

## Parte I

# Sensori e trasduttori

## 1 I sensori

I sensori, in un sistema di acquisizione dati, sono le interfacce fisiche tra i dispositivi di elaborazione dei segnali elettrici acquisiti in input e le corrispondenti grandezze fisiche da monitorare in funzione del tempo.

Un sensore è un dispositivo con la funzione di fornire in uscita un segnale elettrico, sotto forma di tensione o di corrente, del valore teoricamente proporzionale a quello della grandezza fisica in input che si desidera acquisire.

Per ottenere un segnale elettrico in uscita di un valore linearmente dipendente da una qualsiasi grandezza fisica (temperatura, pressione, forza, flusso luminoso, ecc..) in input, si utilizza il sensore, il cui funzionamento si basa sulla variabilità di una grandezza fisica elettrica, per esempio resistenza, capacità o induttanza, in funzione della grandezza fisica da misurare.

Si definisce caratteristica di trasferimento la curva che rappresenta l'andamento del segnale elettrico generato dal sensore in output in funzione della grandezza fisica che si considera. La caratteristica di trasferimento è il legame che è presente tra la variabile da misurare (ingresso) e il segnale elettrico di uscita del trasduttore. Nella pratica accade molto raramente che tale caratteristica di trasferimento corrisponda, anche approssimativamente, alla legge di proporzionalità diretta:

$$V = kG \quad (1)$$

Oppure:

$$I = kG \quad (2)$$

dove  $V$  è la tensione, mentre  $I$  è la corrente fornita dal sensore,  $k$  è una costante di taratura e  $G$  è la grandezza fisica da acquisire in input.

In modo generale la caratteristica di trasferimento si allontana, in modo più o meno pronunciato, dal modello ideale a causa di alcuni errori come l'errore di offset e l'errore di linearità. I trasduttori la cui caratteristica è una retta sono detti lineari. Il funzionamento ottimale di un trasduttore è definito da una caratteristica lineare. La linearità è il parametro che evidenzia la deviazione tra la retta (caratteristica teorica) e la curva reale. La non linearità è il valore massimo della deviazione rispetto alla curva teorica in valore assoluto riferito al valore massimo del segnale di uscita. Un sensore è buono quando la sua non linearità è inferiore allo 0.1

L'errore di offset è presente perché il segnale elettrico fornito in uscita è diverso da zero anche quando la grandezza fisica ha valore nullo. Questo avviene quando la retta non passa per l'origine la variabile d'uscita è diversa da zero in corrispondenza del valore nullo della variabile di ingresso. Supponendo che la caratteristica sia lineare:

$$V = V_{off} + kG \quad (3)$$

dove  $V_{off}$  è la tensione di offset,  $k$  è una costante di taratura e  $G$  è la grandezza fisica da acquisire in input. Si definisce offset il valore non nullo della variabile di uscita corrispondente al valore nullo della variabile d'ingresso. L'errore di linearità è il massimo scarto,

in valore assoluto, nel range nominale di funzionamento del sensore tra la caratteristica reale e la caratteristica ideale, dove per caratteristica ideale si intende la caratteristica lineare  $V$ , passante per gli estremi della caratteristica reale, nei punti  $(0, V_{off})$  e  $(F_{max}, V_{max})$ , dove  $F_{max}$  e  $V_{max}$  sono rispettivamente il valore massimo della grandezza fisica  $G$  ed il valore massimo della tensione  $V$  nel range nominale. Il range di funzionamento è l'intervallo dei valori che può assumere la grandezza fisica che deve essere trasdotta. Appena la grandezza fisica esce dal range il trasduttore non funziona più, e ritorna a lavorare appena rientra nell'intervallo. Il range di ingresso (o campo di ingresso) definisce i limiti entro cui può variare il segnale in ingresso; mentre il range di uscita (o campo di uscita) definisce i limiti entro cui può variare il segnale in uscita.

## 2 Tipi di sensori

I sensori si distinguono in base al principio di funzionamento:

1. sensori attivi, se forniscono direttamente un segnale elettrico, in tensione o in corrente, in funzione della grandezza fisica;
2. sensori passivi, se si utilizza la variabilità di una grandezza elettrica, per es. la resistenza, la capacità o l'induttanza, in funzione della grandezza fisica, per ottenere una tensione o una corrente, inserendo il sensore in un circuito di misura.

I sensori si distinguono in base al principio fisico utilizzato:

1. Resistivi: si basano sulla variabilità della resistenza elettrica in funzione degli sforzi meccanici, della temperatura, del campo magnetico, dell'intensità di illuminamento;
2. Piezoelettrici: si basano sul campo elettrico generato nei cristalli piezoelettrici da sforzi meccanici di trazione, compressione o taglio;
3. Termoelettrici: si basano sulle forze elettromotrici termoelettriche generate per effetto Seebeck da giunzioni metalliche mantenute a temperature diverse dette termocoppie;
4. Fotovoltaici: si basano sulle forze elettromotrici generate per effetto fotovoltaico da una giunzione semiconduttrice PN, colpita da radiazioni infrarosse, visibili, ultraviolette, X,  $\gamma$  o da particelle cariche;
5. Fotoelettrici: si basano sulla fotocorrente che si ottiene, per effetto fotoelettrico, nelle celle fotoelettriche a vuoto, nei fotodiodi e nei fototransistor;
6. Ad effetto Hall: si basano sulle forze elettromotrici generate in particolari materiali, generalmente semiconduttori, percorsi da corrente e sottoposti a campi magnetici;
7. Capacitivi: si basano sulla variabilità della capacità elettrica di un condensatore in funzione dell'umidità o della costante dielettrica dell'isolante posto tra le armature;
8. Induttivi: si basano sulla variabilità dell'induttanza di un avvolgimento dotato di un nucleo ferromagnetico estraibile;
9. Elettromagnetici: si basano sulla legge dell'induzione elettromagnetica.

10. A riluttanza variabile: si basano sulla variabilità della riluttanza di un circuito magnetico dotato di parti mobili;
11. Potenzimetrici: si basano sulla variabilità della tensione fornita da un partitore potenzimetrico regolabile in funzione dello spostamento del cursore;
12. Piezoacustici e ultrasonici: si basano sulle forze elettromotrici piezoelettriche generate da particolari materiali ceramici sottoposti ad onde meccaniche;
13. Elettrochimici: si basano sui potenziali elettrochimici generati da celle elettrolitiche speciali, costituite da coppie di elettrodi sensibili a determinati ioni o radicali chimici, oppure sulla variabilità della conducibilità di particolari materiali in presenza di gas o vapori;
14. Biologici: si basano sulle forze elettromotrici generate da celle elettrolitiche speciali in presenza di enzimi o di altre biomolecole.

### 3 Classificazione dei sensori

La classificazione dei sensori viene fatta in base alle caratteristiche fisiche:

1. resistivi: sfruttano la variazione della resistenza (fotoresistori, termoresistori, sensori di posizione);
2. capacitivi: sfruttano la variazione della capacità di un condensatore (sensori di umidità);
3. elettroacustici: convertono segnali sonori in grandezze elettriche (microfoni);
4. elettrodinamici: si basano sul principio della forza elettromotrice per misurare velocità (dinamo tachimetrica);
5. elettromagnetici: utilizzano il principio dell'induttanza elettrica per rilevare angoli di rotazione;
6. magnetostritivi: si fondano sul principio della permeabilità;
7. piezoelettrici: sfruttano l'originarsi di una polarizzazione elettrica su facce opposte di cristalli sottoposti a sollecitazioni (stress) fisiche;
8. semiconduttore: sfruttano le caratteristiche della giunzione dei semiconduttori (fotodiodi, fototransistor).

### 4 I trasduttori

Il trasduttore è un dispositivo in grado di trasformare le variazioni di una grandezza fisica, normalmente non elettrica, in un'altra grandezza, normalmente di natura elettrica (tensione, frequenza o corrente). E' composto da due parti: sensore e convertitore, un circuito elettronico che trasforma le variazioni di un parametro del sensore in una variazione di una grandezza elettrica.

## 5 Tipi di trasduttori

I trasduttori sono di due tipi:

1. Analogico: quando il suo segnale di uscita è una grandezza elettrica che varia in modo continuo mantenendo una doppia corrispondenza con il valore della grandezza misurata;
2. Digitale: quando il suo segnale di uscita è composto da uno o più segnali digitali che possono assumere ciascuno solo due livelli di tensione identificati come 0 e 1;

Inoltre i trasduttori possono essere:

1. Attivi: Quando forniscono in uscita un segnale direttamente utilizzabile da circuiti di elaborazione senza nessun consumo di energia elettrica, è il caso delle celle fotovoltaiche e delle termocoppie;
2. Passivi: Sono quei trasduttori ai quali bisogna fornire energia elettrica perché la grandezza fisica d'uscita possa essere trasformata in una grandezza elettrica.

## Parte II

# Parametri caratteristici

## 6 La sensibilità

La sensibilità è il rapporto tra la variazione della grandezza di uscita e la variazione della grandezza d'ingresso che la provoca.

$$S = \Delta U / \Delta I \quad (4)$$

Più il coefficiente angolare della retta è elevato più il trasduttore è sensibile e minore sarà il range di funzionamento. Lo strumento risulterà essere molto sensibile quando a parità di grandezza di ingresso la grandezza di uscita è molto elevata. Tempo di risposta è il tempo che il trasduttore impiega per raggiungere in uscita il valore di regime corrispondente al valore d'ingresso.

## 7 La risoluzione

La risoluzione è il rapporto percentuale tra la minima variazione della grandezza di uscita in grado di essere rilevata e il valore massimo del fondo scala. La risoluzione  $R$  esprime la variazione minima di uscita rispetto al fondo-scala:

$$R = \Delta X_{out_{min}} / \Delta X_{out_{fondoscala}} \quad (5)$$

## 8 La riproducibilità

La riproducibilità è la capacità di un sensore di fornire sempre gli stessi valori di uscita in corrispondenza dell'ingresso. Vale a dire la costanza nel tempo delle caratteristiche del trasduttore (la sua resistenza all'invecchiamento).

## 9 L'accuratezza

Nel funzionamento reale il sensore descrive una caratteristica che si discosta dalla funzione ideale. Per tenere in conto la mancata accuratezza del dispositivo occorre misurare le deviazioni esistenti fra i valori reali e i valori ideali. Le caratteristiche di affidabilità in un sensore sono relazionate alla sua vita utile ed a possibili cause di mal funzionamento nel sistema in cui è inserito. Infatti è la capacità del sensore di espletare la funzione per cui è stato costruito in condizioni prestabilite e per un tempo fissato; questo parametro è espresso in termini statistici come la probabilità che il dispositivo funzioni per un tempo o per un numero di cicli specificato. Solo di rado esso è specificato dai costruttori.

## 10 Il drift

Modifica temporale imprevedibile delle caratteristiche del sensore. In pratica, la curva di risposta si modifica col tempo per cui, nella stima del misurando si introduce un errore che cambia (in genere cresce col tempo). Il drift definisce il tempo di vita della calibrazione del sensore, cioè dopo quanto tempo usare la stessa curva di risposta da luogo ad errori sul misurando non tollerabili. Il problema della variazione della curva di risposta del sensore nel tempo si risolve calibrandolo ogni tanto – I sensori (tutti) hanno un drift, cioè la loro risposta varia nel tempo:

- Un ottimo, seppur raro, controllo di qualità consiste nel tenere ogni sensore sotto continua osservazione per un lungo periodo (4-6 mesi), durante il quale il sensore viene continuamente ricalibrato per verificarne la stabilità. Solamente così è possibile verificare l'effettiva stabilità nel tempo del comportamento di ogni singolo sensore;
- I costruttori di sensori ad alta precisione, come Sea-Bird, seguono questa pratica, e scartano i sensori che non dimostrano una buona stabilità durante il periodo di valutazione – In funzione della tecnologia alla base del sensore e della sua costruzione la variazione può essere casuale o lineare e modellabile;
- Variazioni casuali della risposta del sensore richiedono frequenti calibrazioni per avere misure affidabili;
- Variazioni lineari e modellabili consentono calibrazioni meno frequenti – Tra calibrazioni successive si utilizzano termini interpolati;

## Parte III

# Aspetti legati all'acquisizione e al trattamento dei segnali, sia analogici che digitali, provenienti da sensori

## 11 Il segnale

Si definisce segnale la variazione di una qualsiasi grandezza fisica in funzione del tempo. In generale possiamo affermare che un segnale, sotto opportune ipotesi, può essere descritto matematicamente da una funzione continua. Le onde di volume viaggiano all'interno della terra e seguono le leggi dell'ottica geometrica. Vi sono due tipi principali di onde di volume:

1. Onde P: (prime) onde di compressione e rarefazione in cui l'oscillazione delle particelle di materia avviene parallelamente alla direzione di propagazione dell'onda;
2. Onde S: (seconde o di taglio) in cui l'oscillazione delle particelle avviene perpendicolarmente alla direzione di propagazione dell'onda.

I Segnali Possono essere di 3 tipi:

1. Continui o Analogici: quando il loro valore può essere misurato in ogni istante. L'aggettivo 'analogico' è usato in relazione al fatto che la loro forma in uscita da un sistema è analoga a quella in ingresso.
2. Discreti: quando il loro valore può essere misurato solo in determinati istanti di tempo.
3. Digitali: quando si tratta di segnali discreti la cui ampiezza è associata ad un numero che ne rappresenta il valore in quell'istante. In genere per esprimere il numero viene usata, per semplicità, la base numerica binaria 0,1.

La teoria dei segnali si suddivide in due grandi branche a seconda del tipo di segnale in esame:

1. Segnali deterministici: quando è possibile prevedere con certezza il suo valore ad un istante assegnato una volta conosciuti pochi parametri. Per esempio: una senoide di cui sia conosciuta l'ampiezza, la frequenza, e la fase ad un istante dato è un segnale deterministico. Purtroppo i segnali deterministici non esistono nella realtà, in quanto ogni segnale fisico reale possiede una certa indeterminazione per cui il suo valore non può essere mai previsto con infinita esattezza: risultano però una buona approssimazione in molti casi pratici.
2. Segnali aleatori: quando è solo possibile prevedere solamente la probabilità che il segnale assuma un certo valore ad un dato istante. Un segnale aleatorio viene definito completamente da due funzioni: la densità di probabilità e la funzione di correlazione. La prima restituisce la probabilità che il segnale assuma un valore dato, la seconda fornisce una relazione tra i valori del segnale a istanti di tempo diversi.

I casi più importanti dei segnali aleatori sono quelli in cui la distribuzione del segnale è gaussiana e quello in cui il valore del segnale ad un dato istante non è correlato a quello degli istanti precedenti e successivi. Esso prende il nome di rumore bianco.

## 12 Lettura del segnale

Per leggere un segnale bisogna utilizzare un trasduttore. Le caratteristiche importanti che un trasduttore deve possedere sono:

- l'ampiezza del segnale in uscita;
- la sensibilità, ovvero il minimo valore misurabile;
- la velocità di risposta, ovvero il tempo impiegato dal sensore per fornire una risposta costante dopo una brusca variazione della grandezza da misurare.

Da quest'ultima caratteristica dipende dalla banda passante, ovvero la massima frequenza di variazione del segnale a cui il sensore è in grado di funzionare. Un trasduttore è uno strumento di misura, pertanto la tensione fornita sarà affetta da una piccola componente casuale, che porterà la misurazione a fluttuare intorno al valore medio. Si schematizza questo fenomeno considerando il segnale prodotto dal trasduttore come la somma di una parte proporzionale al segnale vero e proprio che si intende misurare, e da un segnale aleatorio, il rumore bianco. Le cause delle fluttuazioni (o sorgenti di rumore) sono molteplici ad esempio:

- la temperatura (rumore termico);
- la quantizzazione della carica dell'elettrone;
- i campi elettrici presenti nelle vicinanze dell'apparecchio (la linea a 50 Hz);
- le vibrazioni meccaniche;
- ...

Ulteriore rumore verrà introdotto quando il segnale prodotto dal trasduttore verrà trasportato lungo una linea elettrica, o amplificato, o comunque manipolato. Per permettere ad un calcolatore di elaborare un segnale, bisogna dapprima convertirlo in un segnale di tipo elettrico. In questo modo è possibile inviare il segnale ad una scheda di acquisizione che trasforma il segnale in una tabella di numeri binari interi, gli unici in grado di essere elaborati dal calcolatore, che poi l'utente leggerà come numeri decimali, dopo una appropriata conversione. Si rendono quindi necessarie due distinte operazioni sul segnale:

- la discretizzazione: consiste nel misurare l'ampiezza del segnale ad intervalli di tempo fissati;
- la quantizzazione: consiste nella trasformazione dei valori misurati in numeri interi binari.

IMMAGINE DA CERCARE Schema a blocchi di un convertitore A/D (analogico digitale) Campionatore -> Quantizzatore -> Codificatore Il processo di conversione A/D, che trasforma il segnale originario in una sequenza di bit 0,1, è noto come tecnica PCM (Pulse Code Modulation o Modulazione impulsiva codificata). Gli A/D convertono i valori di tensione in ingresso nel numero corrispondente espresso in binario.

## 13 Campionamento o discretizzazione

La discretizzazione consiste nel misurare l'ampiezza del segnale ad intervalli di tempo fissati. Sia  $\Delta T$  l'intervallo di tempo tra due misure successive: la discretizzazione genera un vettore  $x$  di dimensione  $n$ . È evidente che l'intervallo di tempo  $\Delta T$  deve essere sufficientemente piccolo da riuscire ad individuare anche piccole variazioni di segnale. L'inverso dell'intervallo  $\Delta T$  si chiama frequenza di campionamento ed indica quante volte al secondo viene misurata l'ampiezza del segnale.

## 14 Quantizzazione

La quantizzazione consiste nella trasformazione delle ampiezze misurate in numeri interi binari ad  $N$  bit. Supponiamo che la scheda di acquisizione accetti in ingresso una tensione positiva al massimo di  $V_0$  volt. Il numero di intervalli che si possono ottenere con  $N$  bit è dato da  $2^N$ , il doppio. Allora il modo più efficiente di convertire il segnale è di dividere l'intervallo  $V_0$  in  $2^N$  sezioni, ciascuna di spessore  $V_0/2^N$ . Dopo di che bisogna assegnare ad ognuna di queste sezioni un numero binario ad  $N$  bit. Quando il segnale cade in una di queste sezioni, gli viene assegnato il numero binario corrispondente. Così facendo si commette in ogni misura al massimo un errore pari a metà dello spessore della sezione,  $V_0/2^N + 1$ . La minima variazione rilevabile del segnale in ingresso risulterà essere  $V_0/2^N$ . Ora si suppone che il trasduttore produca in uscita un segnale compreso tra un massimo  $V_{max}$  ed un minimo  $V_{min}$ . Visto che la precisione con cui viene quantizzato il segnale dipende solamente dalle caratteristiche della scheda di acquisizione, per ottenere la massima risoluzione è necessario che  $V_{max}$  e  $V_{min}$  rientrino all'interno dell'intervallo permesso dalla scheda di acquisizione e che vi si adattino al meglio.

A questo scopo è necessario amplificare o attenuare il segnale fornito dal trasduttore, ed eventualmente fornire una tensione aggiuntiva per evitare valori negativi. Queste operazioni costituiscono l'esempio più semplice del cosiddetto **condizionamento del segnale**, che può prevedere anche un filtraggio, la sottrazione di una componente continua, etc. Molte di queste operazioni vengono effettuate automaticamente dalla scheda di acquisizione stessa. Supponiamo di voler campionare una sinusoidale di frequenza  $f_0$ . Intuitivamente, per riuscire ad ottenere un campionamento che rappresenti realisticamente il segnale dobbiamo essere in grado di misurare almeno due volte l'ampiezza del segnale all'interno di un periodo, in modo tale da riuscire ad evidenziare come il segnale oscilla e cambi di segno. Quindi la frequenza di campionamento minima per riuscire a ricostruire il segnale è pari al doppio della frequenza  $f_0$ . In altre parole, se il segnale viene campionato ad una frequenza  $f_s$ , allora sarà possibile campionare correttamente solo i segnali di frequenza minore di  $f_N = f_s/2$ . La frequenza  $f_N$  così definita viene definita **frequenza di Nyquist**. Un segnale con una certa frequenza, se campionato con una frequenza leggermente superiore, appare con una frequenza molto più bassa di quella reale. Il fenomeno per cui le frequenze maggiori della frequenza di Nyquist vengono riconosciute come frequenze inferiori è detto **aliasing**. Per evitare l'aliasing si utilizza un filtro passo basso, che elimina tutte le frequenze superiori a un certo valore (la metà della frequenza di campionamento). Il valore è detto frequenza di cut-off. Sono necessari almeno due campioni per periodo del segnale:



1. La frequenza di campionamento deve essere almeno il doppio della max frequenza presente nel segnale;
2. La frequenza di Nyquist.

## Parte IV

# Funzioni

La quantizzazione è un processo non-lineare, ed a differenza del processo di campionamento, non è reversibile, indi per cui non è possibile ricostruire i valori reali assunti originariamente dalla grandezza fisica. La quantizzazione è dunque una fonte di distorsione. Una volta che il segnale è stato campionato, deve essere quantizzata anche l'ampiezza dei valori campionati. Un quantizzatore si occupa di associare ad un range di valori d'ingresso un unico valore di uscita. Questo deve avvenire in quanto, in un segnale analogico, il range di valori tra due estremi è infinito mentre nel mondo digitale solo un certo numero di valori potrà essere rappresentato. La quantizzazione può essere di tipo scalare (SQ) oppure vettoriale (VQ). Nella SQ, ciascun campione viene quantizzato singolarmente, mentre nella VQ vengono quantizzati congiuntamente blocchi di campioni. A sua volta i modi secondo cui il quantizzatore può operare sono diversi, i più comuni sono la quantizzazione uniforme e la quantizzazione a minimo errore quadratico medio.

## 15 Uniforme

Nel caso di quantizzazione uniforme, il gradino  $\gamma$  di quantizzazione è uniforme cioè sempre della stessa ampiezza. Questo gradino (detto anche passo di quantizzazione) viene determinato a partire dalla massima dinamica del segnale di ingresso e dal numero di bit che abbiamo a disposizione. Definiamo come  $R = [x_{max}, x_{min}]$  il range dinamico del segnale di ingresso e come  $n$  il numero di bit così da ottenere  $\gamma = R/2^n$ . Ovviamente agendo in questo modo la quantizzazione introduce un errore, detto errore di quantizzazione. In correlazione all'errore di quantizzazione possiamo tenere in considerazione il rapporto tra segnale e rumore di quantizzazione detto SQNR. Esso rappresenta un indice di qualità relativo alla quantizzazione e l'errore di quantizzazione che, inevitabilmente si ottiene quantizzando il segnale campionato. E' possibile dimostrare che questo rapporto aumenta di 6 dB per ogni bit aggiuntivo a disposizione della quantizzazione. Questo è intuitivo perché aumentando il numero di bit a disposizione per la quantizzazione, il passo  $\gamma$  diventa più piccolo ed il segnale analogico può venire quantizzato in maniera più precisa. Per la descrivere un segnale continuo abbiamo bisogno una sequenza più lunga di valori discreti, e quindi sarà maggiore il numero di bit usati e maggiore sarà l'accuratezza della descrizione. Di conseguenza più gradini ci sono minore sarà l'errore di quantizzazione.

Quantizzazione uniforme Il risultato della quantizzazione è una funzione continua spezzata di intervalli  $\gamma$  uguali. Tecnica standard dei costruttori dei convertitori A/D e D/A. L'SQNR è il rapporto tra l'ampiezza max segnale e l'ampiezza media errore di quantizzazione. L'ampiezza media errore di quantizzazione è costante e indipendente dall'ampiezza. Inoltre non c'è correlazione tra il segnale e la digitalizzazione. Con il PCM lineare l'SQNR diventa minore con l'ampiezza dei segnali deboli degradati. Uniforme: intervalli

equi-spaziati. Le regioni di quantizzazione possono essere "spaziate", di meno per ampiezze deboli, oppure, di più per ampiezze elevate (portando con se un maggiore errore di quantizzazione). La quantizzazione non uniforme slega SQNR e gamma dinamica.