

I Sensori e gli Attuatori

PARTE PRIMA : I SENSORI TRADIZIONALI

Quaderni di elettronica
GUERINO MANGIAMELE

I Sensori e gli Attuatori

Parte Prima : Sensori

Sommario

Definizioni generali	2
Grandezze ANALOGICHE e DIGITALI	4
Classificazione dei sensori	5
Parametri caratteristici di un sensore	5
Grandezze fisiche da rilevare e tipologia di sensori adottabili	7
Sensori di luminosità	8
Fotoresistenze	8
Fotodiodi e fototransistor	9
Fotodiodo	9
Fototransistor	10
Celle fotovoltaiche	11
SENSORI DI Temperatura	12
Il termostato	12
Termoresistenze e termistori	13
Termoresistenze RTD	15
Termocoppie	16
Sensori Forza Pressione Peso	17
Sensori estensimetrici (strain gauge)	17
Celle di carico	19
Sensori di posizione (di spostamento o rotazione)	20
Encoder	21
Sensore di prossimità	25
Sensori di suono	26
Il Microfono	26

Definizioni generali

I sensori e gli attuatori, e più in generale i trasduttori sono i componenti elettrici o elettronici che permettono ai sistemi elettronici di rilevare ed agire sui parametri fisici con i quali noi abbiamo costantemente a che fare nella nostra vita quotidiana.

- Si definisce **SENSORE** un dispositivo che trasforma una grandezza fisica in una grandezza elettrica.
- Si definisce **ATTUATORE** un dispositivo che trasforma una grandezza elettrica in una grandezza fisica
- Si definisce **TRASDUTTORE** un dispositivo elettrico o elettronico più complesso che contiene un sensore più un circuito di interfaccia
- Si definisce **SISTEMA ELETTRONICO** un circuito elettronico in grado di trattare ed elaborare le grandezze elettriche.

2

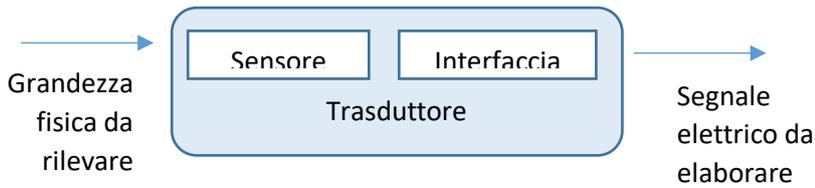
Le grandezze fisiche principali con le quali in ogni momento noi interagiamo, quindi la luce, il suono, la temperatura, il movimento, la forza e naturalmente il gusto e l'olfatto, sono acquisite dai nostri "sensori" : gli occhi, le orecchie, il tatto...

E' opportuno infatti ricordare che il nostro sistema visivo, acustico, olfattivo, in fondo altro non è che un insieme di organi e tessuti che trasformano la grandezza fisica in impulsi elettrici da inviare al cervello.

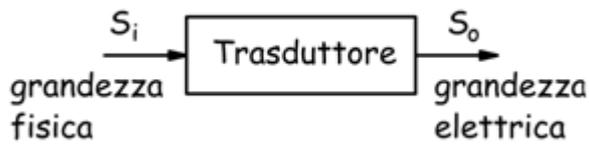
Viceversa, gli impulsi elettrici generati da una elaborazione del nostro cervello servono essenzialmente a comandare i muscoli, che svolgono la funzione di **ATTUATORE**, in grado di esercitare, per esempio una forza o un movimento.

Sappiamo che le grandezze elettriche principali sono invece rappresentate dalla tensione, dalla corrente, dalla resistenza, dalla capacità, dall'induttanza.... e, quindi i sensori elettrici, per permettere una interazione con il mondo fisico, devono essere capaci di trasformare il fenomeno fisico in una grandezza elettrica riconoscibile da un sistema elettronico.

Spesso nella normale terminologia, i sensori vengono chiamati Trasduttori, ma questi generalmente hanno un significato più esteso che fa riferimento ad un sistema complesso di cui fanno parte sia i sensori che i circuiti di interfaccia.



Nel seguito verranno comunque utilizzati indifferentemente i termini “sensore” o “trasduttore” per indicare un dispositivo che si interfaccia da un lato con il sistema fisico da controllare e dall’altro con un sistema elettrico/elettronico di controllo. Spesso, nella terminologia anglosassone, anche gli attuatori vengono intesi come trasduttori .



I sensori/trasduttori rappresentano comunque sempre il primo elemento della catena di acquisizione digitale:

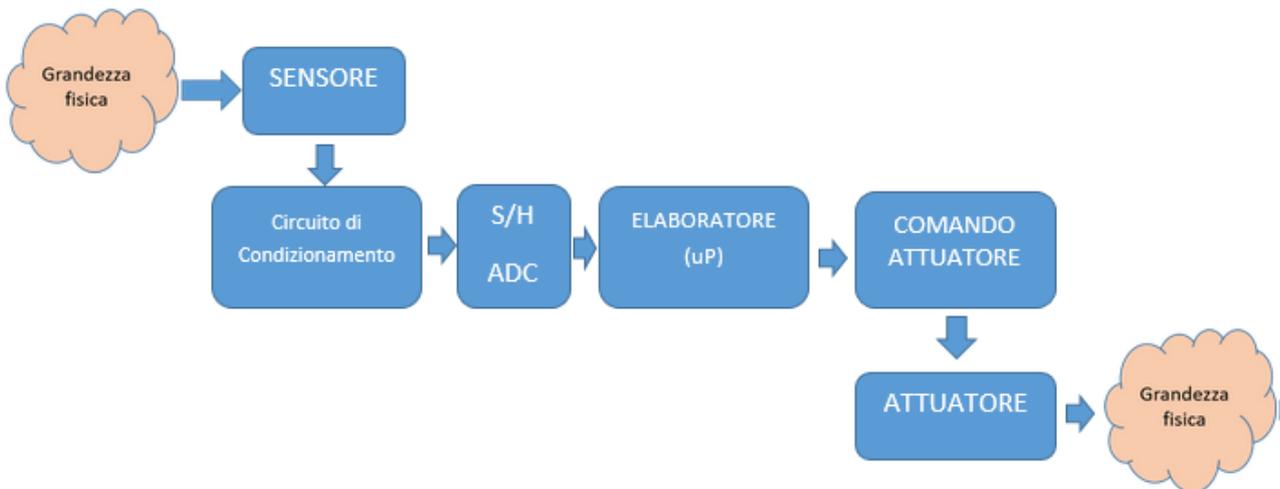


Figura 1 Schema a Blocchi generale di un sistema elettronico

Esistono trasduttori per misurare la gran parte delle grandezze fisiche come: temperatura, umidità, posizione, velocità, accelerazione, forza, pressione, luminosità, gas, suono, campo magnetico.

Grandezze ANALOGICHE e DIGITALI

I nostri sensi, "sentono" in maniera analogica in quanto in grado di acquisire infinite sfumature della grandezza fisica. Per esempio, siamo in grado di riconoscere il buio dalla "poca luce" o dalla "molta luce" oppure distinguere il freddo dal tiepido, dal caldo, o dal molto caldo .

Contrariamente, I sistemi elettronici parlano e riconoscono solo il linguaggio digitale, ossia quello binario.

4

- Una grandezza **analogica** è un parametro che "**varia con continuità nel tempo e può assumere infiniti valori** " , cioè per passare da un valore all'altro , per esempio da temperatura 10°C a temperatura 20°C, il valore dovrà assumere, sia pure per un solo istante, tutti gli infiniti valori intermedi.
- Una grandezza **digitale** invece è una grandezza discreta che **può assumere solo 2 valori** (vero, falso, 0, o 1, acceso o spento ...) . Ciò significa quindi che un segnale digitale produce solo valori discreti (non continui) che possono essere emessi come un singolo "bit", (trasmissione seriale) o combinando i bit per produrre un'unica uscita "byte" (trasmissione parallela).

Quindi se dobbiamo trasferire e far riconoscere ad un sistema elettronico di controllo che comprende solo il linguaggio digitale binario, i parametri fisici con i quali noi esseri viventi conviviamo continuamente, dobbiamo dapprima trasformare la grandezza fisica analogica in una grandezza elettrica analogica e poi trasformare, per mezzo di convertitori Analogici/digitali, la grandezza elettrica analogica in una grandezza elettrica digitale composta solo da due livelli di tensione. .

E' opportuno comunque evidenziare che nella moderna elettronica, i sistemi di rilevazione a sensori, sono costituiti da circuiti integrati più o meno complessi e molto spesso programmabili che contengono tutto il necessario per la rilevazione e per la trasmissione del segnale acquisito verso il microprocessore. In un unico circuito vengono integrati a costi spesso irrisori, sia il trasduttore vero e proprio che tutta l'elettronica necessaria al condizionamento, alla conversione e alla gestione di invio dati al microprocessore, per mezzo di specifici protocolli standard (I²C, SPI o wireless ...)

Nella normale terminologia vengono classificati come **AFE** (Analogic Front End).

Classificazione dei sensori

- ✓ **Sensori primari**, che convertono direttamente la grandezza fisica in ingresso in una grandezza elettrica.
- ✓ **Sensori secondari** che trasformano preventivamente la grandezza fisica in ingresso in un'altra grandezza fisica, rilevabile attraverso un ulteriore sensore primario.
- ✓ Esistono sensori (o Trasduttori) di tensione, di corrente, di capacità,
- ✓ Si dicono attivi i sensori che generano un segnale in corrente o tensione (termocoppie).
- ✓ Si dicono passivi i sensori che producono in uscita una variazione di un parametro elettrico come resistenza, capacità etc..(potenziometri, estensimetri, termistori..).

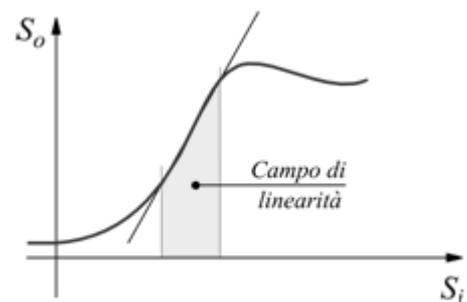
Un ulteriore criterio di classificazione si riferisce la tipo di segnale prodotto.

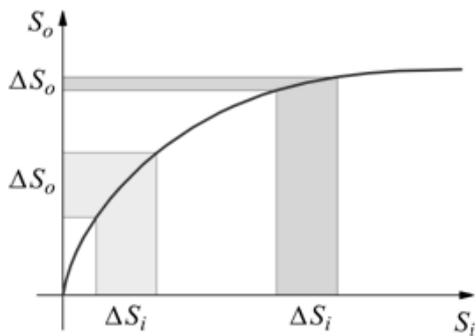
I sensori o trasduttori analogici hanno un segnale di uscita che segue con continuità le variazioni della variabile fisica in ingresso.

I sensori o trasduttori digitali forniscono in uscita il valore della variabile da controllare tramite un codice binario ad n bit (ad es.encoder).

Parametri caratteristici di un sensore

Per la valutazione delle caratteristiche statiche di un trasduttore (o sensore) è fondamentale lo studio della caratteristica di trasferimento (trasferimento), grafico che riporta la relazione (funzione) fra la variabile di ingresso e quella di uscita. Generalmente il sensore viene utilizzato dove la caratteristica è lineare in modo che vi sia un legame di proporzionalità diretta o inversa fra ingresso e uscita .





La SENSIBILITA' è un altro parametro importante; viene espresso come:

$$S = \frac{\Delta S_o}{\Delta S_i}$$

cioè il rapporto fra la variazione del segnale di uscita e quella del segnale di ingresso.

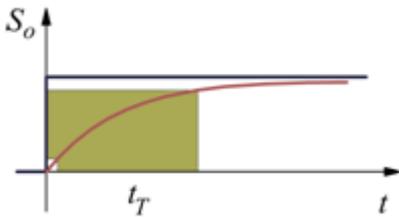
Altri parametri che vengono tenuti in considerazione nell'utilizzo dei sensori sono

la RISOLUZIONE intesa come la più piccola variazione del segnale di uscita esprimibile come una percentuale del valore di fondo-scala.

La RIPETIBILITA', cioè la capacità del sensore di fornire sempre la stessa uscita quando in momenti diversi si ha lo stesso valore in ingresso.

La RISPOSTA IN FREQUENZA indica come risponde il sensore quando all'ingresso viene applicato un segnale sinusoidale a frequenza variabile.

Il TEMPO DI TRANSIZIONE che fornisce il tempo necessario al sensore affinché il segnale in uscita si stabilizzi al valore da rilevare.



Il tempo di transizione (tempo di salita) è l'intervallo di tempo necessario all'uscita per passare dal 10% al 90% del valore finale a regime.

Grandezze fisiche da rilevare e tipologia di sensori adottabili

Grandezza analogica da rilevare	Sensore	Attuatore
Luminosità	Fotoresistenza (LDR) Fotodiode Fototransistor Cella solare	Lampade Led e Display Fibra ottica
Temperatura	Termoresistenza Termistore Termocoppia Termostato Infrarosso pirometrici	Riscaldatori resistivi Ventilatore Lampade infrarosso
Forza/Pressione	Estensimetro (strain gauge) Capacitivo Celle di carico Interruttore di pressione	Elettromagnete Motore Freni
Posizione/distanza movimento Rotazione	Potenziometro Encoder Fotocellule Accelerometro Giroscopio Radar Tof Estensimetri resistivi Ultrasuoni Infrarossi Induttivi –Capacitivi – Proximity Magnetici - Hall	
Velocità	Generatore tachimetrico Fotocellule Sensori ad effetto doppler Accelerometro	Motori AC DC Motori passo passo
Presenza	Ultrasuoni Infrarossi Induttivi –Capacitivi – Proximity Magnetici - Hall	
Suono	Microfono a condensatore Microfono ad induzione Cristalli piezoelettrici	Altoparlant Campanello
Gas /qualità dell'aria	Resistivi/ semiconduttori	
Flusso in condutture	Fotocellule Magnetici - Hall	
Campo elettrico	Capacitivi – Antenne risonanti	
Campo Magnetico	Induttivi Effetto Hall	

Come si nota, per ciascuna grandezza fisica da rilevare ed acquisire, esistono innumerevoli tipologie di sensori da poter utilizzare. Questi variano per sensibilità, linearità, campo di utilizzo, ecc..

Nel seguito vedremo solo alcune tipologie di sensori relative alle grandezze fisiche principali, con le quali noi siamo costantemente a contatto.

Sensori di luminosità

I sensori di luce sono dispositivi fotoelettrici che convertono l'energia luminosa (fotoni) sia visibile che a infrarossi in un segnale elettrico (elettroni)

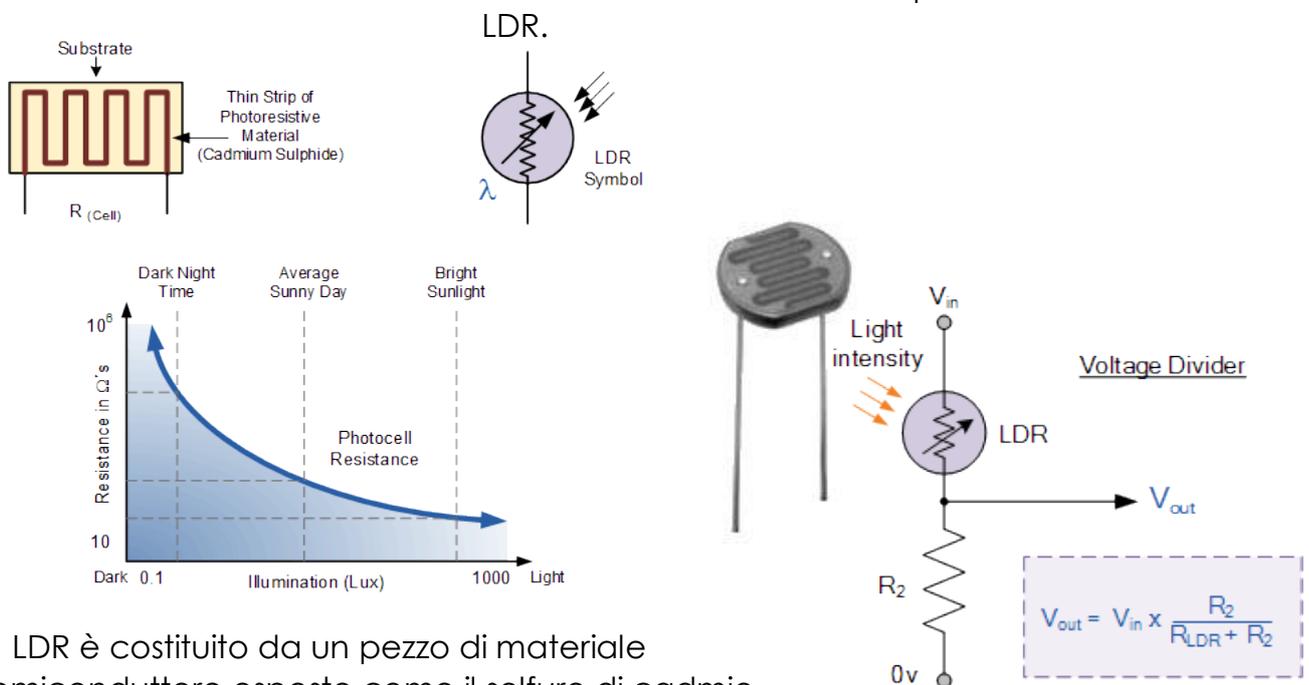
I dispositivi fotoelettrici possono essere raggruppati in due categorie principali, quelli che generano elettricità quando sono illuminati, come fotovoltaici o fotoemissivi e quelli che cambiano le loro proprietà elettriche in qualche modo come foto-resistori o foto-conduttori.

Fotoresistenze

Si basano sul principio per cui alcuni materiali modificano la loro resistenza se colpiti da radiazione luminosa.

Generalmente le fotoresistenze sono detti dispositivi a coefficiente negativo, per cui presentano valori molto alti (anche alcuni Mohm) al buio e valori bassi (qualche Ohm) in piena luce. A causa del fatto che non hanno un legame lineare fra resistenza e illuminazione vengono prevalentemente usati come interruttori on/off.

I fotoresistori sono dispositivi semiconduttori che utilizzano l'energia della luce per controllare il flusso degli elettroni e quindi la corrente che li attraversa. La cellula fotoconduttiva comunemente usata è chiamata resistore dipendente dalla luce o



L' LDR è costituito da un pezzo di materiale semiconduttore esposto come il solfuro di cadmio

Il solfuro di cadmio viene utilizzato nella produzione di cellule fotoconduttive perché la sua curva di risposta spettrale corrisponde strettamente a quella dell'occhio umano e può anche essere controllata utilizzando una semplice torcia come sorgente luminosa.

In genere ha una lunghezza d'onda di sensibilità di picco (λ_p) da circa 560 nm a 600 nm nella gamma spettrale visibile.

Le celle fotoresistive hanno un lungo tempo di risposta che richiede molti secondi per rispondere a un cambiamento nell'intensità della luce.

Per aumentare la resistenza al buio e quindi ridurre la corrente al buio, il percorso resistivo forma uno schema a zig-zag attraverso il substrato ceramico. La fotocellula CdS è un dispositivo a bassissimo costo spesso utilizzato nell'oscuramento automatico, nel rilevamento del buio o del crepuscolo per accendere e spegnere i lampioni.

Fotodiodi e fototransistor - Dispositivi fotogiunzione

Questi dispositivi sono componenti a semiconduttore detti fotodiodi o fototransistor che usano la luce per controllare il flusso di elettroni attraverso le giunzioni PN.

Realizzati in silicio, sono in grado di rilevare un ampio spettro di frequenze luminose, tra cui il visibile e l'infrarosso.

Fotodiodo

La costruzione del sensore di luce a fotodiodo è simile a quella di un diodo a giunzione PN convenzionale tranne per il fatto che l'involucro esterno dei diodi è trasparente o ha una lente trasparente per focalizzare la luce sulla giunzione PN per una maggiore sensibilità. La giunzione risponderà alla luce con lunghezze d'onda particolarmente lunghe come il rosso e gli infrarossi piuttosto che alla luce visibile.

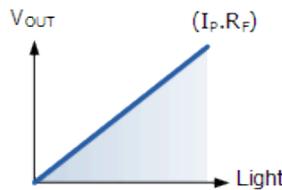
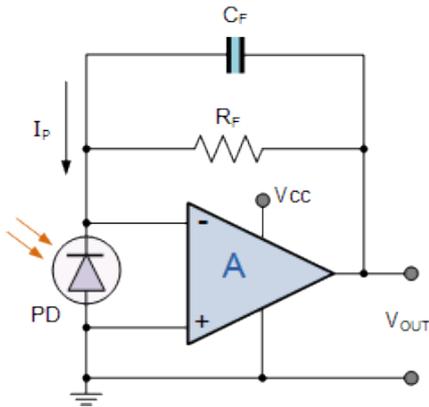
Anche i LED possono anche essere usati come fotodiodi in quanto possono sia emettere che rilevare la luce dalla loro giunzione.

La caratteristica corrente-tensione (curva I/V) di un fotodiodo al buio rispecchia quella di un normale diodo raddrizzatore. Quando il fotodiodo è polarizzato direttamente, si verifica un aumento esponenziale della corrente, lo stesso di un diodo normale. Quando viene applicata una polarizzazione inversa, appare una piccola corrente di saturazione inversa che provoca un aumento della regione di esaurimento, che è la parte sensibile della giunzione.

Quando viene utilizzato come sensore di luce, la corrente al buio dei fotodiodi (0 lux) è di circa 1 μ A. In presenza di luce si crea una corrente di dispersione. Pertanto, la corrente dei fotodiodi è direttamente proporzionale all'intensità della luce che cade sulla giunzione PN. Uno dei principali vantaggi dei fotodiodi quando usati come sensori di luce è la loro rapida risposta ai cambiamenti nei livelli di luce, ma uno svantaggio di questo tipo di fotodispositivo è il flusso di corrente relativamente piccolo anche quando è completamente illuminato.

Per tale motivo è necessario amplificare il segnale.

Di seguito è riportato un tipico circuito amplificatore di condizionamento di segnale.



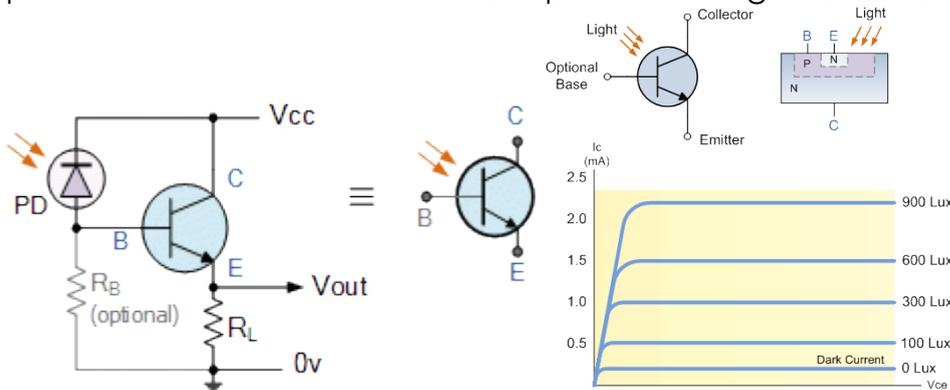
La tensione di uscita (V_{out}) è data come $V_{out} = I_P \cdot R_f$ che è proporzionale alle caratteristiche di intensità luminosa del fotodiode.

Notare che il condensatore C_f viene utilizzato per prevenire oscillazioni o picchi di guadagno e per impostare la larghezza di banda di uscita ($1 / 2\pi RC$).

I fotodiode sono sensori di luce molto versatili che possono attivare il flusso di corrente sia "ON" che "OFF" in nanosecondi e sono comunemente usati in fotocamere, esposimetri, unità CD e DVD, telecomandi TV, scanner, come rilevatori di spettro a infrarossi, per comunicazioni in fibra ottica, circuiti di rilevamento del movimento antifurto e numerosi sistemi di imaging, scansione laser e posizionamento, ecc

Fototransistor

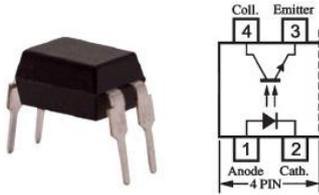
Il fototransistor è fondamentalmente un fotodiode con amplificazione. Il sensore di luce a fototransistor ha la sua giunzione PN della base del collettore polarizzata inversamente che lo espone alla sorgente di luce radiante.



I fototransistor funzionano allo stesso modo del fotodiode tranne per il fatto che possono fornire guadagno di corrente e sono molto più sensibili del fotodiode con correnti da 50 a 100 volte maggiori di quella del fotodiode standard e qualsiasi transistor normale può essere facilmente convertito in un sensore di luce a fototransistor collegare un fotodiode tra il collettore e la base.

La maggior parte dei fototransistor sono di tipo NPN il cui involucro esterno è trasparente o ha una lente chiara per focalizzare la luce sulla giunzione di base per una maggiore sensibilità.

Una applicazione importante di fotodiodi e fototransistor è quella costituita dai circuiti integrati fotoaccoppiatori. Questi permettono un isolamento galvanico tra due circuiti sottoposti a parametri elettrici diversi (possono disgiungere due circuiti, proteggendo quello a valle da eventuali sovratensioni provenienti dal circuito a monte, per esempio sono utili quando si interfaccia un circuito elettronico a bassa tensione a circuiti elettrici a tensioni di rete).



Esempio di fotoaccoppiatore in tecnologia THT

Celle fotovoltaiche.

Il tipo più comune di sensore di luce fotovoltaico sono le Celle fotovoltaiche o "solari". Convertono l'energia luminosa direttamente in energia elettrica in corrente continua sotto forma di tensione o corrente.

Sono ampiamente utilizzate come fonte di alimentazione elettrica rinnovabile oltre che in alternativa alle batterie convenzionali.

Le celle fotovoltaiche sono costituite da giunzioni PN di silicio monocristallino o policristallino, le stesse dei fotodiodi con una regione sensibile alla luce molto ampia ma vengono utilizzate senza polarizzazione inversa. Hanno le stesse caratteristiche di un fotodiodo molto grande quando sono al buio.

Quando è illuminata, l'energia della luce fa fluire gli elettroni attraverso la giunzione PN. Una singola cella solare può generare una tensione a circuito aperto di circa 0,58 V (580 mV). Le celle solari hanno un lato "positivo" e uno "negativo" proprio come una batteria.

Le singole celle solari possono essere collegate insieme in serie per formare pannelli fotovoltaici per aumentare la tensione di uscita o collegate insieme in parallelo per aumentare la corrente disponibile.

Le singole celle fotovoltaiche sono collegate in serie ed in parallelo tra di loro per dar luogo ai cosiddetti pannelli fotovoltaici per la produzione di energia elettrica rinnovabile. Collegate in serie, viene aumentata la tensione, collegandole in parallelo si aumenta la corrente disponibile.

La quantità di corrente disponibile da una cella solare dipende dall'intensità della luce, dalle dimensioni della cella e dalla sua efficienza che è generalmente molto bassa, intorno al 15-20%. Per aumentare l'efficienza complessiva della cella, le celle solari disponibili in commercio utilizzano silicio policristallino o silicio amorfo, che non hanno struttura cristallina e possono generare correnti comprese tra 20 e 40 mA per cm².

La quantità di corrente resa disponibile da una cella solare dipende dall'intensità della luce, dalle dimensioni della cella e dalla sua efficienza che è generalmente

molto bassa, intorno al 15-20%. Per aumentare l'efficienza complessiva della cella, le celle solari disponibili in commercio utilizzano silicio policristallino o silicio amorfo, che non hanno struttura cristallina e possono generare correnti comprese tra 20 e 40 mA per cm².

SENSORI DI Temperatura

Rilevano la temperatura e le sue variazioni.

Questi tipi di sensori di temperatura variano da semplici dispositivi termostatici ON / OFF che controllano un sistema di riscaldamento dell'acqua calda sanitaria a tipi di semiconduttori altamente sensibili in grado di controllare complessi impianti di forni per il controllo di processo.

I sensori di temperatura misurano la quantità di energia termica o anche di freddo generata da un oggetto o un sistema, permettendoci di "percepire" o rilevare qualsiasi cambiamento fisico a quella temperatura producendo un'uscita analogica o digitale.

Esistono svariate tipologie con caratteristiche diverse a seconda della loro applicazione effettiva.

Genericamente possiamo definire due grandi famiglie : Sensori di temperatura a "contatto" e "senza contatto" .

- Sensori di temperatura a contatto - Questi tipi di sensori di temperatura devono essere a contatto fisico con l'oggetto da rilevare e utilizzare la conduzione per monitorare i cambiamenti di temperatura. Possono essere utilizzati per rilevare solidi, liquidi o gas in un'ampia gamma di temperature.
- Sensori di temperatura senza contatto - Questi tipi di sensori di temperatura utilizzano la convezione e la radiazione per monitorare le variazioni di temperatura. Possono essere utilizzati per rilevare liquidi e gas che emettono energia radiante quando il calore aumenta e il freddo si deposita sul fondo nelle correnti di convezione o per rilevare l'energia radiante trasmessa da un oggetto sotto forma di radiazione infrarossa (il sole).

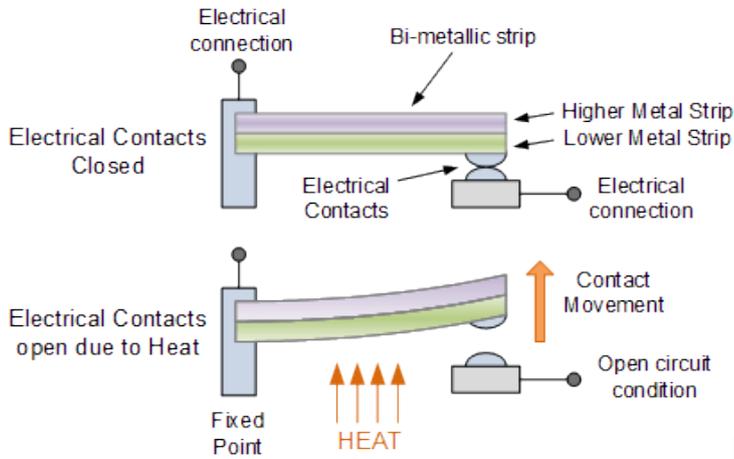
Il termostato

Il termostato è un sensore o interruttore di temperatura elettromeccanico di tipo a contatto, costituito fondamentalmente da due metalli diversi come nichel, rame, tungsteno o alluminio. Sono legati insieme per formare una striscia bimetallica. Le diverse velocità di espansione lineare dei due metalli dissimili producono un movimento meccanico di flessione quando il nastro è sottoposto a calore.

E' un sensore a 2 livelli ON/OFF. (aperto/chiuso)

La striscia bimetallica può essere utilizzata come interruttore elettrico o come un modo meccanico per azionare un interruttore elettrico nei controlli termostatici. Sono ampiamente utilizzate per controllare gli elementi riscaldanti dell'acqua calda in caldaie, forni, serbatoi di acqua calda, ferri da stiro, termostati a parete

economici, nei veicoli con sistemi di raffreddamento del radiatore o per sistemi a doppia sicurezza elettrica.



termostato è costituito da due metalli termicamente diversi saldati l'uno all'altro. Quando fa freddo i contatti sono chiusi e la corrente passa attraverso il termostato. Quando diventa caldo, un metallo si espande più dell'altro e la striscia bimetallica incollata si piega verso l'alto (o verso il basso) aprendo i contatti impedendo il flusso di corrente.

Sebbene siano molto economici e disponibili su un ampio intervallo di funzionamento, uno svantaggio principale dei termostati di tipo a scatto rapido standard se utilizzati come sensori di temperatura, è che hanno un ampio intervallo di isteresi da quando i contatti elettrici si aprono fino a quando si richiudono. Ad esempio, se impostato a 20°C potrebbe non aprirsi fino a 22°C o chiudersi di nuovo fino a 18°C.

Termoresistenze e termistori

Variano la propria resistenza al variare della temperatura

Sono dispositivi che modificano la loro resistenza in base alla legge:

$$R_{Tf} = R_{Ti} \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta T)$$

$$R_t = A + C \cdot e^{\alpha T}$$

Sono costituiti da conduttori in platino, nichel, rame o da materiale semiconduttore e sono operativi in un ampio intervallo: da -200°C a +800°C.

Ce ne sono essenzialmente di due tipi :

NTC (coefficiente α di temperatura negativo , in cui la resistenza varia in modo inversamente proporzionale alla temperatura o **PTC** , in cui la resistenza varia in maniera proporzionale (α = coefficiente di temperatura positivo)

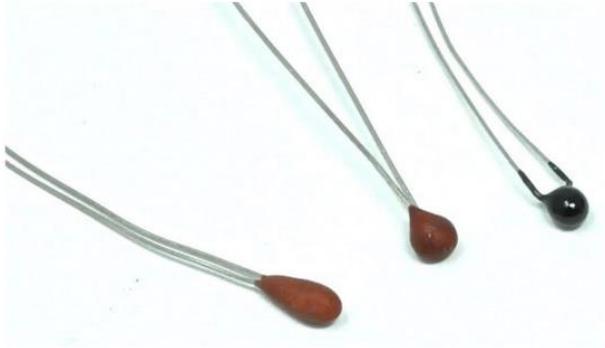
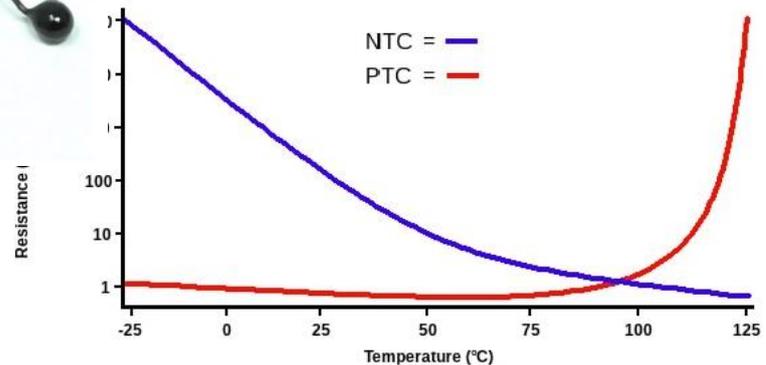


Figura 2 – Termistori NTC e PTC



Per questi dispositivi vale la

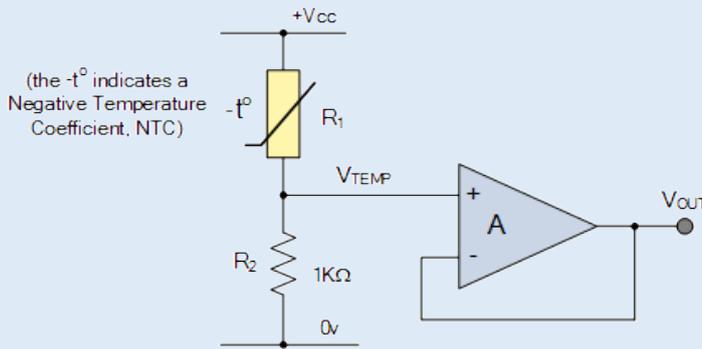
$$R_f = R_i \cdot e^{B \left(\frac{1}{T_f} - \frac{1}{T_i} \right)}$$

formula:

con $B=2000^{\circ}\text{K}$ 5000°K .

I termistori sono costruiti da un materiale semiconduttore di tipo ceramico utilizzando la tecnologia dell'ossido di metallo come manganese, cobalto e nichel, ecc..

Sono classificati in base al loro valore resistivo a temperatura ambiente (normalmente a 25°C), alla loro costante di tempo (il tempo necessario per reagire al cambiamento di temperatura) e alla loro potenza rispetto alla corrente che li attraversa. Come i resistori, i termistori sono disponibili con valori di resistenza a temperatura ambiente da 10 di $\text{M}\Omega$ fino a pochi Ohm , ma per scopi di rilevamento vengono generalmente utilizzati quei tipi con valori in kilo-ohm. Sono dispositivi resistivi passivi, il che significa che dobbiamo far passare una corrente attraverso di essi per produrre un'uscita di tensione misurabile. I termistori sono generalmente collegati in un partitore di tensione.



La figura mostra un tipico schema di un termistore con partitore resistivo di tensione ed amplificatore operazionale.

Se ad esempio R_1 è costituito da un termistore NTC 10K (10Kohm a 25°C con coefficiente di temperatura negativo) $R_2 = 1\text{Kohm}$ e $V_{cc} = 12\text{V}$, avremmo :

A 25°C

$$V_{out} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \times V = \frac{1000}{10000 + 1000} \times 12\text{v} = 1.09\text{v}$$

A 100°C

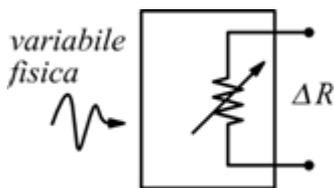
$$V_{out} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \times V = \frac{1000}{100 + 1000} \times 12\text{v} = 10.9\text{v}$$

Sostituendo il resistore fisso R_2 (nel nostro esempio 1kΩ) con un potenziometro, è possibile ottenere un'uscita di tensione predeterminata ad un punto di regolazione specifico della temperatura.

Termoresistenze RTD

Un altro tipo di sensore di temperatura a resistenza elettrica è il rilevatore di temperatura a resistenza o RTD.

È un sensore resistivo che varia il proprio valore al variare della temperatura.



Gli RTD sono sensori di temperatura di precisione realizzati con metalli conduttori di elevata purezza come platino, rame o nichel avvolti in una bobina e la cui resistenza elettrica cambia in funzione della temperatura, simile a quella del termistore. Sono disponibili anche RTD a film sottile. Questi dispositivi hanno un sottile film di pasta di platino che viene depositato su un substrato ceramico bianco.

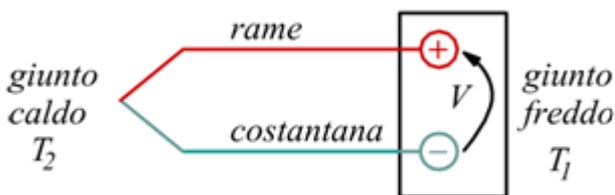
Un RTD resistivo

I rilevatori di temperatura resistivi hanno generalmente coefficienti di temperatura positivi (PTC) ma, a differenza del termistore, la loro uscita è estremamente lineare producendo misurazioni molto accurate della temperatura.

Termocoppie

Contrariamente alle termoresistenze e ai termistori, la termocoppia è un sensore di temperatura con uscita in tensione.

Il principio di funzionamento, effetto Seebeck, si basa sul fatto che due materiali conduttori saldati tra di loro ad una estremità (giunto caldo), producono alle altre estremità (giunto freddo) una differenza di potenziale V proporzionale alla differenza di temperatura $T_2 - T_1$ (qualche mV per °C di differenza).



La termocoppia è di gran lunga il tipo più comunemente usato di tutti i tipi di sensori di temperatura. Le termocoppie sono popolari per la loro semplicità, facilità d'uso e velocità di risposta ai cambiamenti di temperatura, principalmente per le loro piccole dimensioni. Le termocoppie hanno anche la più ampia gamma di temperatura di tutti i sensori di temperatura da meno di -200°C a ben oltre 2000°C.

Vengono utilizzate molto frequentemente nelle applicazioni industriali, soprattutto nella rilevazione di alte temperature e vengono caratterizzate dal Tipo, a seconda delle temperature di esercizio.

Fig. 3 Tipica termocoppia



Le più utilizzate sono le termocoppie di tipo K e di tipo J.

Tipo	Giunto caldo	Temperatura °C	mV/°C
E	nichelcromo(+) costantana(-)	-50~+900	75
J	ferro(+) costantana(-)	-200~+800	56
T	rame(+) costantana(-)	-180~+400	52
K	nichelcromo (+) nichel(-)	-200~+1200	41
C	tungsteno/rame 5%(+) tungsteno/rame 25%(+)	0~+2300	15
R	platino/rodio(+) platino(-)	0~+1800	12

E' opportuno ribadire di nuovo che, sempre più spesso vengono utilizzati trasduttori integrati, in grado di fornire, a basso costo ed alte precisioni, segnali di uscita digitali direttamente proporzionali alla temperatura rilevata.

Soltanto come esempio si cita il sensore DS18B20+ della MAXIM che, con costi irrisori è in grado di rilevare temperature da -55°C a +125°C con una accuratezza di +/- 0.5°C e con una risoluzione fino a 12bit. Contiene una memoria ROM per memorizzazione dati, indirizzamento a 64bit e settaggio allarmi.



Sensore temperatura digitale DS18B20

Sensori Forza Pressione Peso

In questo caso la grandezza elettrica in uscita è proporzionale alla forza esercitata .

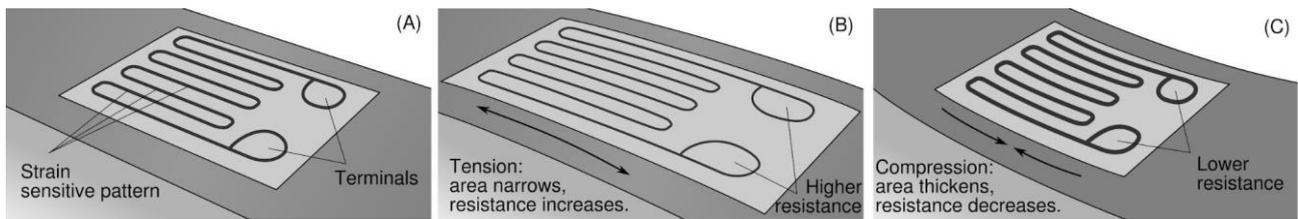
La grandezza elettrica è in genere una resistenza nel caso di sensori estensimetrici, può essere una variazione di capacità nel caso di sensori capacitivi .

Sensori estensimetrici (strain gauge)

Tipici sensori di forza sono gli estensimetri in cui la resistenza varia in funzione di una deformazione meccanica.

Vengono usati come celle di carico, per le misure di peso o in robotica per la rilevazione di movimento dei bracci meccanici.

Funzionamento Strain Gauge da WikiCommons



Quando un conduttore viene allungato, la sua resistenza aumenta. Quando viene compresso, la sua resistenza diminuisce. secondo la legge

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S}$$

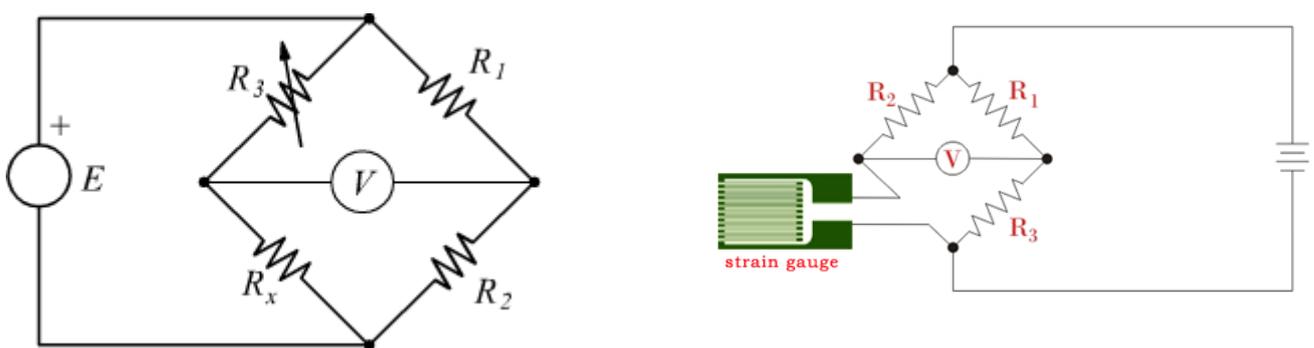
ρ =resistività del materiale
 l =lunghezza del conduttore
 S =sezione del conduttore

Queste variazioni di resistenza possono essere misurate utilizzando un Ponte di Wheatstone .

Una variazione Δl del conduttore influisce producendo una nuova resistenza R_x :

$$R_x = \rho \cdot \frac{l \pm \Delta l}{S} = \rho \cdot \frac{l}{S} \pm \rho \cdot \frac{\Delta l}{S} = R \pm \Delta R$$

L'estensimetro a filo, viene dunque usato per misurare un allungamento oppure una forza.



Alimentando il circuito con una tensione E e regolando R3 in modo tale da mettere il ponte in equilibrio, quindi con il voltmetro V che segna 0 V , vale la relazione: $R_2 R_3 = R_1 R_x$

$$R_x = \frac{R_2 R_3}{R_1}$$

da cui si ottiene il valore della resistenza incognita R_x .

Celle di carico

Le celle di carico, utilizzate frequentemente nelle bilance industriali, nei sistemi di distribuzione bevande, nelle attrezzature per il fitness, sono sensori comprensivi di ponte di Wheatstone con tensioni analogiche in uscita di circa 20mV/V (cioè se una cella di carico alimentata con E=10V ed il carico massimo è 100Kg, fornirà in uscita 100mV se sollecitata per esempio da un peso di 50Kg).



Cella di Carico per bilancia

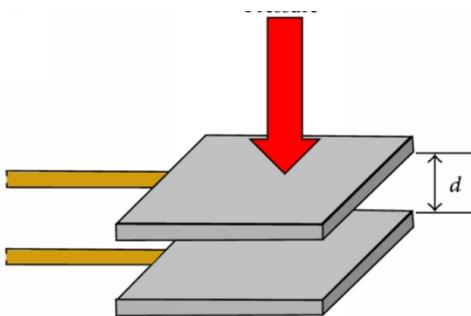
Un classico sensore di pressione o di forza (è opportuno ricordare che una pressione altro non è che una forza su di una superficie) è costituito da un condensatore piano.

Infatti, in un condensatore piano, tenendo fissa una delle armature e permettendo lo spostamento dell'altra, ricordando che la capacità è

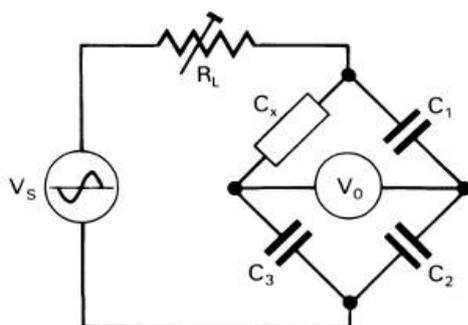
$$C = \epsilon \frac{S}{d}$$

dove ϵ è la costante dielettrica (variabile a seconda del materiale dielettrico)
 S è la superficie dell'armatura
 d è la distanza tra le armature

varierà la distanza d e quindi la capacità C .



Analogamente al caso precedente, inserendo il condensatore in un ponte di Wheatstone alimentato da tensione alternata saremo in grado di rilevare una tensione proporzionale alla forza impressa sul sensore.



Sensori di posizione (di spostamento o rotazione)

Come suggerisce il nome, i sensori di posizione rilevano la posizione di qualcosa, il che significa che sono referenziati rispetto ad un punto fisso o posizione. Questi tipi di sensori forniscono un feedback "posizionale".

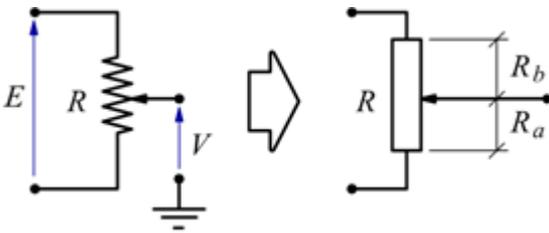
Un metodo per determinare una posizione consiste nell'usare la "distanza", che potrebbe essere la distanza tra due punti, come la distanza percorsa o allontanata da un punto fisso, o la "rotazione" (movimento angolare). Ad esempio, la rotazione di una ruota di robot per determinare la sua distanza percorsa sul terreno. In entrambi i casi, i sensori di posizione possono rilevare il movimento di un oggetto in linea retta utilizzando i sensori lineari o tramite il suo movimento angolare utilizzando i sensori di rotazione.

Potenziometro (trasduttore di posizione)

Il più comunemente usato tra tutti i "Sensori di posizione", è il potenziometro perché è un sensore di posizione economico e di facile utilizzo.

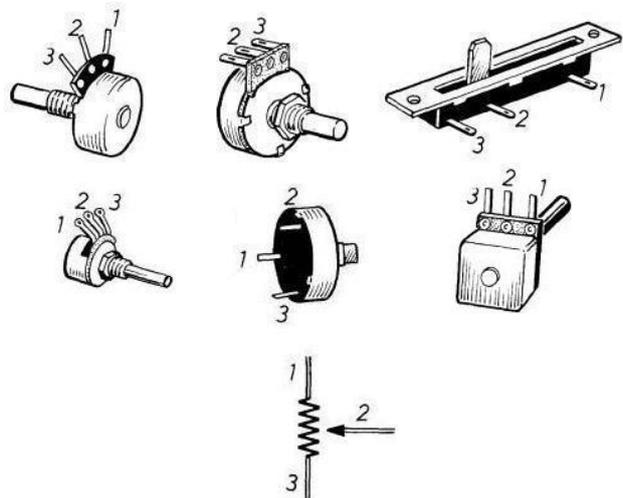
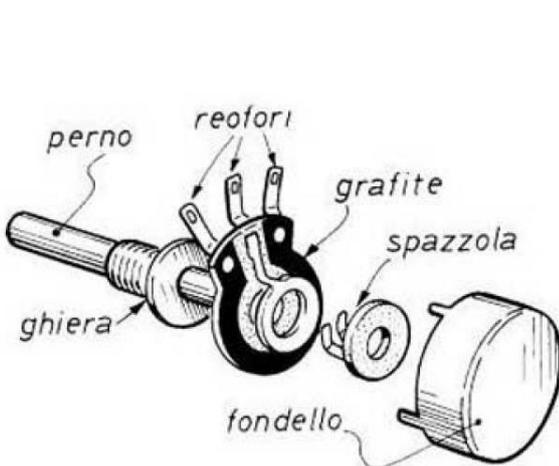
Può essere a variazione angolare o lineare, in cui la variazione di resistenza è proporzionale ad una variazione di posizione.

Si tratta di una resistenza sulla quale viene fatto scorrere un cursore metallico. La resistenza viene così suddivisa in due resistenze R_a ed R_b .



Se il potenziometro viene alimentato dalla tensione E , la tensione di uscita V , proporzionale a R_a , e quindi allo spostamento o rotazione, è data dalla regola del **partitore di tensione**:

$$V = \frac{E \cdot R_a}{R_a + R_b} = \frac{E \cdot R_a}{R_a + (R - R_a)} = E \cdot \frac{R_a}{R}$$



I potenziometri sono disponibili in un'ampia gamma di design e dimensioni, come il tipo rotazionale tondo comunemente disponibile o il tipo a cursore lineare più lungo e piatto. Quando viene utilizzato come sensore di posizione, l'oggetto mobile è collegato direttamente all'albero rotante (Perno) o al cursore del potenziometro (spazzola).

Encoder

21

L'encoder è un dispositivo elettromeccanico che converte la posizione angolare meccanica del suo asse rotante in posizione angolare elettrica sotto forma di segnale elettrico numerico digitale e/o analogico. Il segnale elettrico, incrementale o assoluto, è utilizzato dal sistema di acquisizione elettronico per controllare il movimento degli organi mobili, per esempio i motori. L'encoder è in grado di misurare spostamenti angolari, movimenti rettilinei e circolari nonché velocità di rotazione e accelerazioni. Esistono varie tecniche per il rilevamento del movimento angolare: capacitiva, magnetica, induttiva, potenziometrica e fotoelettrica.

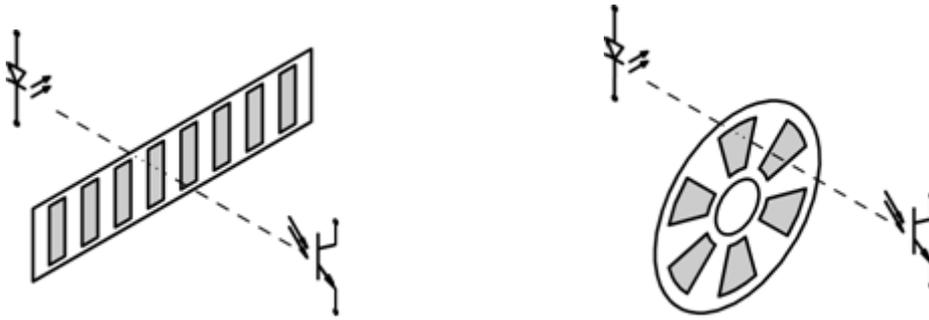


Figura 3 Encoder a Flangia fissa

Gli encoder vengono principalmente impiegati nei settori applicativi quali: controllo dei processi industriali, robot industriali, macchine utensili, strumenti di misura, plotter, laminatoi, macchine tessili, gru, presse, macchine per la lavorazione del legno, ecc..

Esistono due grandi categorie di encoder, l'encoder assoluto tachimetrico e l'encoder di tipo incrementale.

Il primo viene utilizzato di solito per rilevare la velocità ed il movimento di un attuatore



È costituito da una lastra (per rilevare spostamenti rettilinei) o da un disco (per rilevare spostamenti circolari) solidali all'oggetto di cui si vuol rilevare lo spostamento, di materiale trasparente su cui vengono riportate delle strisce opache, leggibili da un sistema a fotocellula.

Quando la barra si muove si crea una alternanza di zone opache e di zone trasparenti, passanti rispetto la radiazione luminosa emessa dal LED questo crea, ovviamente, una alternanza della conduzione del fototransistor (funzionamento ON/OFF) che passa alternativamente dalla saturazione all'interdizione. La corrente di collettore del fototransistor è dunque, di tipo impulsivo con frequenza proporzionale alla velocità di spostamento della parte meccanica (funzionamento come tachimetro).

Se il disco ha N tacche opache la velocità del disco n in giri al secondo è

$$n = \frac{f}{N}$$

Invece per misurare lo spostamento o i gradi di rotazione, basta contare gli impulsi tramite un contatore digitale binario. In particolare l'encoder assoluto, misura direttamente in binario lo spostamento rettilineo od angolare.

Con un contatore a n bit, in uscita si possono codificare 2^n posizioni angolari ottenendo una risoluzione R :

$$R = \frac{360^\circ}{2^n} \quad \text{per l'encoder per spostamenti angolari}$$

$$R = \frac{l}{2^n} \quad \text{per l'encoder per spostamenti rettilinei}$$

Nota: La risoluzione R è da considerare come il valore dello spostamento minimo rilevabile.

Gli encoder incrementali permettono di rilevare anche il senso di rotazione dell'organo in movimento.

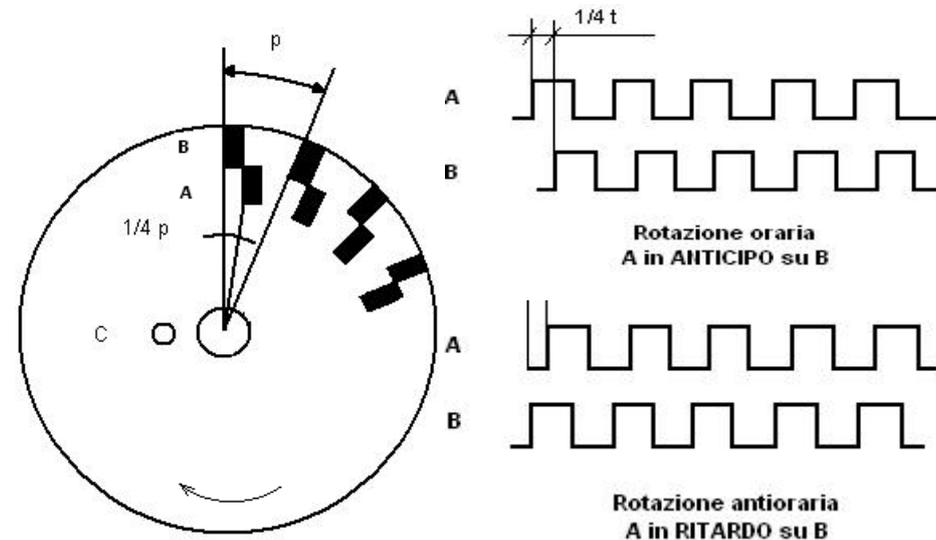


Figura 4 Dispositivo encoder incrementale-fotocellula

I modelli più utilizzati sfruttano la tecnica fotoelettrica e possono essere di tipo incrementale o di tipo assoluto. Il tipo incrementale è costituito da un disco trasparente sulla cui superficie sono stati ricavati numerosi settori opachi ugualmente distanziati e da un rilevatore ottico (es. una

forcella ottica) che provvede a rilevare il diverso comportamento ottico della superficie del disco. Quando il disco viene messo in rotazione si generano una serie di impulsi ottici che vengono rilevati e convertiti da un circuito elettronico.

L'informazione incrementale è costituita da un codice Gray a due Bit (fasi **A** e **B**) in quadratura (duty cycle del 50%). Lo sfasamento tra i due bit è di 90° elettrici ed è necessario per verificare il senso di rotazione. Di solito si assume per convenzione che l'incremento è positivo quando la fase B anticipa la fase A con rotazione dell'albero in senso orario. E' disponibile, generalmente anche un riferimento (Zero o Marker) che indica il completamento del giro effettuato.



Per rilevare il numero di giri di un motore possono essere utilizzati anche degli encoder di tipo magnetico, costituiti essenzialmente da un disco metallico con delle camme (ossia delle "rientranze o protuberanze metalliche") sul perimetro ed un sensore ad effetto hall in grado di rilevare il campo magnetico indotto.

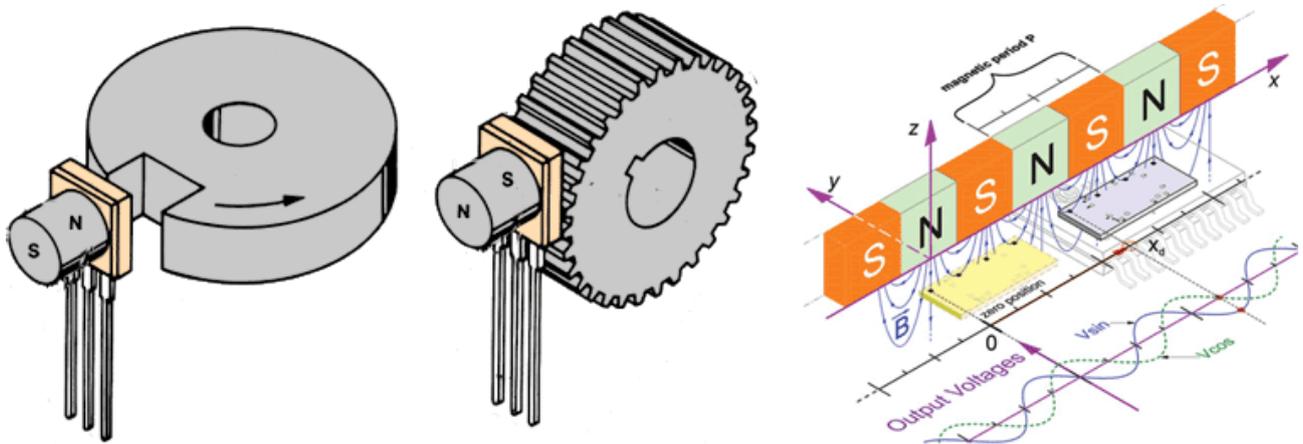


Figura 5 Esempio di encoder induttivo a camme

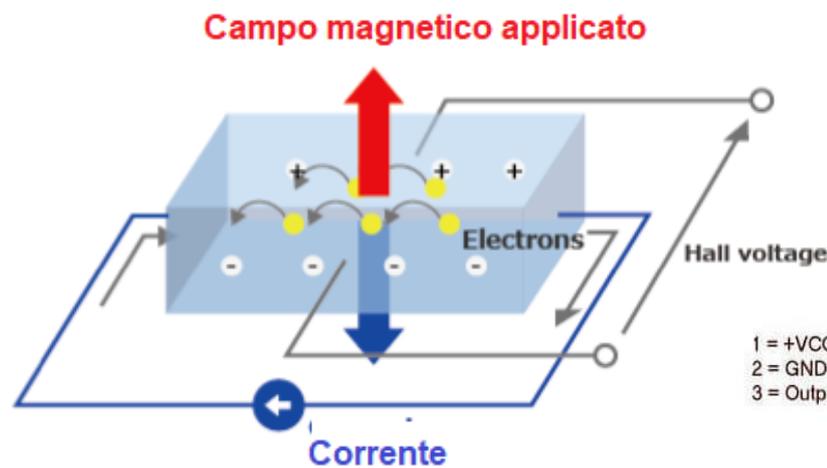


Figura 6 - Sensore ad effetto hall

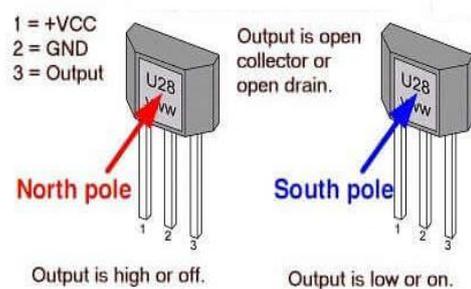


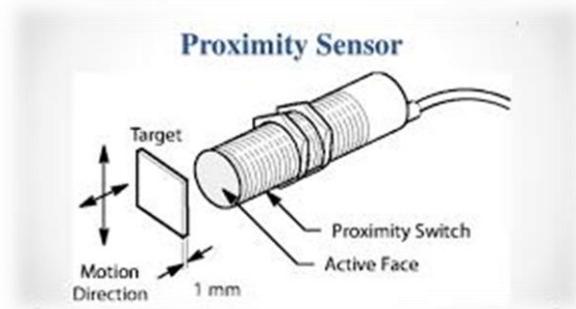
Figura 7 pin1 -Vcc 2- GND 3- Segnale

Si indica per "effetto Hall", il fenomeno della generazione di una tensione elettrica quando viene applicato un campo magnetico ad un dispositivo "hall".

Un circuito ad effetto hall è un componente a semiconduttore dotato generalmente di 3 piedini. Sul piedino di segnale Output fornisce una tensione pari a Vcc se sottoposto ad un campo magnetico, prodotto per esempio anche da una semplice calamita.

Sensore di prossimità

Per proximity (sensore di prossimità) si intende generalmente un dispositivo utilizzato in ambito di automazione industriale per rilevare la presenza o il movimento di un oggetto.



In tal caso possono essere utilizzati sensori ad effetto hall o induttivi per la rilevazione di pezzi metallici o che producono campi magnetici .

Nel caso della rilevazione di oggetti non metallici sono di tipo a fotocellula.

Sono classificati come sensori digitali in quanto forniscono solo 2 livelli di tensione in uscita.



Figura 8 Proximity switch in ambito industriale

Sensori di suono

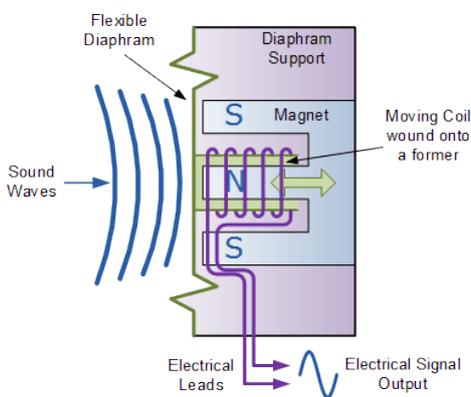
Il Microfono

Il microfono esegue una traduzione di una grandezza acustica in una grandezza elettrica, per alcuni è definito come “trasduttore indiretto”, in quanto il suono viene prima trasformato in una grandezza meccanica tramite un dispositivo mobile, e poi in un segnale elettrico.

Vi sono varie tipologie di sensori microfonici di suono, ma in questa sede ne identifichiamo soltanto due : Dinamico e a condensatore

Microfono dinamico induttivo

Il principio di funzionamento si basa essenzialmente su quanto definito dalla legge di Faraday-Lenz.



L'onda sonora colpisce il diaframma. Al diaframma è fissata una bobina induttiva collocata su una calamita che genera un campo magnetico.

Quando il diaframma (membrana) è sollecitato dalle onde sonore, la bobina si muove sulla calamita, generando così una tensione proporzionale alla frequenza ed all'intensità del movimento del diaframma .

Microfono capacitivo a condensatore

Il principio di funzionamento.

I microfoni capacitivi hanno un condensatore con due armature metalliche. L'una funge da diaframma flessibile, l'altra da contropiastra. Le onde sonore provocano lo spostamento dell'armatura flessibile, cambiandone la distanza.

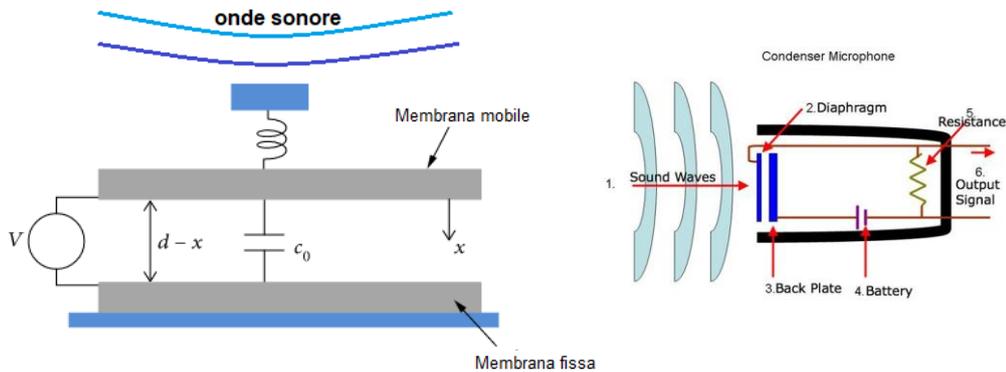
Quando si verifica questo cambiamento, varia la capacità e quindi anche la tensione di uscita.

Sappiamo che la capacità di un condensatore con due piastre parallele è data dall'equazione:

$$C = \varepsilon \frac{S}{d}$$

Dove ϵ è la costante dielettrica, S è la superficie delle armature e d la loro distanza.

Pertanto, se a riposo la quantità di carica accumulata sull'armatura è pari a $Q_0 = C_0 E_0$, una vibrazione sonora fa variare la distanza d fra le armature generando una variazione di capacità C rispetto al valore statico C_0 e quindi una susseguente variazione di tensione E rispetto al valore statico E_0 .



Tali microfoni richiedono una batteria o un'alimentazione phantom. Sono molto sensibili e possono catturare uno spettro piuttosto ampio di frequenze acustiche. I campi di applicazione sono numerosi. Oggi il 70% dei microfoni in commercio sono a condensatore.