

# EEG TECHNIQUES FOR BRAIN COMPUTER INTERFACES

Basic Principles and Applications

Michele Barsotti, Antonio Frisoli



PERCRO Perceptual  
Robotics Laboratory

[m.barsotti@sssup.it](mailto:m.barsotti@sssup.it)  
[a.frisoli@sssup.it](mailto:a.frisoli@sssup.it)

# OUTLINE

- Introduction to signals theory
- General overview on BCI system
- Biological Principles
- Technical Principles
- EEG-based BCI paradigms
  - P300
  - SSVEP
  - Motor Imagery
- Applications



# **ELEMENTI DI TEORIA DEI SEGNALI**



# GRANDEZZE ANALOGICHE E DIGITALI

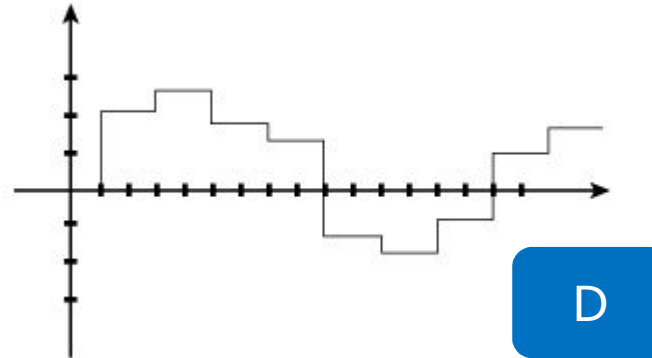
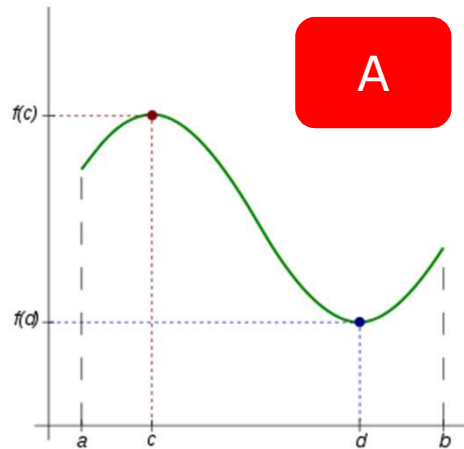
Una grandezza viene detta **analogica**, quando può assumere con continuità qualsiasi valore in un certo intervallo.

Una grandezza viene detta **digitale** (o *discreta*) quando due suoi valori consecutivi sono separati da un intervallo che non contiene altri valori validi.

L'intervallo minimo fra due valori consecutivi di una grandezza digitale, viene detto **quanto**.



# GRANDEZZE ANALOGICHE E DIGITALI



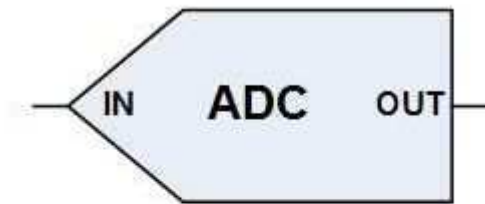
Se il valore del quanto è molto piccolo, l'andamento di una grandezza digitale risulta praticamente indistinguibile da quello di una grandezza analogica. In pratica una grandezza analogica potrebbe anche essere considerata una grandezza digitale con quanto uguale a zero.



# Convertitore analogico digitale (ADC) e convertitore digitale analogico (DAC)

La digitalizzazione di una grandezza analogica è indispensabile quando si vuole elaborare la grandezza per mezzo di un calcolatore. (ADC)

Per controllare con un computer l'andamento di una grandezza analogica, occorre trasformare i dati numerici del computer in valori analogici. (DAC)



# VANTAGGI DEI SEGNALI DIGITALI RISPETTO AI SEGNALI ANALOGICI

- I segnali digitali hanno una maggiore immunità ai disturbi rispetto ai segnali analogici.
- I segnali digitali possono essere elaborati più facilmente dei segnali analogici
- I segnali digitali possono essere registrati in maniera più fedele e stabile dei segnali analogici

*Al contrario il segnale analogico conserva interamente l'informazione originale, mentre la digitalizzazione comporta sempre una perdita di informazioni.*

# CONFRONTO GIRADISCHI - CD



Nel fonografo di Edison (1877) il suono veniva inciso con solchi verticali, tramite una puntina su un cilindro ruotante ricoperto dapprima di stagnola e poi di cera: la profondità dei solchi era proporzionale all'intensità del suono registrato.

Nel grammofono (1887) invece i suoni venivano incisi su dischi piatti attraverso l'oscillazione orizzontale di una puntina da incisione.



*In entrambi i dispositivi il principio è quello di incidere con una puntina in registrazione solchi proporzionali all'intensità del suono*

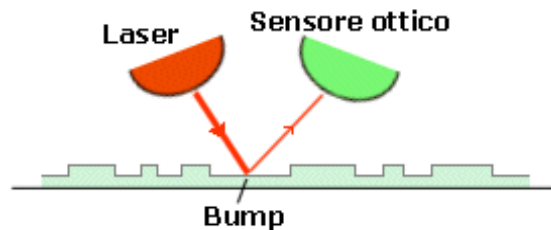
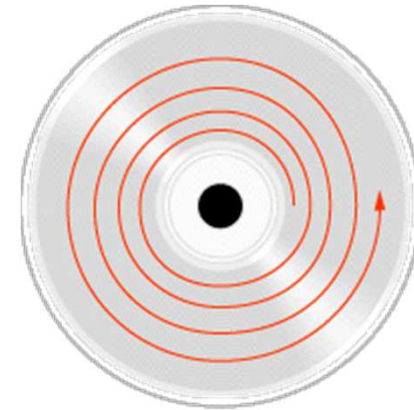


# CONFRONTO GIRADISCHI - CD

Nel CD audio

il suono da registrare viene convertito in valori digitali

I valori vengono registrati sulla superficie del CD per mezzo di microscopici fori detti *bump*, su una traccia a spirale



Il lettore CD legge i valori memorizzati nei bump incisi sul CD attraverso una luce laser e una lente riconoscendo la presenza di bump e di zone piane.

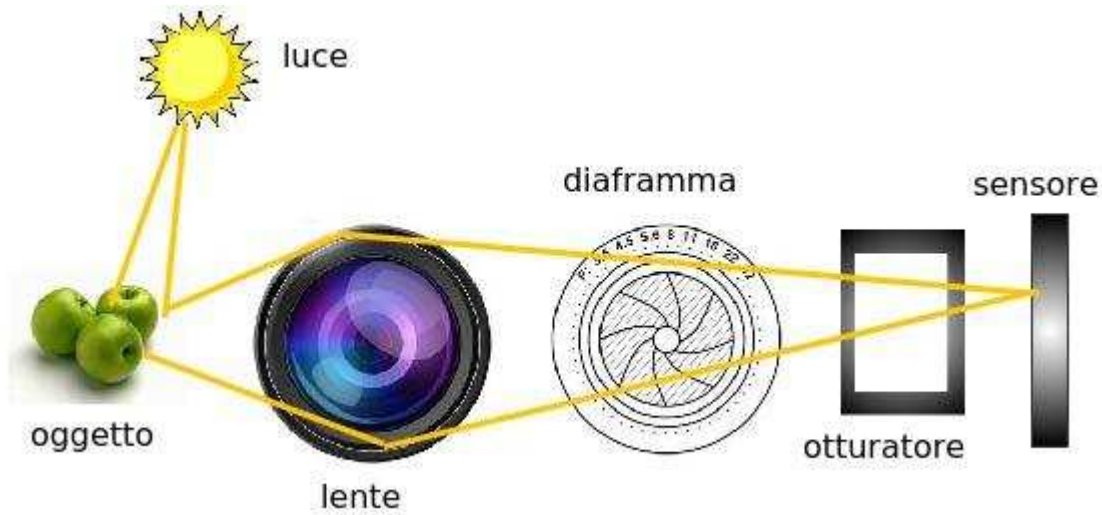
Infine i valori binari letti vengono nuovamente convertiti in un suono che viene inviato alle casse acustiche

# CONFRONTO GIRADISCHI - CD

Nel confronto fra CD e dischi si ritrovano i vantaggi della conversione in digitale di cui si è detto:

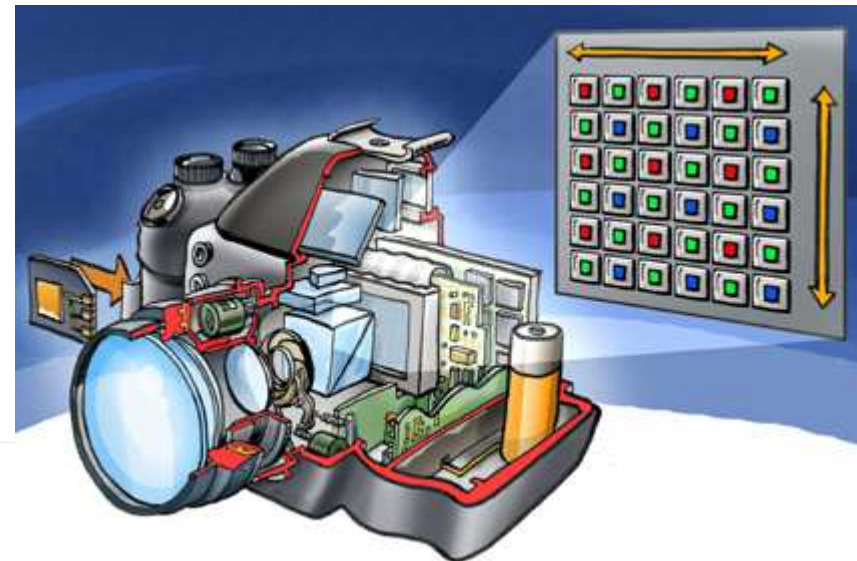
- **Immunità al rumore**
- **Elaborazione digitale**
- **Semplicità di produzione in massa e distribuzione**

# FOTOGRAFIA ANALOGICA E DIGITALE



ANALOGICA

DIGITALE



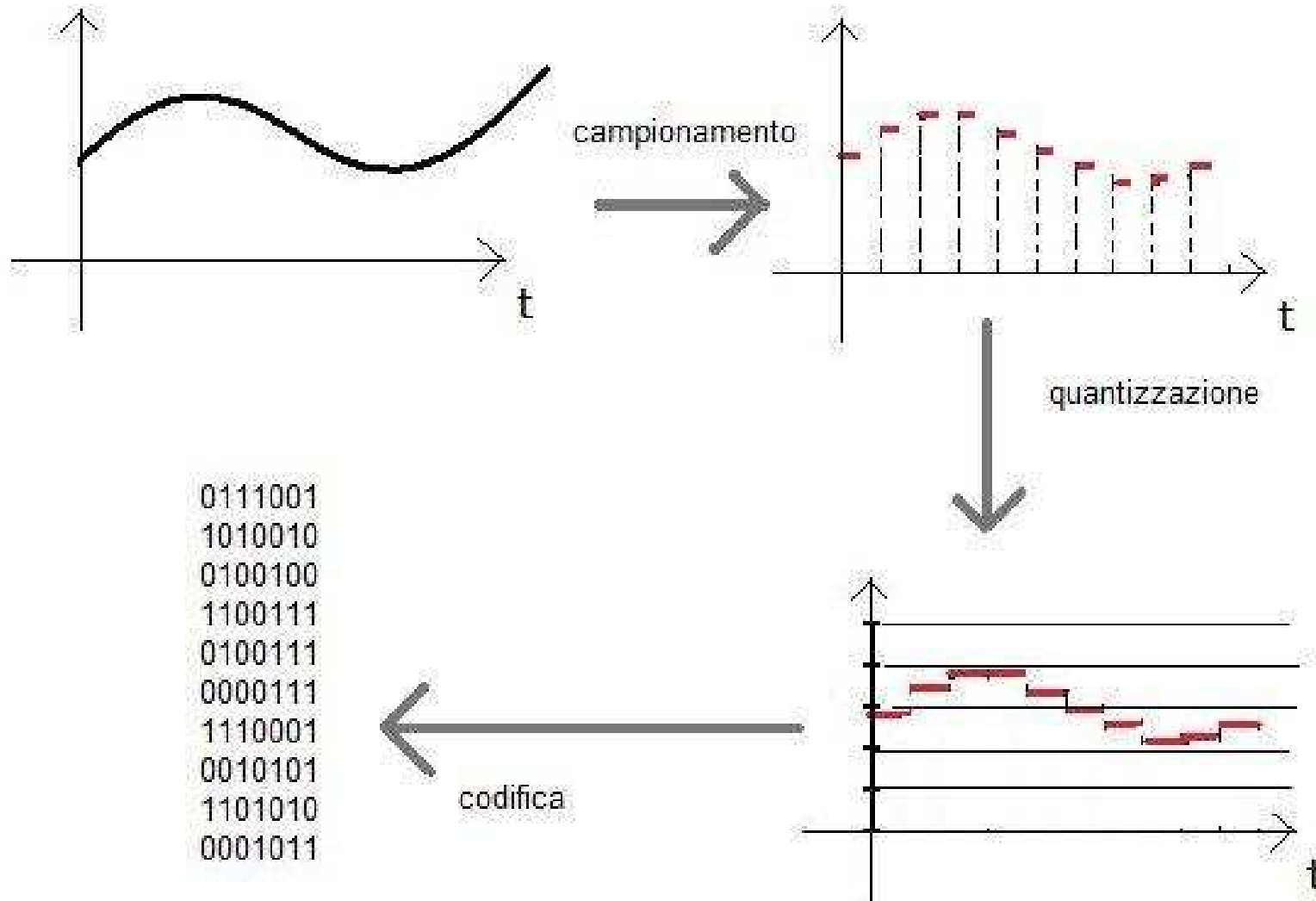
# CONVERSIONE ANALOGICO-DIGITALE



Per effettuare correttamente la conversione da una grandezza analogica (es. una tensione) a un valore numerico digitale è necessario stabilire:

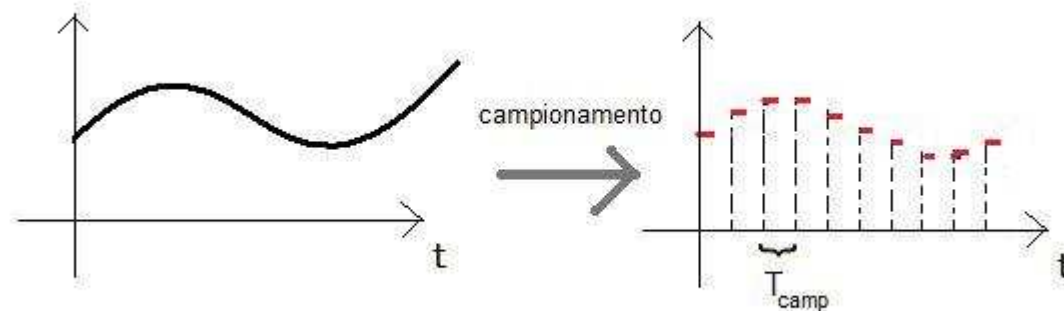
- con quale frequenza (ovvero, ogni quanto tempo) si vuole registrare (campionare) il valore della grandezza analogica;
- con quale precisione, ovvero in quanti livelli diversi si vuole suddividere i valori assunti dalla grandezza analogica (quantizzazione);
- in quale modo si vuole trasformare i valori campionati e quantizzati in valori numerici (codifica).

# CONVERSIONE ANALOGICO-DIGITALE



# CAMPIONAMENTO

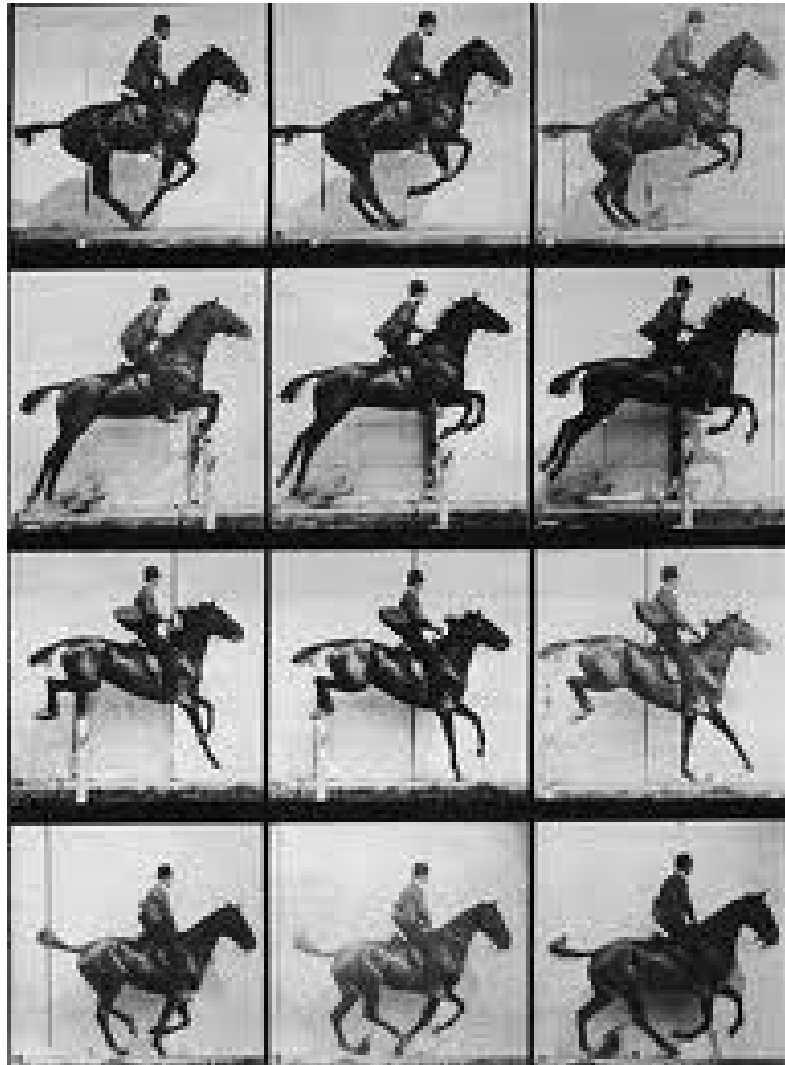
Il campionamento serve per *discretizzare* le variazioni nel tempo della grandezza analogica, cioè per trasformarla in una grandezza che varia solo in corrispondenza di determinati istanti di tempo.



**periodo di campionamento** ( $T_{\text{camp}}$ ) il tempo che passa fra l'acquisizione di un campione e l'altro

$$f_{\text{camp}} = 1/T_{\text{camp}}$$

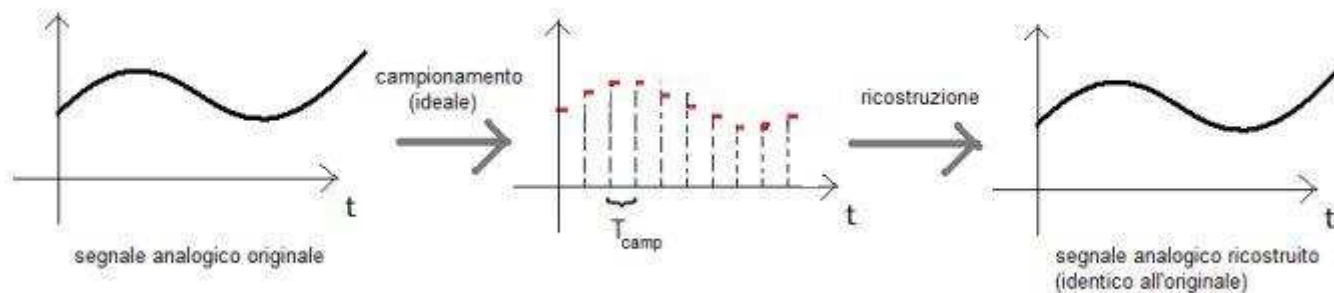




Il movimento continuo dei soggetti è "congelato" negli istanti di tempo in cui si apre l'otturatore della macchina fotografica. E' evidente che, come nel campionamento, anche in questo caso la riproduzione del movimento sarà tanto più fedele quanto più elevata sarà la frequenza di "scatto".

# CAMPIONAMENTO IDEALE SEGNALI A BANDA LIMITATA

Il campionamento di una grandezza analogica è ottimale se non comporta perdita di informazioni, ovvero se è possibile ricostruire perfettamente la grandezza analogica originaria a partire dai suoi campioni.



E' possibile campionare e ricostruire fedelmente a partire dai campioni, solo un segnale con un numero limitato di armoniche che cadono entro una determinata banda di frequenze.



# TEOREMA DEL CAMPIONAMENTO (DI NYQUIST-SHANNON)

Il **teorema del campionamento** (o *teorema di Nyquist-Shannon*) afferma che, per campionare correttamente (senza perdita di informazioni) un segnale a banda limitata, è sufficiente campionarlo con una frequenza di campionamento pari almeno al doppio della massima frequenza del segnale (tale frequenza viene anche detta **frequenza di Nyquist**).



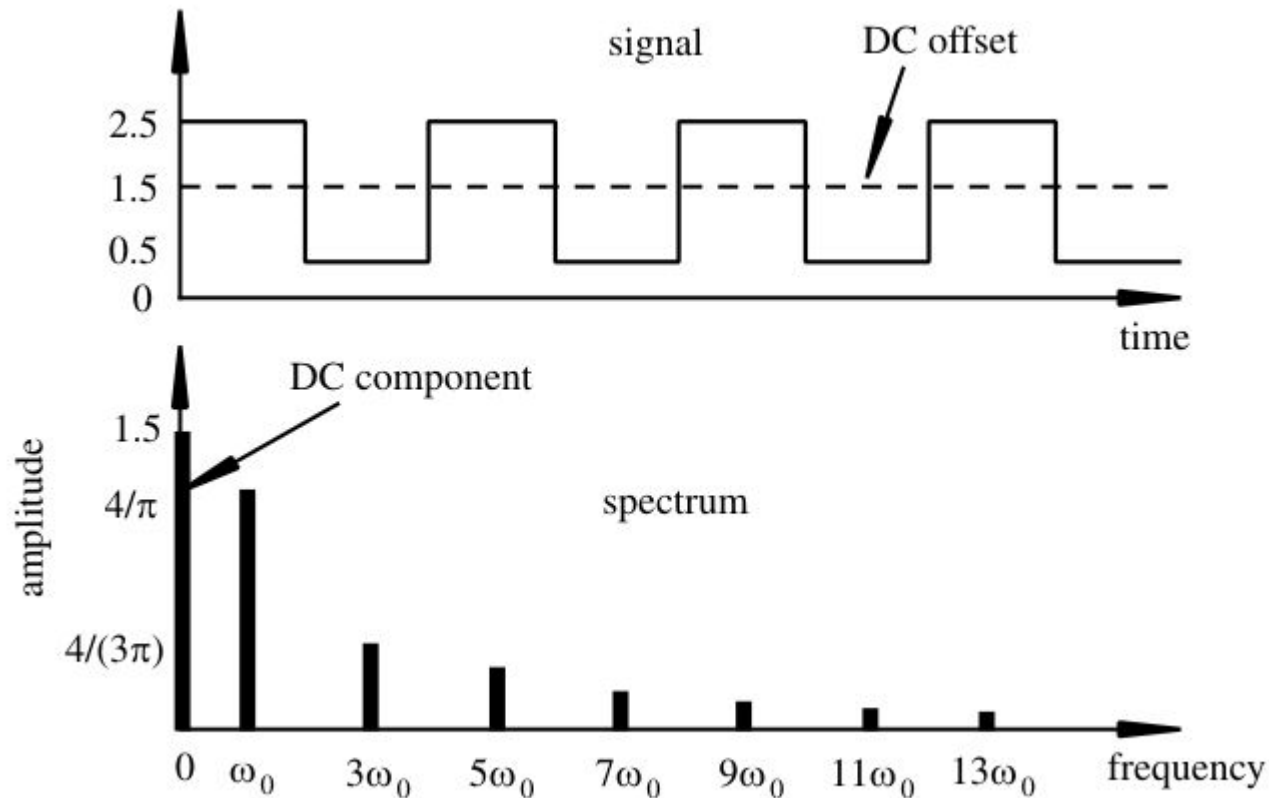
# CAMPIONAMENTO DI SEGNALI REALI



Il campionamento non viene mai fatto alla frequenza di Nyquist, ma sempre usando frequenze convenientemente superiori, in modo da aumentare la separazione fra le due parti dello spettro del segnale campionato. In pratica si usa campionare con  $f_{camp}$  pari almeno al quadruplo (o più: cinque o dieci volte sono valori tipici usati in campo industriale) della frequenza massima del segnale. In questo modo, anche usando un filtro reale (non a pendenza infinita), è possibile separare la parte utile dello spettro da quella che deve essere eliminata.

# CAMPIONAMENTO DI SEGNALI REALI

I segnali reali non hanno una banda limitata. Per esempio un'onda quadra ha uno spettro composto da infinite armoniche e dunque non è possibile individuare una frequenza massima.



# CAMPIONAMENTO DI SEGNALI REALI

L'ampiezza delle armoniche del segnale decresce con la frequenza dell'armonica stessa.

In un'onda quadra l'ampiezza delle armoniche decresce al crescere dell'ordine  $n$  dell'armonica secondo la legge  $1/n$ , cioè l'ampiezza della quindicesima armonica è  $1/15$  di quella fondamentale e così via.

**E' possibile limitare tale banda tenendo in considerazione solo le armoniche *significant*, cioè quelle aventi una ampiezza non "troppo piccola".**

Nell'onda quadra, le armoniche superiori alla centesima hanno un'ampiezza inferiore a  $1/100$  della prima armonica e dunque possono essere trascurate senza che ciò comprometta la qualità del segnale.

Supponendo di avere un'onda quadra con frequenza 50 Hz, per considerare solo le prime 100 armoniche, si può ritenere che la banda arrivi fino a  $100 \times 50 \text{ Hz} = 5\text{kHz}$ . Per campionare correttamente bisognerà usare una frequenza di campionamento almeno doppia di 5

kHz, cioè almeno pari a 10 kHz.



## Why 44.1 kHz for Audio CDs?

- Sound is audible in 20 Hz to 20 kHz range:  
 $f_{\max} = 20 \text{ kHz}$  and the Nyquist rate  $2 f_{\max} = 40 \text{ kHz}$
- What is the extra 10% of the bandwidth used?  
Rolloff from passband to stopband in the magnitude response of the anti-aliasing filter
- Okay, 44 kHz makes sense. Why 44.1 kHz?  
At the time the choice was made, only recorders capable of storing such high rates were VCRs.  
NTSC: 490 lines/frame, 3 samples/line, 30 frames/s = 44100 samples/s  
PAL: 588 lines/frame, 3 samples/line, 25 frames/s = 44100 samples/s



# L'EFFETTO "RUOTA DI CARRO"

Un curioso effetto dovuto all'aliasing è il cosiddetto **wagon-wheel effect** (o effetto "ruota di carro").

Il nome deriva dal fatto che in alcuni film western le ruote dei carri sembrano ruotare al contrario rispetto al verso corretto. Il fenomeno è dovuto al campionamento effettuato dalle riprese cinematografiche (tipicamente da 24 a 50 immagini al secondo).

Tale campionamento, se la velocità di rotazione della ruota è abbastanza elevata, può non essere sufficiente per riprodurre correttamente il movimento. In pratica i fotogrammi "congelano" il movimento in posizioni che l'occhio poi interpreta erroneamente, ricostruendo un movimento al contrario.

<http://astro.unl.edu/classaction/animations/binaryvariablestars/wagonwheel.html>

<https://www.youtube.com/watch?v=6XwgbHjRo30>

# SENSORI E TRASDUTTORI

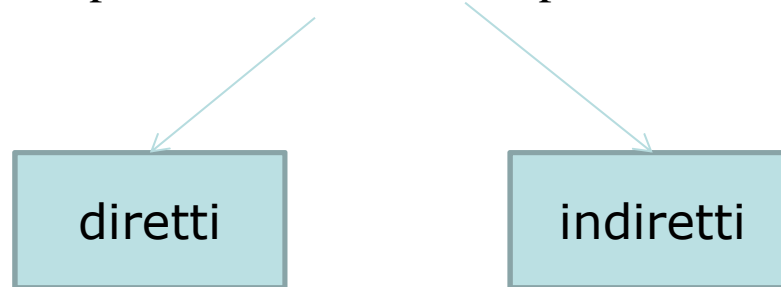


# SENSORI E TRASDUTTORI

Viene definito sensore uno strumento, o una parte di un sistema di misura, in grado di rilevare il valore di una certa grandezza.

Risulta essere, quindi, l'elemento del sistema il cui comportamento è influenzato dalla variazione della grandezza da misurare.

Il trasduttore è un dispositivo in grado di trasformare (trasdurre) le variazioni di una grandezza fisica non elettrica in corrispondenti variazioni di una grandezza elettrica. Viene definito trasduttore, proprio in quanto rileva un segnale di un certo tipo e ne trasmette in output uno di un altro tipo.





diretti

si definiscono trasduttori diretti quelli in grado di emettere un segnale direttamente dipendente dalla variazione della grandezza in esame e

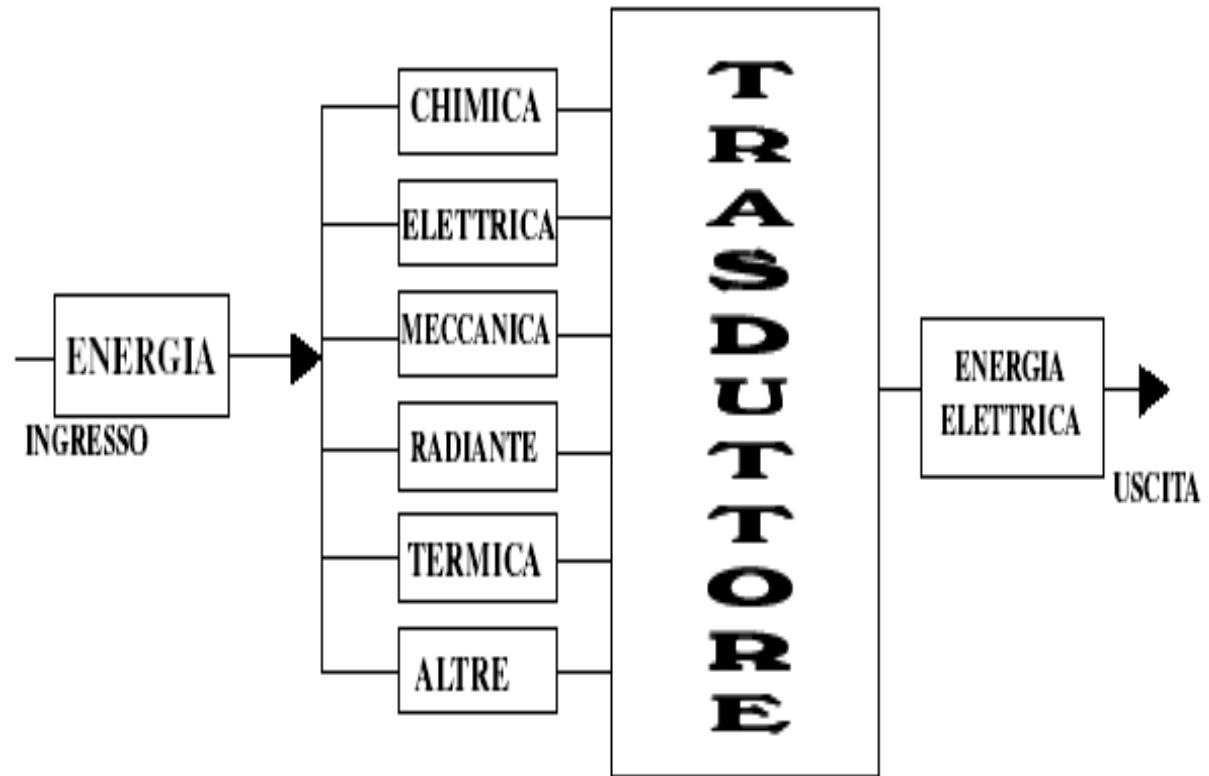
indiretti

Misurano l'effetto provocato dalla variazione della grandezza in esame su un componente del sistema di misura; i trasduttori derivati misurano una grandezza proporzionale a quella direttamente interessata.

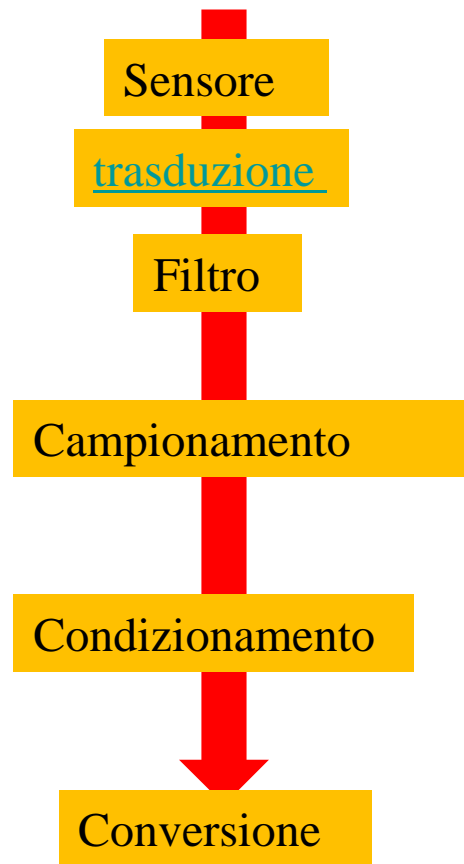


I trasduttori vengono collegati con sistemi elettrici per fornire segnali elettrici indicativi dello stato del fenomeno percepito. Essi, quindi, consentono di misurare e controllare, per mezzo di apparecchiature elettroniche, le variazioni subite da grandezze fisiche di natura diversa quali, ad esempio, la velocità, la temperatura, la pressione...

## SCHEMA A BLOCCHI DI UN TRASDUTTORE



## IL TRASDUTTORE NELLA CATENA DI ACQUISIZIONE DATI.



## SENSORE:

Il sensore o trasduttore è il primo elemento della catena di acquisizione dati.



l'intervallo della linearità, deve essere così grande da consentire una buona funzione di trasferimento;

la sensibilità: esprime il rapporto fra la variazione di grandezza di ingresso e la variazione di quella di uscita;

l'errore di misura, rappresenta l'errore tra la grandezza reale e quella misurata;

le caratteristiche dinamiche che rappresentano il comportamento del sensore se l'ingresso compie brusche variazioni;

il tipo di segnale di uscita desiderato; in base ad esso si può scegliere di utilizzare un sensore resistivo invece di uno di tensione, oppure un sensore ad uscita analogica al posto di una digitale.

## **FILTRI:**

In un filtro posizionato dopo il sensore permette un campionamento migliore

## **CAMPIONAMENTO:**

Il circuito di campionamento permette alla parte di circuito interessata di avere il tempo sufficiente per convertire il segnale campionato.

L'importanza di questo circuito è molto grande perché permette molto semplicemente il dimensionamento del tempo di campionamento per migliorare la conversione.

## **CONDIZIONAMENTO**

Questa parte della catena può essere composta da più parti, che non sono sempre presenti. Queste circuiti aggiuntivi possono essere:

amplificatore

sommatore di offset positivo o negativo ecc....

## **CONVERSIONE :**

La conversione è la parte della catena di acquisizione dati in cui il **DATO ANALOGICO VIENE CONVERTITO IN DATO DIGITALE CORRISPONDENTE**. Questa conversione è eseguita dal ADC (Convertitore Analogico-Digitale), il quale ha in ingresso il dato analogico che è già passato attraverso le fasi precedenti mentre in uscita ha il dato digitale su N bit con un errore di un LSB in più o in meno. LSB è il bit meno significativo mentre MSB è il bit più significativo. Quindi si può notare come la precisione è dovuta dal numero di bit e dalla massima ampiezza del segnale di ingresso, infatti più valori di uscita ci sono in un arco di valori più il campionamento sarà preciso.

Si dicono attivi quando generano una tensione o una corrente in seguito all'applicazione ad essi di una grandezza fisica. Questo tipo di trasduttore, dunque, non necessita di alcuna alimentazione. Per essi, però, esiste un grosso vincolo: la forma del segnale in uscita, e la quantità di energia emessa, è limitata dalla quantità di energia disponibile nel fenomeno trasdotto e dalla efficienza della conversione



**Esempi di trasduttore attivo:**

*Termocoppie*

*Sensori piezoelettrici*

## Trasduttori Passivi

Un trasduttore passivo e' un dispositivo dotato di un ingresso fisico, di un segnale elettrico in uscita e di un ingresso elettrico di eccitazione (un'alimentazione). La loro efficienza puo' essere migliorata combinando diversi metalli e le caratteristiche d'uscita sono "garantite" dall'alimentazione. Inoltre, la loro struttura e' semplice, la loro affidabilità elevata e la loro sensibilità puo' essere regolata, variata, utilizzando serie di giunzioni metalliche. L'unico svantaggio e' dovuto all'elevato costo di realizzazione di questi circuiti.



### Esempi di trasduttori passivi:

- sensori potenziometrici, capacitivi
- estensimetri elettrici a filo,
- termometri a resistenza, ...

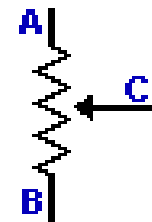
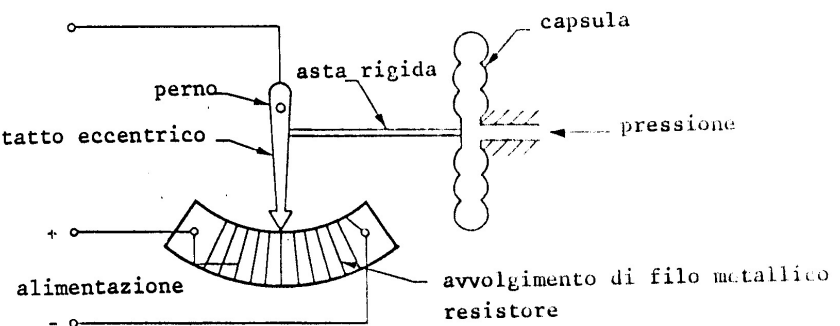


# Esempi di trasduttori

I sensori potenziometrici sono generalmente utilizzati per ottenere un uscita elettrica da elementi elastici utilizzati nei manometri meccanici (capsule, soffietti o tubi bourdon).

I sensori potenziometrici (POTENZIOMETRI) sono dei sistemi fisici di controllo in grado di inserire una resistenza variabile in un circuito elettrico

Basati solitamente su un sistema meccanico rotativo (POTENZIOMETRI a manopola) oppure scorrevole (POTENZIOMETRI a slitta, detti anche slider) i POTENZIOMETRI forniscono tra i loro terminali (A,B) una resistenza elettrica il cui valore e' determinato dalla posizione della manopola o slitta (C) .



I principali vantaggi sono:

- basso costo
- uscita elettrica

I principali limiti sono:

- scarsa affidabilità

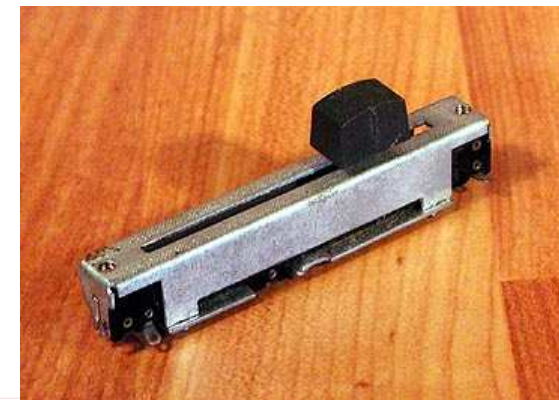
Le più diffuse tecnologie sono:

- avvolgimento di filo metallico
- deposito in film spesso

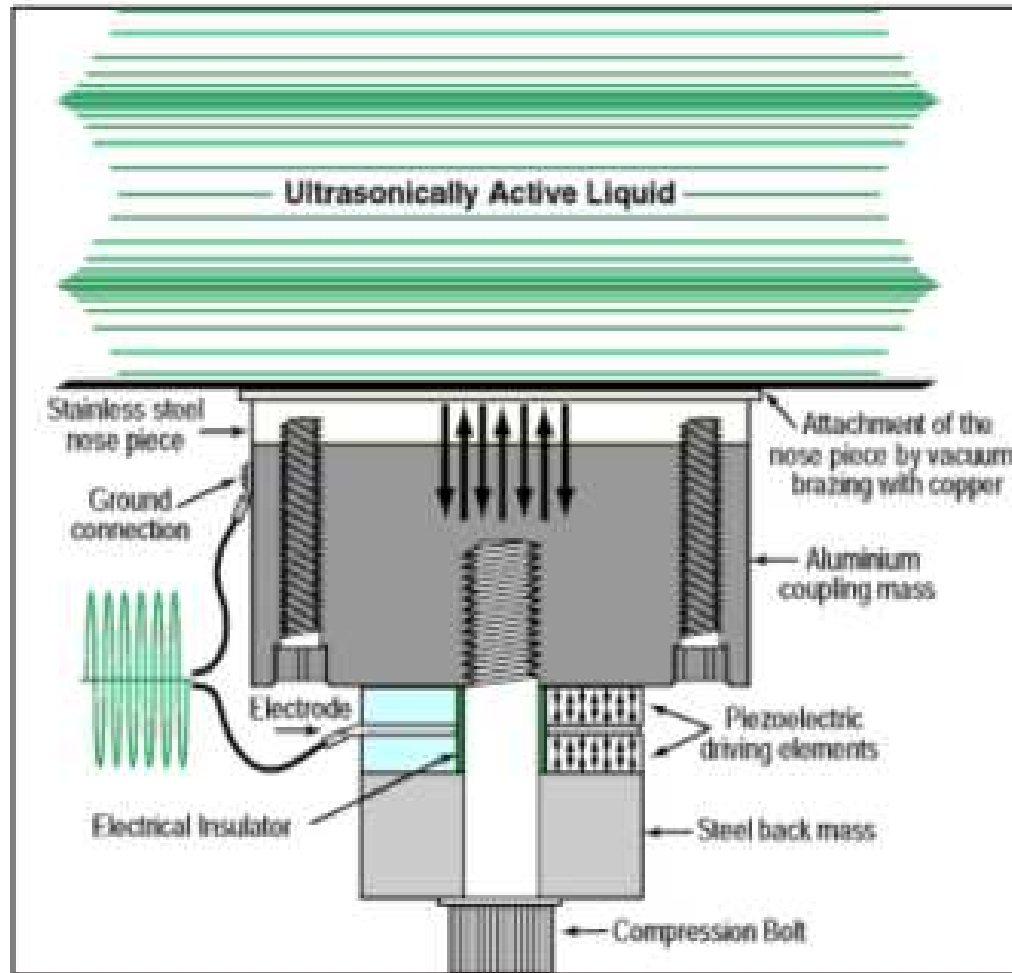
Il principio di misura si basa sulla variazione della resistenza elettrica del circuito impegnato dal contatto strisciante

I principali campi di utilizzo sono:

- pressione relativa
- mezzo liquido e gassoso
- petrolifero



I trasduttori piezoelettrici convertono l'energia elettrica alternata direttamente in energia meccanica attraverso l'effetto piezoelettrico, mediante il quale un materiale può variare le proprie dimensioni qualora venga sottoposto ad un campo elettrico.



L'energia elettrica alla frequenza ultrasonica, proveniente dal generatore, viene applicata ad uno o più elementi piezoelettrici presenti nel trasduttore che vengono messi in vibrazione. Queste vibrazioni vengono amplificate attraverso dei dispositivi di risonanza e dirette nel liquido (lega brasante) mediante un piatto di irraggiamento. I primi trasduttori di questo tipo utilizzavano come materiali piezoelettrici cristalli di quarzo o titanato di bario che sono però fragili e instabili. Gli attuali materiali impiegati sono soprattutto ceramici avanzati e altamente stabili.

I sensori piezoelettrici sono principalmente utilizzati per misure di pressione dinamiche.

I principali vantaggi sono:

- ottima risposta in frequenza
- discreta accuratezza

I principali limiti sono:

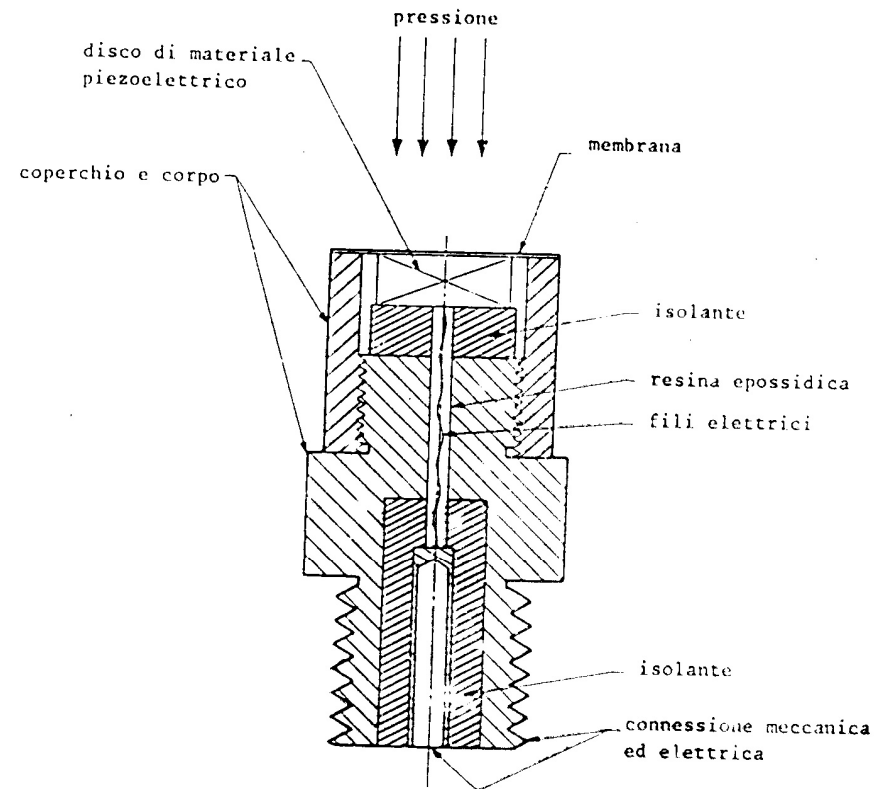
- elevato costo
- elevata impedenza in uscita

Le più diffuse tecnologie sono:

- cristallo in quarzo
- ceramica piezoelettrica

I principali campi di utilizzo sono:

- mezzo liquido e gassoso
- acustica
- campo balistico
- prove motori



a) trasduttore di pressione piezoelettrico con precarico