezza variabile
- L'intervallo di frequenze  $[0, f_B]$  in cui il segnale possiede componenti è detto la banda del segnale
- C'è una banda di ampiezza ed una banda di fase, pensiamo alle sole ampiezze (non che la fase delle componenti non sia importante!)
- Teorema del campionamento: un segnale può essere fedelmente ricostruito da un suo campionamento se la frequenza di campionamento è  $\geq 2 f_B$
- $2 f_B$  è un limite teorico (check ad esempio wikipedia oppure insegnamento Elaborazione numerica dei segnali), siccome i filtri ricostruttori reali non hanno pendenza infinita ci vuole un coefficiente ingegneristico di sicurezza (3 – 5 volte)
- Esempio: telefonia paesi occidentali, esperimento USSR, audio alta fedeltà ha una banda di circa 20 KHz; la frequenza di campionamento dei CD audio è di 44,1 KHz

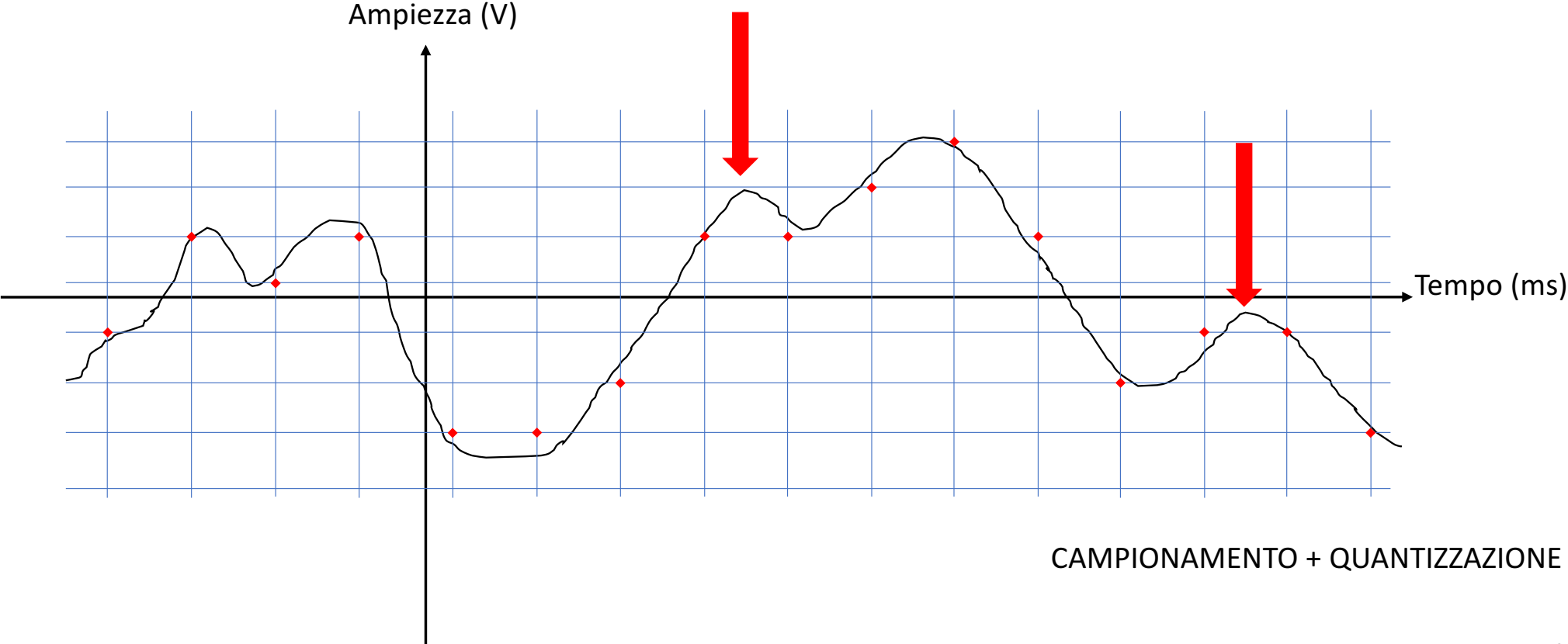


# Aliasing

- Se il campionamento viene effettuato ad una frequenza minore della frequenza di Nyquist, il segnale ricostruito può essere molto diverso dall'originale
- Tale fenomeno è detto aliasing
- Se campiono a frequenza non sufficiente (o se non conosco la banda del segnale) devo prima eliminare le frequenze che so di non poter ricostruire con un filtro passabasso, precedentemente alla raccolta dei campioni

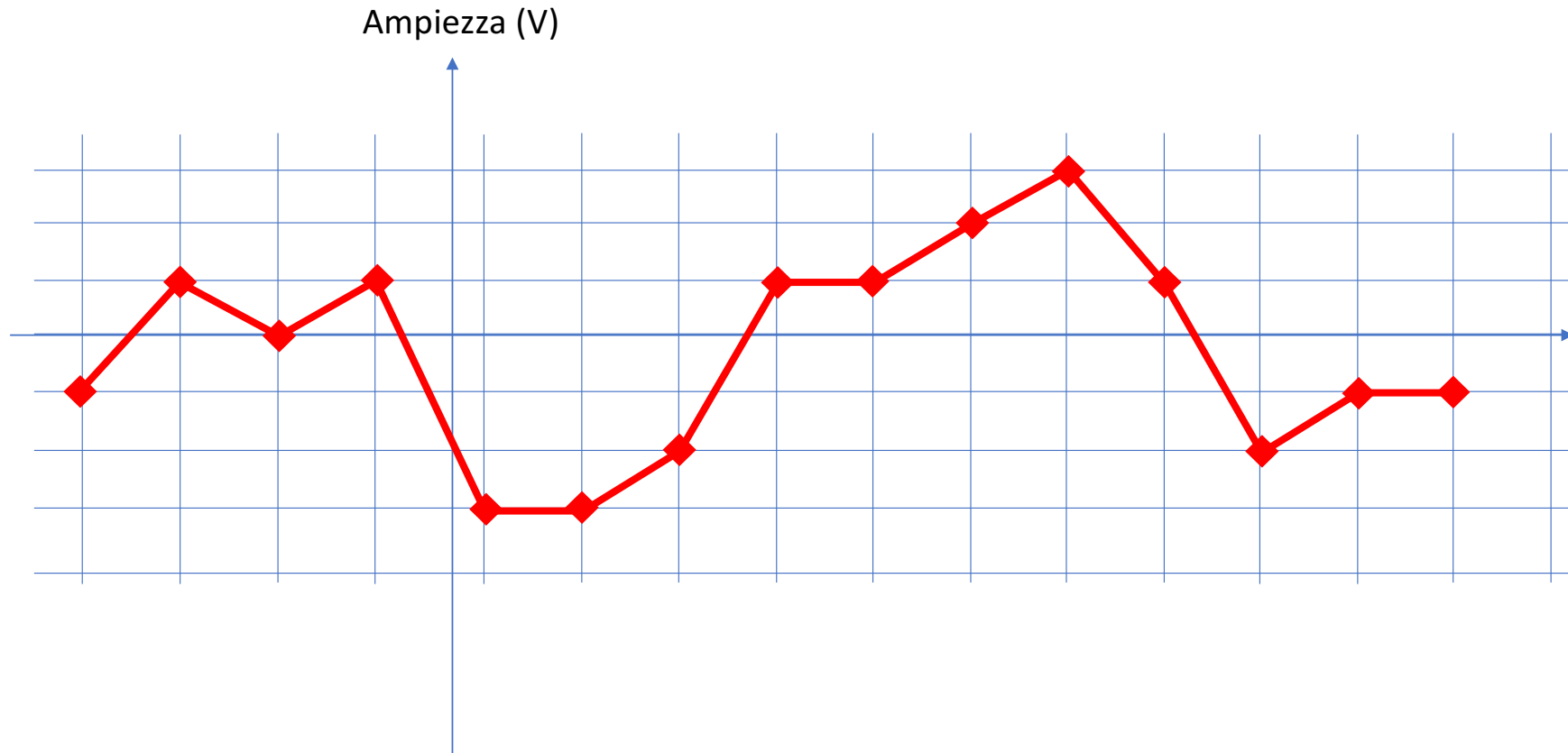


# Campionamento e quantizzazione





# Ricostruzione (conversione D/A) – linear int.





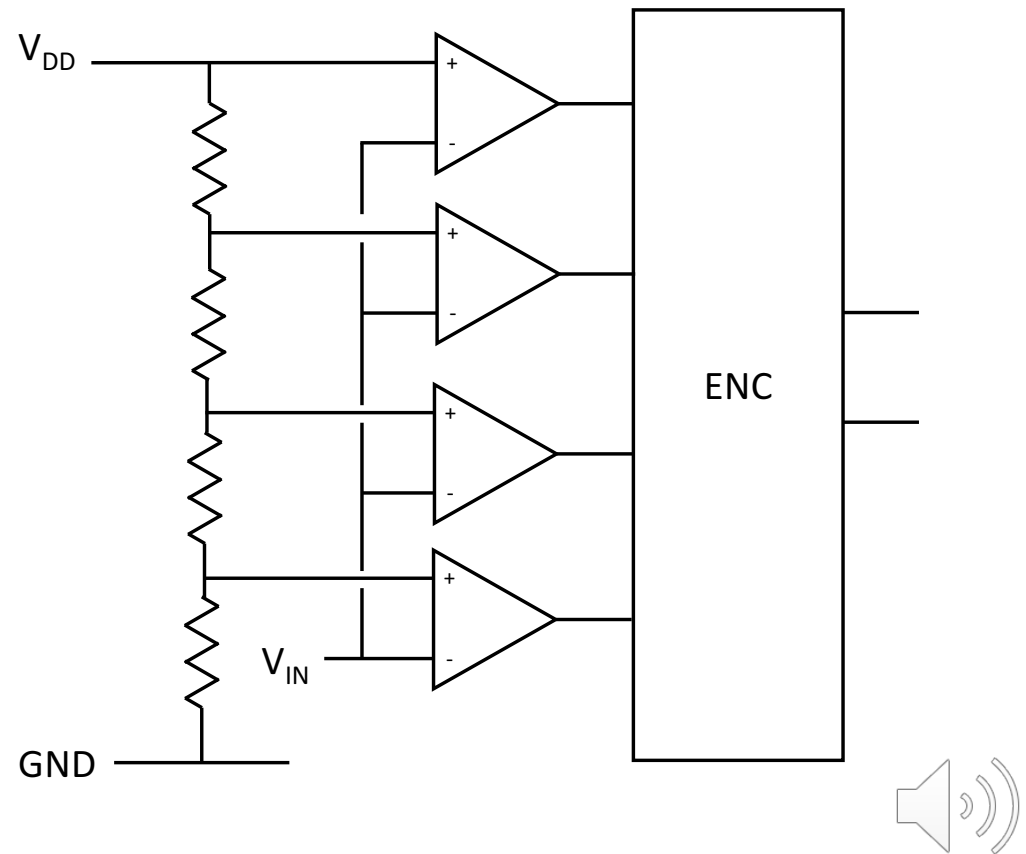
# Il rumore di quantizzazione

- La quantizzazione di un segnale analogico ha un effetto equivalente all'introduzione di un segnale spurio che si sovrappone al segnale che viene quantizzato
- Tale segnale spurio è detto **rumore di quantizzazione**
- Il rumore di quantizzazione è distribuito uniformemente nell'intervallo  $\pm \frac{1}{2} LSB$ 
  - Valore medio nullo
  - Deviazione standard =  $A_{LSB} / \sqrt{12} \approx 0,29 A_{LSB}$
  - Potenza = varianza =  $A_{LSB}^2 / 12$  (assumendo resistenza di  $1 \Omega$ )
  - Formule valide se si quantizza per arrotondamento



# Il convertitore flash

- Complesso da realizzare
- Molto rapido
- Non molto accurato



# Altri tipi di convertitori A/D

- Diversi tipi:
  - Per approssimazioni successive: ricerca binaria negli intervalli di tensione
  - Delta: ricerca lineare negli intervalli di tensione
  - Rampa: confronto con una rampa
  - Delta-sigma: complesso
- Caratteristiche rispetto al convertitore flash:
  - In genere più precisi
  - Maggior tempo per la conversione
  - Quindi minore frequenza massima di campionamento



# Codec

- Una coppia di trasformazioni A/D e D/A secondo un certo standard è anche detta codec
- Noi abbiamo visto il codec lineare:
  - La quantizzazione è omogenea su tutto l'intervallo della dinamica di ingresso
  - La relazione tra segnale analogico e digitale è lineare
- Altri esempi: A-law e  $\mu$ -law per segnali audio
  - Quantizzazione non lineare, più precisa in prossimità dello zero
  - Riduce il rumore di quantizzazione con segnali a basso volume



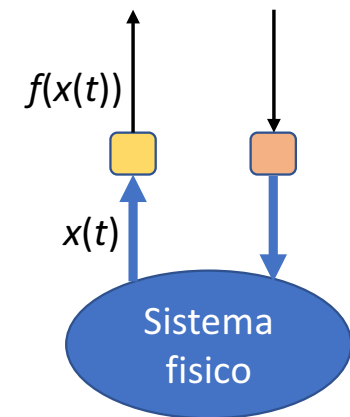
# Sensori e attuatori

- Connettono il sistema computazionale con il mondo fisico
- Stabiliscono una relazione tra valori numerici trattati nel sistema computazionale e le grandezze fisiche



# Modelli di sensori e attuatori

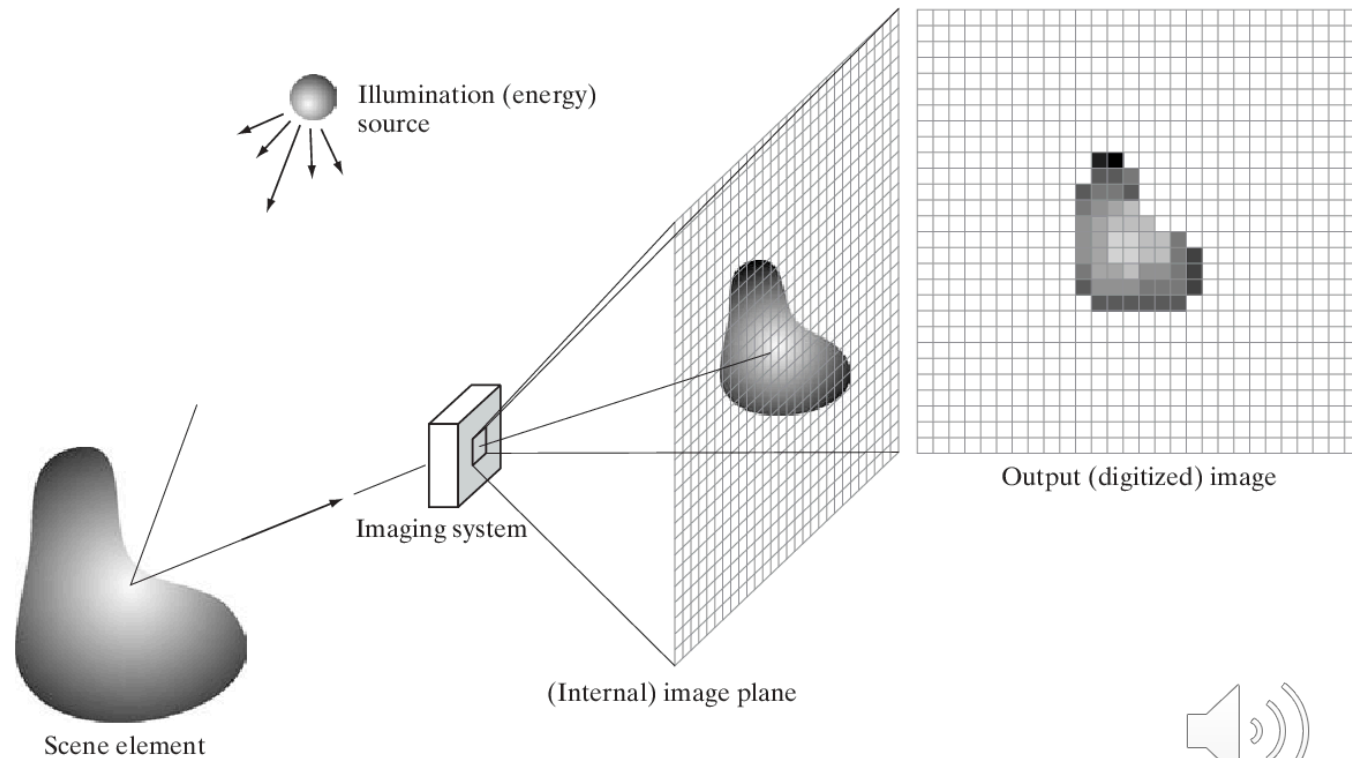
- Sia  $x(t)$  una quantità fisica, variabile nel tempo
- Sensori e attuatori stabiliscono una relazione tra la quantità fisica e una grandezza misurabile/controllabile dal sistema computazionale, di solito la tensione elettrica
- Indichiamo tale relazione con  $f(x)$





# Esempio: telecamera

la tensione letta da ciascun pixel (picture element) è in una relazione nota (ad esempio lineare) con la grandezza fisica “energia accumulata nel pixel durante il periodo di esposizione”



# Modelli affini

- $f(x(t))$  è una funzione **affine** quando:

$$f(x(t)) = ax(t) + b$$

- $f(x(t))$  è una funzione **lineare** quando è affine e  $b = 0$ :

$$f(x(t)) = ax(t)$$

- Le quantità  $a$  e  $b$  sono sufficienti per descrivere esattamente un sensore il cui modello è affine
- $a$  viene detta **sensitività**
- $b$  viene detto **offset**



# Saturazione

- In pratica sensori e attuatori funzionano in maniera affine solo entro un certo range di valori della grandezza fisica che misurano
- Al di fuori del range vi è tipicamente saturazione, ossia il valore riportato diventa costante
- Per un modello affine, entro un range  $[L, H]$ ,  $f(x(t))$ :

$$f(x(t)) = \begin{cases} ax(t) + b & \text{se } L \leq x(t) \leq H \\ aH + b & \text{se } x(t) > H \\ aL + b & \text{se } x(t) < L \end{cases}$$



# Distorsione armonica

- È una forma di non linearità
- Ha luogo quando la sensitività non è costante ma dipende dall'ampiezza del segnale

$$f(x(t)) = b + ax(t) + d_0x^2(t) + d_1x^3(t) + \dots$$

Distorsione di seconda armonica

Distorsione di terza armonica



# Precisione e range dinamico del segnale

- La **precisione**  $p$  di un sensore è la minima differenza tra due valori di  $x(t)$  che sono distinguibili dal sensore
- Il **range dinamico** DR è il rapporto tra  $H$  ed  $L$ , il range di un sensore
- DR viene frequentemente espresso in decibel:

$$DR_{dB} = 20 \log_{10} \frac{H}{L}$$



# Decibel

- Il bel è un'unità di misura per il rapporto di potenza
  - 1 bel = 10 volte più potente
  - 2 bel =  $10 * 10$  volte più potente = 100 volte più potente
- Il decibel è un decimo di bel:
  - 3 decibel = circa 2 volte più potente
  - 10 decibel = 10 volte più potente
  - 20 decibel = 100 volte più potente
- Notare che la potenza di un segnale è proporzionale al quadrato del segnale
  - Esempio: quadrato della tensione e della corrente
  - Quindi in decibel è  $10 \log_{10}(x_1(t)/x_2(t))^2 = 20 \log_{10}(x_1(t)/x_2(t))$



# Rumore

- Sorgenti di rumore inquinano la misura
- Se  $n(t)$  è rumore additivo, il sensore misura  $x'(t) = x(t) + n(t)$  invece di  $x(t)$
- Il **rapporto segnale/rumore (SNR)** è dato dal rapporto tra la potenza del segnale e quella del rumore:

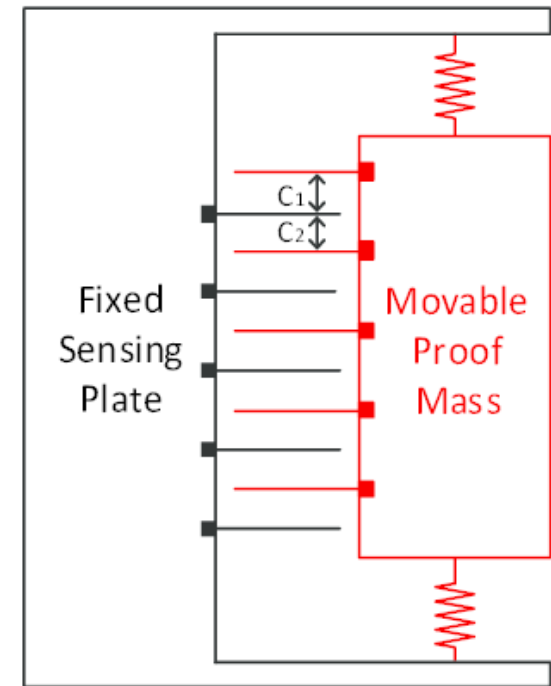
$$SNR_{dB} = 20 \log_{10} \frac{x_{RMS}}{n_{RMS}}$$

- Il range dinamico gestibile dal sensore è il SNR tra massimo segnale che non satura il sensore e il minimo segnale individuabile (rumore di quantizzazione)



# Sensori: accelerometri

- Misurano l'accelerazione propria (ossia relativa alla caduta libera) in una certa direzione
- Funzionamento: misura posizione rispetto ad un'intelaiatura fissa di una massa mobile fissata con una molla
- 3-axis accelerometer: misura le accelerazioni in 3 direzioni
- Confrontando l'accelerazione misurata con quella di gravità si può misurare l'inclinazione rispetto alla verticale





# Sensori: posizione e velocità

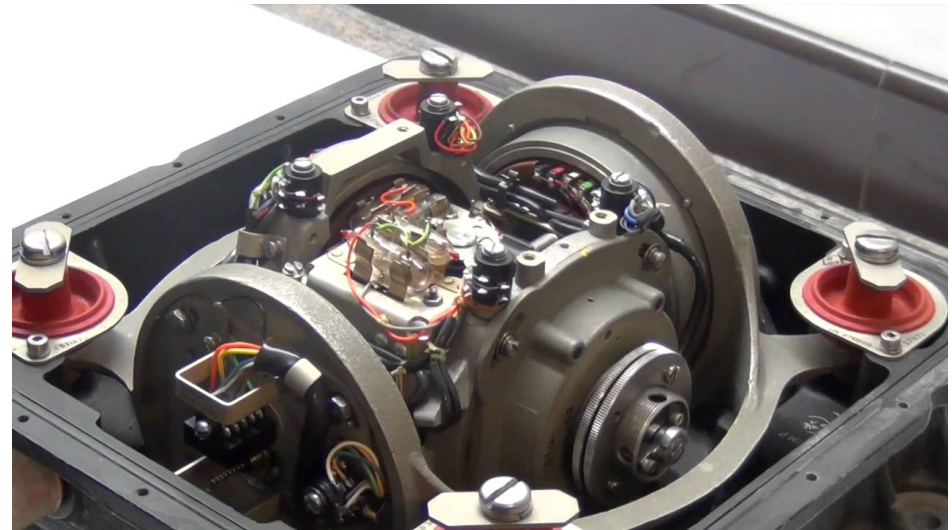
- La misura diretta della posizione di un osservatore è difficile
- Il sistema GPS usa la distanza da diversi satelliti per calcolare la posizione attraverso triangolazione
- Alcuni strumenti possono essere usati per calcolare la velocità relativa ad un mezzo (es. anemometri per velocità relativa all'aria)
- Infine si può utilizzare un accelerometro per stimare velocità e posizione integrando l'accelerazione  $x(t)$  nel tempo:

$$p(t) = p(0) + \int_0^t v(t) dt, \quad v(t) = v(0) + \int_0^t x(t) dt$$



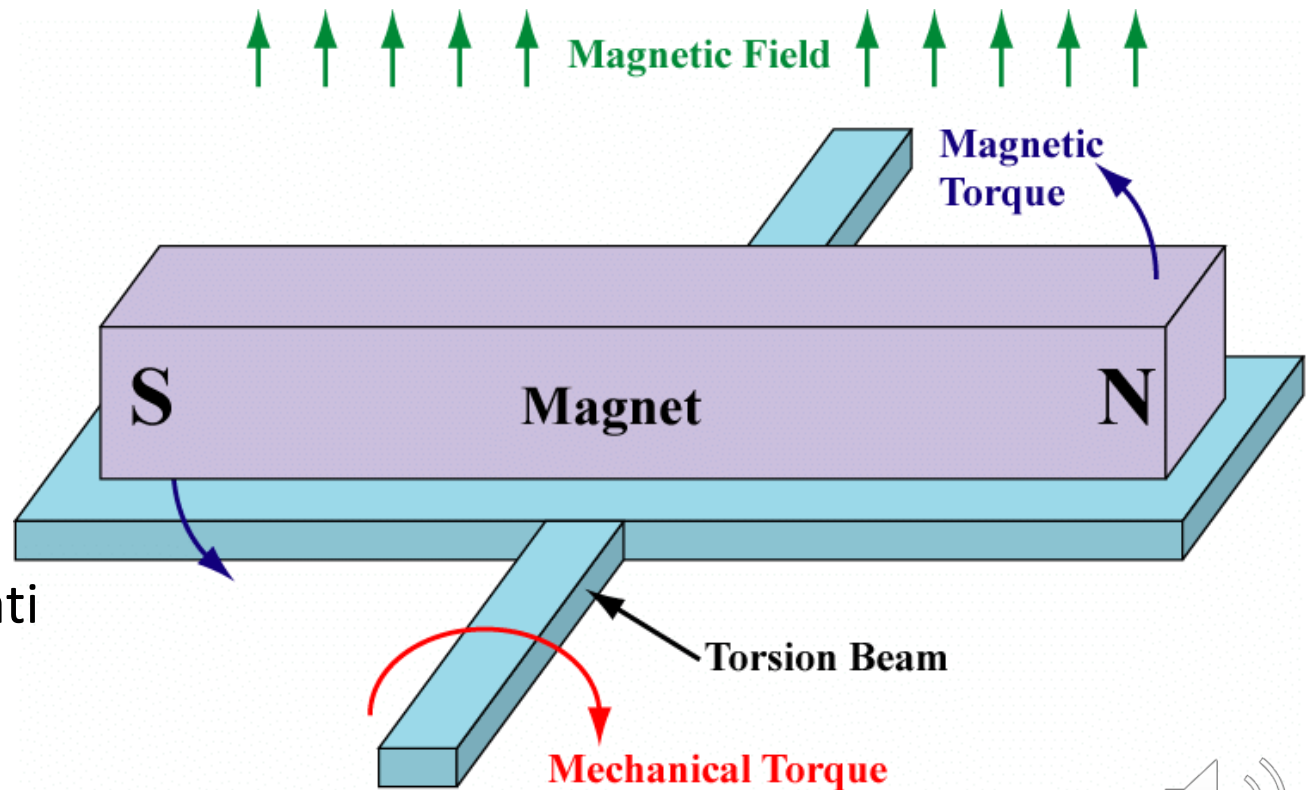
# Sensori: giroscopi

- Misurano velocità angolare di rotazione
- Funzionamento:
  - Elemento rotante che mantiene il suo orientamento (conservazione momento angolare)
  - Esistono altre tecnologie (MEMS, laser, quantistici)
- Giroscopi a 3 assi: misurano la velocità angolare lungo 3 direzioni
- integrando i dati di 3 giroscopi si può ottenere l'orientamento di un corpo rigido
- Grandi derive dell'orientamento usando giroscopi "comuni"
- Giroscopi e accelerometri sono usati in congiunzione per la navigazione inerziale



# Sensori: magnetometri

- Misurano la componente del campo magnetico ortogonale all'asse di torsione
- Magnetometri a 3 assi: misurano le componenti del campo magnetico lungo 3 direzioni
- I magnetometri, ipotizzando essere presente solo il campo magnetico terrestre, sono usati per limitare la deriva dei giroscopi "consumer"



# Sensori: IMU 9 assi

- Unione di
- accelerometro 3 assi
- giroscopio 3 assi
- magnetometro 3 assi
- si usa per navigazione “dead reckoning”

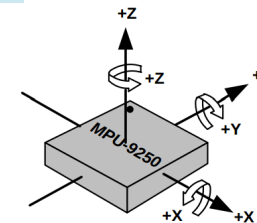
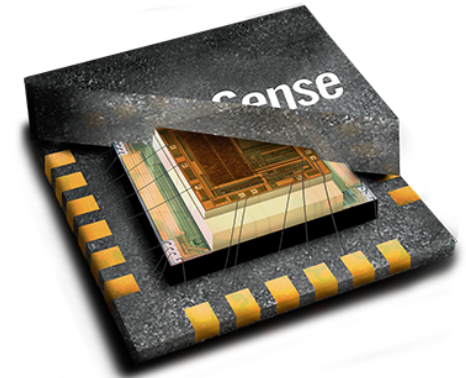


Figure 4. Orientation of Axes of Sensitivity and Polarity of Rotation for Accelerometer and Gyroscope

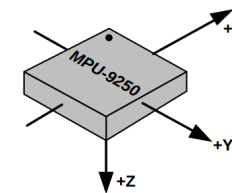


Figure 5. Orientation of Axes of Sensitivity for Compass



# Altri sensori

- Interruttori: possono misurare pressione, inclinazione, movimento
  - Il segnale può rimbalzare alla chiusura dell'interruttore
  - Ricordare di mettere resistenza di pull-up o pull-down!
- Potenzimetri: misurano angoli (esistono anche lineari)
- Termocoppie, termistori: misurano temperatura
- Microfoni: misurano cambiamenti nella pressione dell'aria (suono)
- Fotodiodi, CCD: misurano luce
- Altimetri, barometri, pressometri: misurano pressione
- Radar, ultrasuoni, LiDAR: misurano distanze



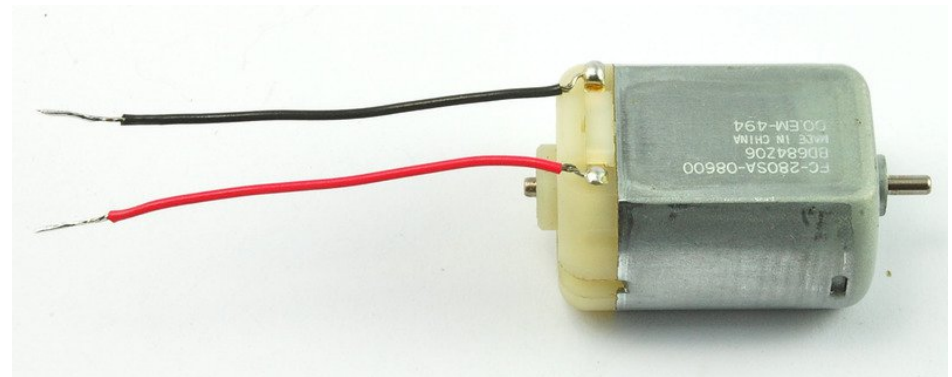
# Attuatori: Solenoidi lineari

- Semplici attuatori di movimento
- Basati sul campo magnetico prodotto dalla corrente che attraversa un avvolgimento e sposta una barra metallica
- Tipo push e tipo pull
- I solenoidi latching (o bistabili) mantengono lo stato allo spegnimento dell'alimentazione
- Ricordare diodo flyback per protezione elettrica!
- 2 posizioni stabili

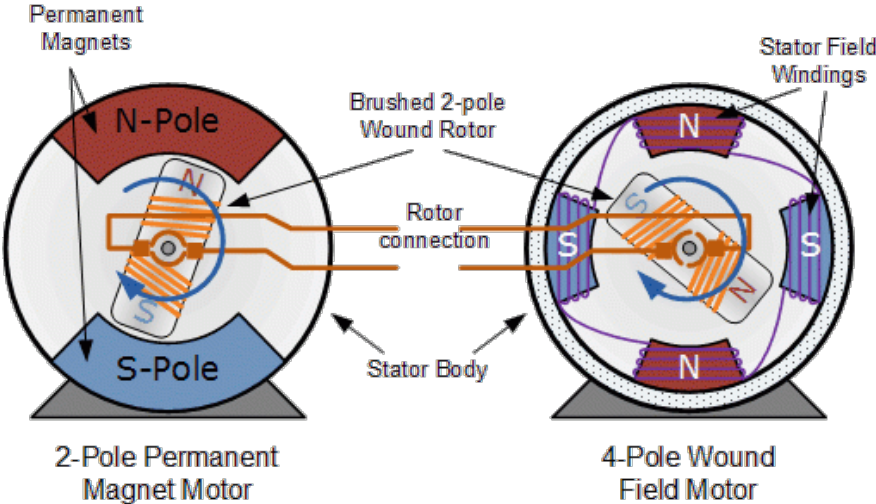
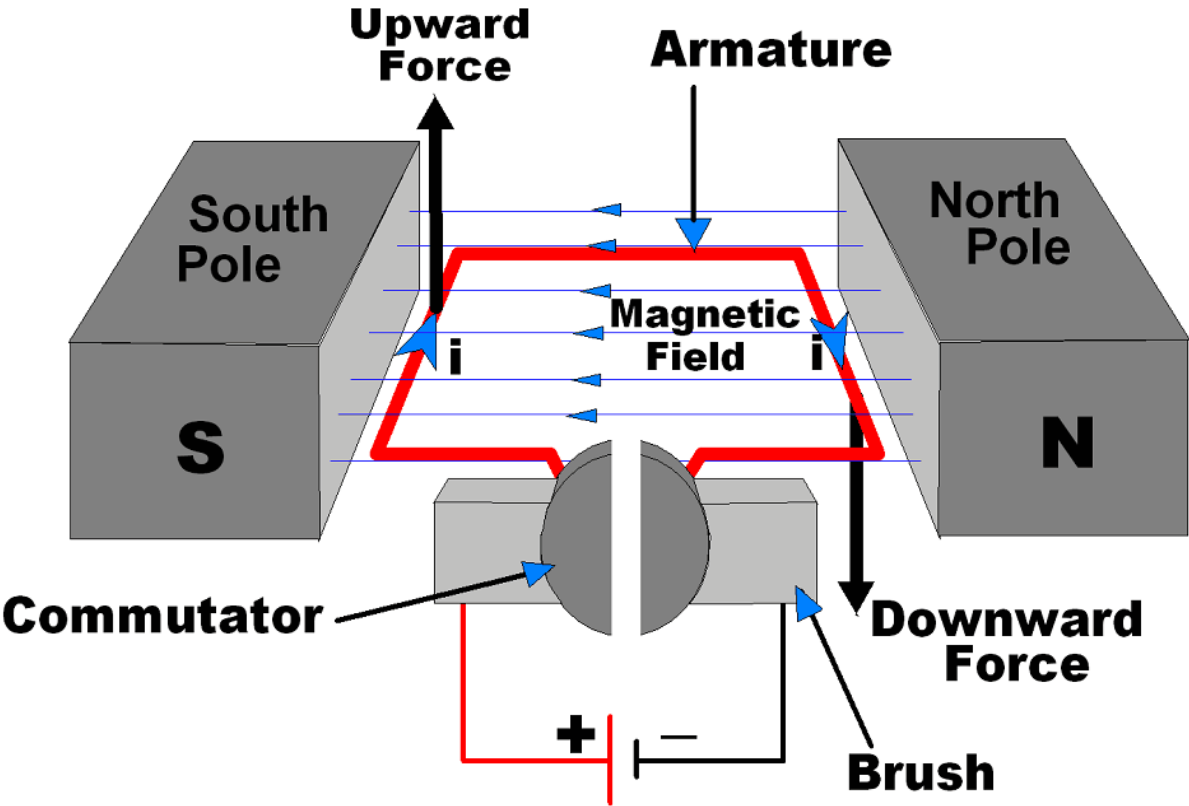


# Attuatori: motori DC (1)

- Utilizzati per produrre moto circolare
- Producono una coppia attorno all'asse di rotazione proporzionale alla corrente che attraversa il motore
- Comandati normalmente via PWM
- Carico induttivo



# Attuatori: motori DC (2)





# Attuatori: motori DC (3)

$$\begin{cases} v(t) = Ri(t) + L \frac{di(t)}{dt} + k_b \omega(t) \\ I \frac{d\omega(t)}{dt} = k_T i(t) - \eta \omega(t) - \tau(t) \end{cases}$$

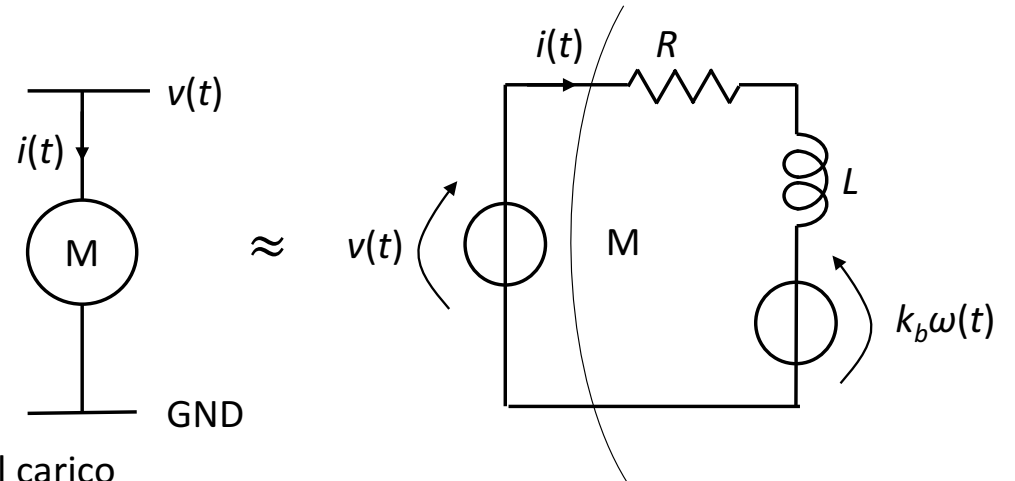
Costante di coppia del motore

Coppia resistente del carico

Forza controelettrica

Momento di inerzia del motore

Coefficiente attrito viscoso



Modello termico, applicato ad un ciclo di lavoro  
 Sensore temperatura avvolgimento



## Attuatori: motori DC (4)

- Con coppia di carico costante ed alimentazione  $V_{DD}$ , a regime il motore gira con velocità angolare costante pari a:

$$\omega = \frac{k_T}{k_b k_T + R\eta} V_{DD} - \frac{R}{k_b k_T + R\eta} \tau$$

- Velocità proporzionale alla tensione applicata
- Costante di proporzionalità dipende solo dalle caratteristiche del motore
- La velocità rispetto al motore scarico è:

$$\omega = \left(1 - \frac{R}{k_T V_{DD}} \tau\right) \omega_{SCARICO}$$



# Attuatori: motori

- motori elettrici, idraulici, a combustione interna, etc. etc.
- elettrici
  - DC a magneti permanenti
  - ad eccitazione esterna
  - brushless
  - a passo
  - asincroni
  - sincroni
  - induzione
  - etc etc

