

## Introduzione ai sistemi di acquisizione e misura di segnali e dati biomedici

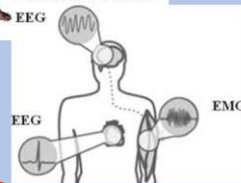
Che tipologie di segnali biomedici e di quantità misurabili esistono?

Attività elettrica cerebrale (EEG, MEG)  
proprietà meccaniche del timpano  
ERG, EOG  
pressione arteriosa  
flusso sanguigno  
suoni cardiaci, polmonari  
attività elettrica muscolare (EMG)  
radiopacità  
impedenza acustica  
antropometria  
movimenti  
livello di idratazione, flusso sanguigno cutaneo



pressione intracranica  
temperatura  
pressione intraesofagea  
respirazione: volume  $\text{VO}_2$ ,  $\text{VCO}_2$ , pressioni  $\text{pO}_2$ ,  $\text{pCO}_2$   
gittata cardiaca

attività elettrica cardiaca (ECG)  
pH ematico  
concentrazioni enzimatiche  
mappe di potenziali, temperatura

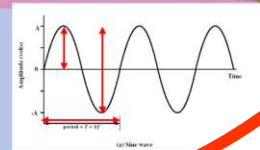
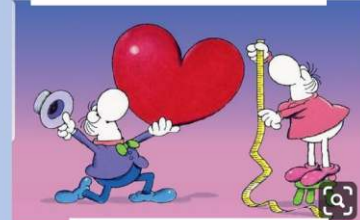


→ *Deterministici/ Stocastici*

→ *Continui/ Discreti*

→ *Diretti/ Indiretti*

Che elementi caratterizzano una misura?



# Lezione 1:

# Introduzione ai sistemi di acquisizione e misura di segnali e dati biomedici

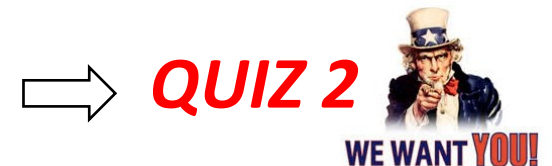
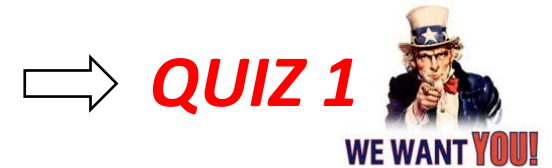
## *Misure e Acquisizione di Dati Biomedici*

Sarah Tonello, PhD

Dipartimento di ingegneria dell'informazione  
Università di Padova

# OUTLINE

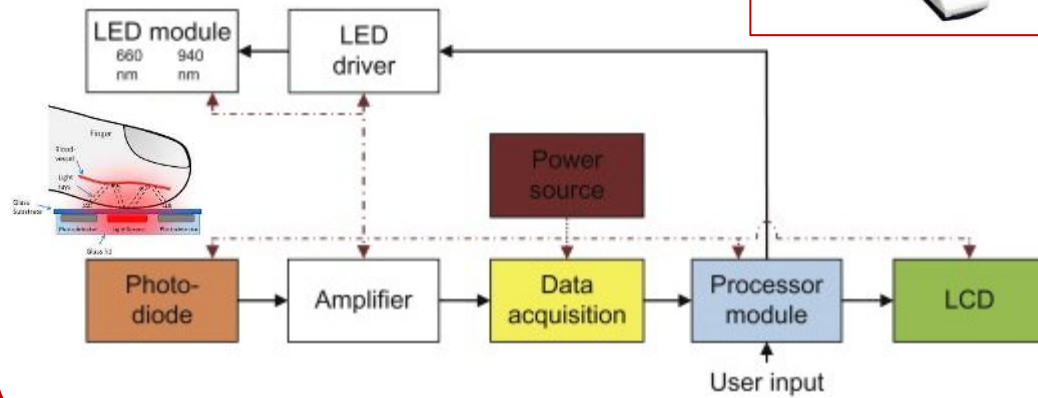
- Esempi di sistemi di acquisizione e misura di dati biomedici: differenze e tratti in comune
- Classificazione dei segnali
- Caratteristiche in tempo e frequenza di segnali deterministici e stocastici
- Concetto di digitalizzazione dei segnali
- Grandezze metrologiche: Precisione, Accuratezza e Incertezza di misura



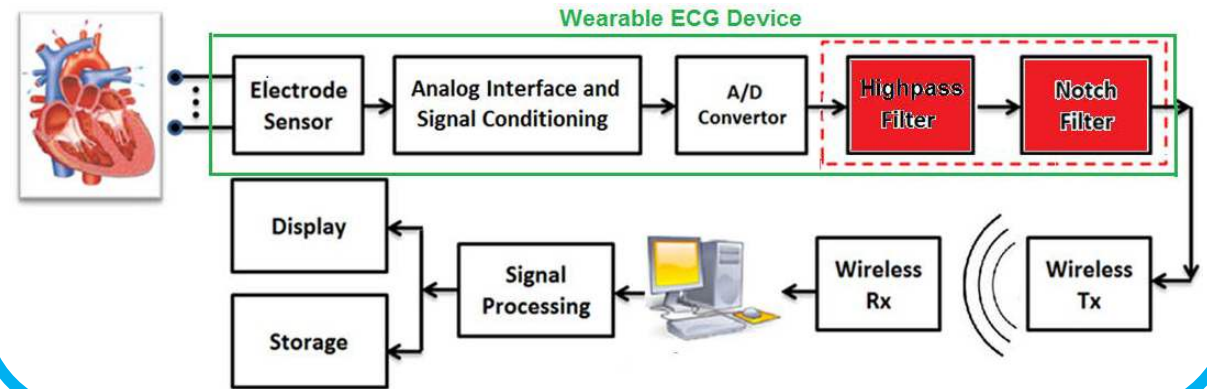
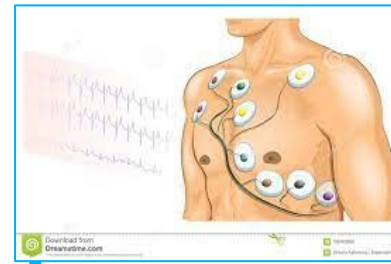
***Quando sentite  
"Sistemi di acquisizione di  
segnali e dati biomedici"  
quali sono i primi esempi che  
vi vengono in mente?***



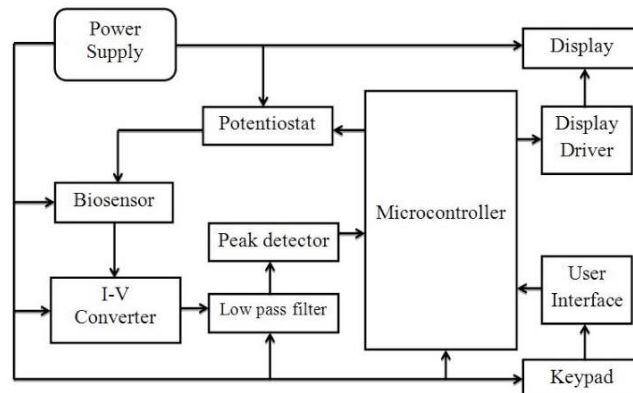
## Sistemi con sensori ottici: Es. Pulsossimetro



## Sistemi con elettrodi conduttivi Es. ECG



## Sistemi con sensori chimici: Es. Glucometro



## Sistemi con sensori resistivi o capacitivi: es. Pressure sensor, Position monitoring

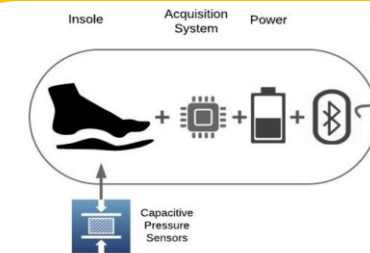


Fig. 1: Scheme of s

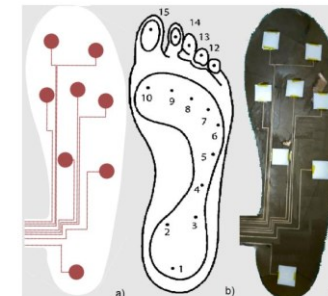
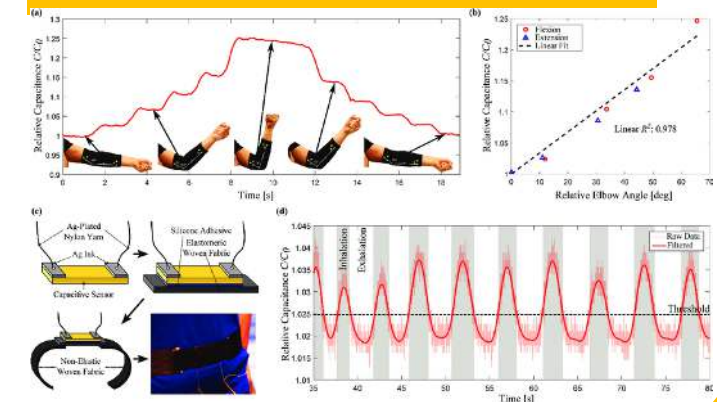
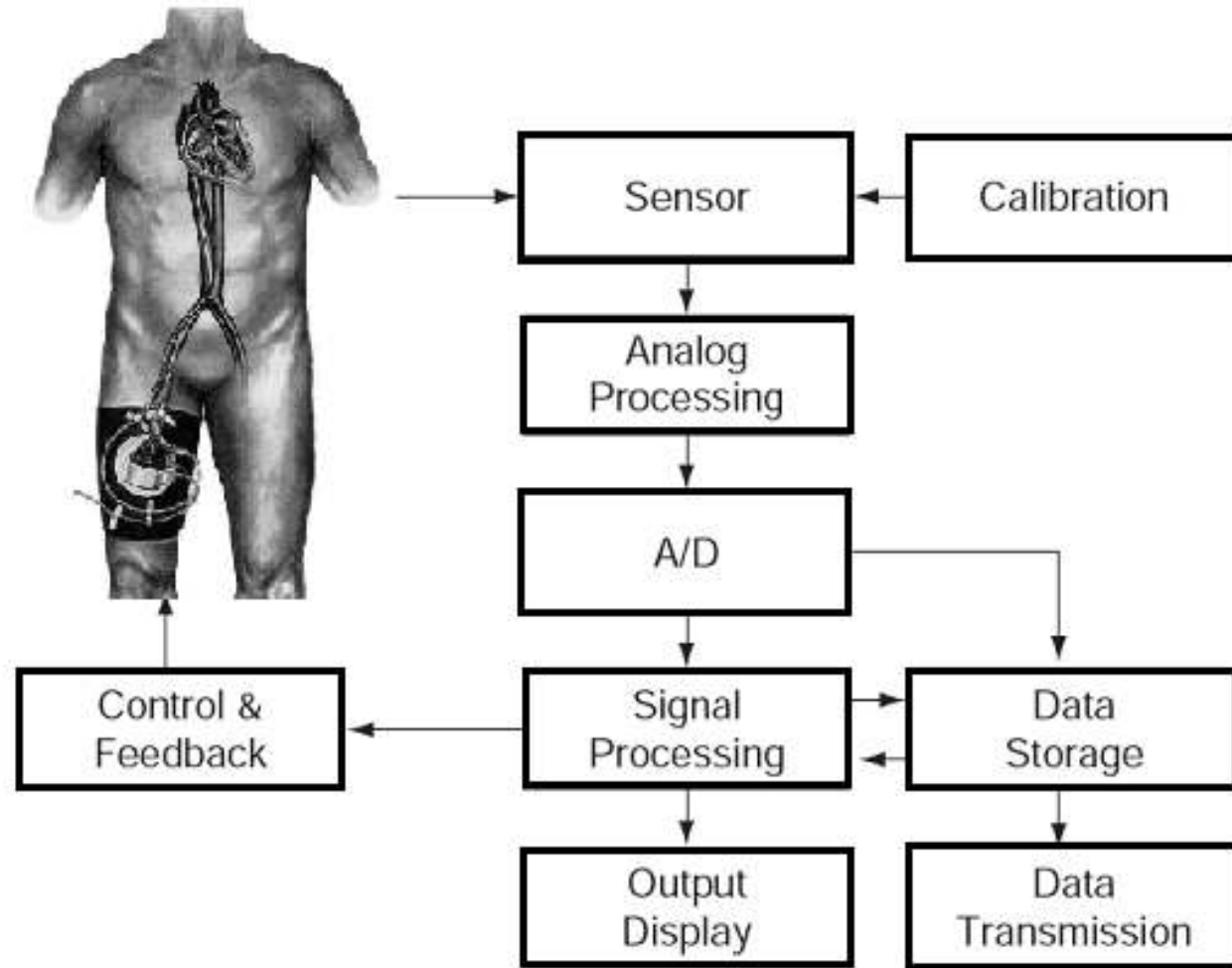
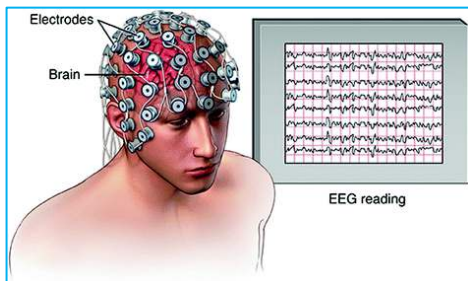
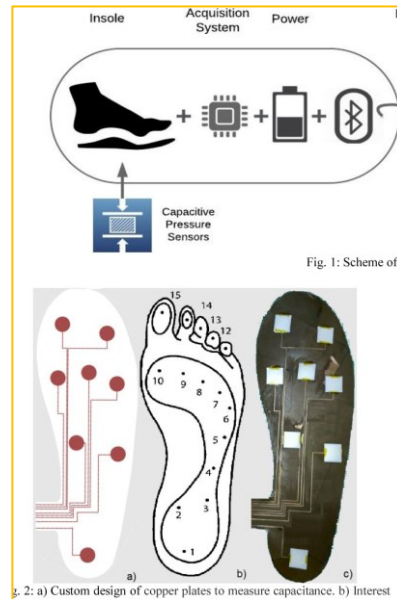
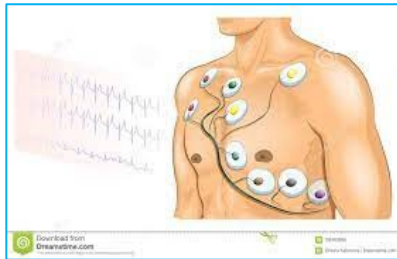


Fig. 2: a) Custom design of copper plates to measure capacitance. b) Interest



Tante differenti sorgenti e principi di trasduzione....

...ma uno schema (quasi) comune!



*Sensore specifico per sorgente*

CARATTERIZZAZIONE DEL SENSORE

CONDIZIONAMENTO

CONVERSIONE E ACQUISIZIONE

MEMORIA

VISUALIZZAZIONE E TRASMISSIONE

**N.B. Necessario conoscere molto bene le caratteristiche della sorgente e come la si vuole utilizzare, misurare, salvare per indirizzare al meglio il design del sistema**

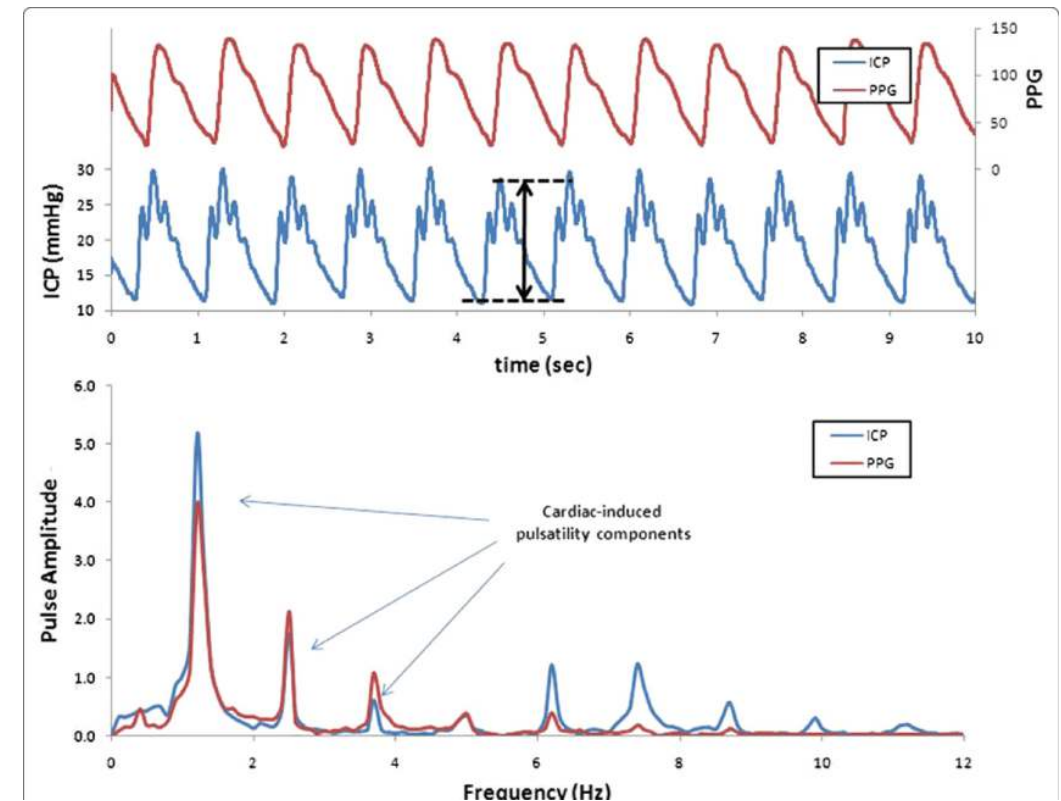
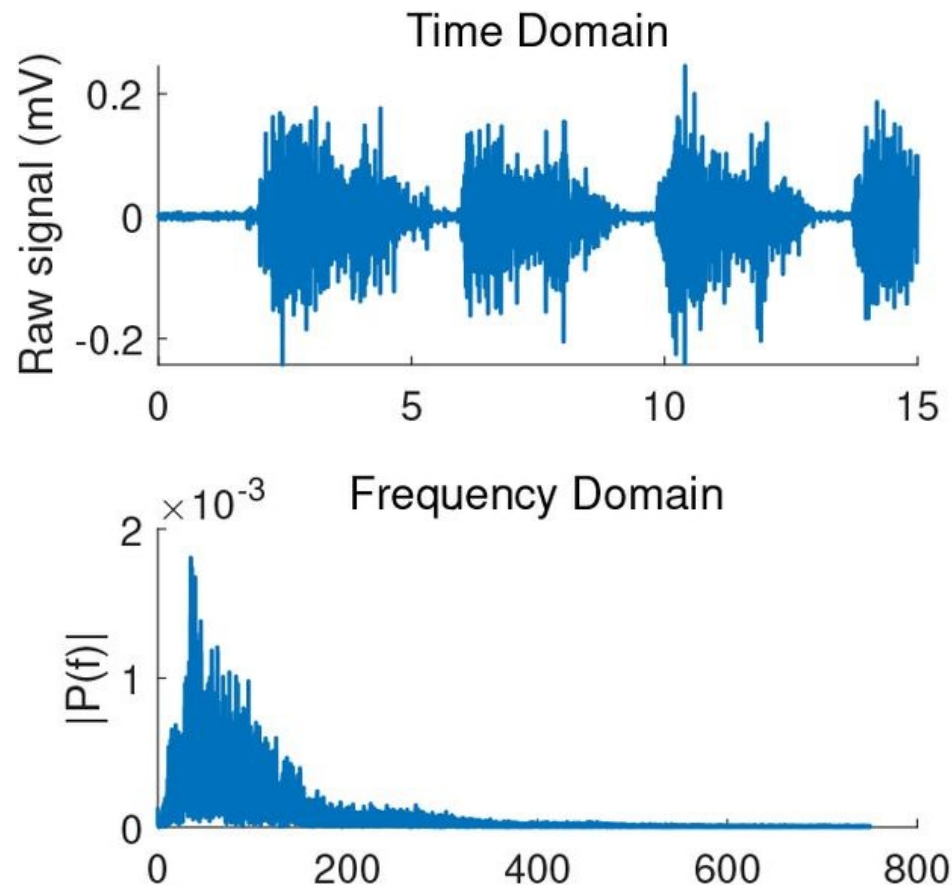




***N.B. Necessario conoscere molto bene le caratteristiche della sorgente e come la si vuole utilizzare, misurare, salvare per indirizzare al meglio il design del sistema***

### Esempio: EMG vs PPG

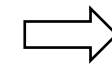
Forte differenza tra segnali stocastici vs pseudo-deterministici, tra segnali molto ricchi in frequenza, tra la necessità di salvare tutto il segnale o solo dei parametri quantitativi specifici



# OUTLINE

- Esempi di sistemi di acquisizione e misura di dati biomedici: differenze e tratti in comune

- Classificazione dei segnali
- Caratteristiche in tempo e frequenza di segnali deterministici e stocastici
- Concetto di digitalizzazione dei segnali



**QUIZ 1**



**WE WANT YOU!**

- Grandezze metrologiche: Precisione, Accuratezza e Incertezza di misura



**QUIZ 2**



**WE WANT YOU!**

# Segnali biomedici come serbatoi di informazione

## SEGNALI

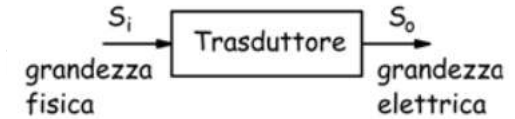
- Funzioni del tempo che rappresentano il variare di **grandezze fisiche** (massa, pressione, temperatura, velocità....).
- **sorgenti** che contengono l'informazione da trasmettere

**TRASDUTTORI**

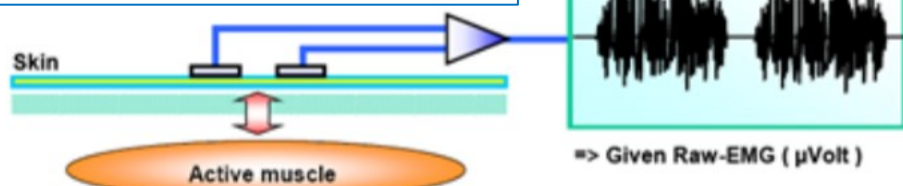
## SEGNALI ELETTRICI

grandezze elettriche (**tensione o corrente**) che varia in funzione del tempo secondo una legge matematica  $I(t)$ ,  $V(t)$ , riportando peculiarità e caratteristiche del segnale originario

**Trasduttori**, sono dispositivi che acquisiscono in ingresso una grandezza fisica ed esprimono in uscita una grandezza elettrica cui valore è funzione della grandezza di ingresso.



### MISURA EMG

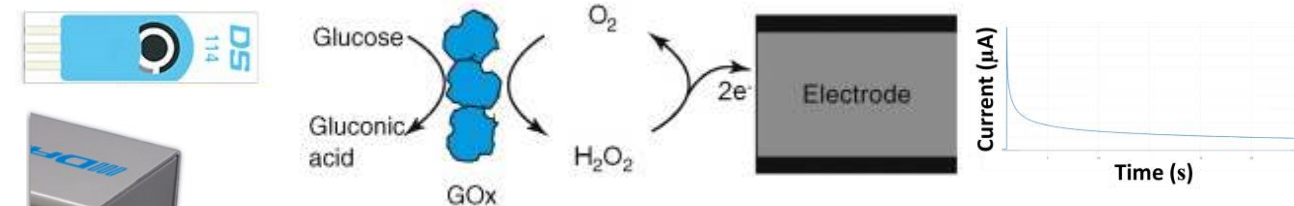


Potenziali d'azione elettrici

Segnale elettrico EMG grezzo in uscita



### MISURA ELETTROCHIMICA GLUCOSIO





# Segnali come serbatoi di informazione

## SEGNALI

- Funzioni del tempo che rappresentano il variare di **grandezze fisiche** (massa, pressione, temperatura, velocità...).
- Sono le **sorgenti** che contengono l'informazione da trasmettere

**TRASDUTTORI**

## SEGNALI ELETTRICI

grandezze elettriche (tensione o corrente) che varia in funzione del tempo secondo una legge matematica  $I(t)$ ,  $V(t)$ , riportando peculiarità e caratteristiche del segnale originario

## **CANALE DI TRASMISSIONE**

(Bluetooth, Cavo, Radio, WI-FI, LoRaWan..)

**SISTEMA DI ACQUISIZIONE**

- «**supporto fisico**» su cui viaggia l'informazione
- Essenziali per **trasmettere, elaborare e manipolare** le informazioni

**DESTINATARIO**

(MEMORIA)

# Classificazione dei segnali

## Rispetto alla forma

Costanti

Variabili

Periodici

Aperiodici

Onda  
Sinusoidale

Onda  
Quadra

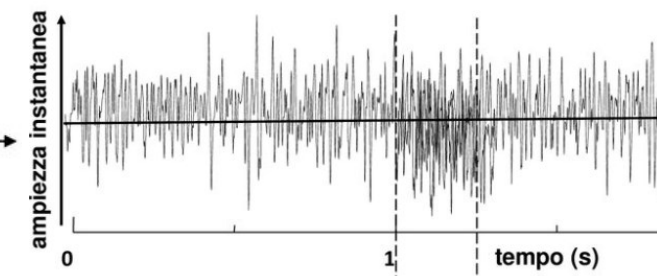
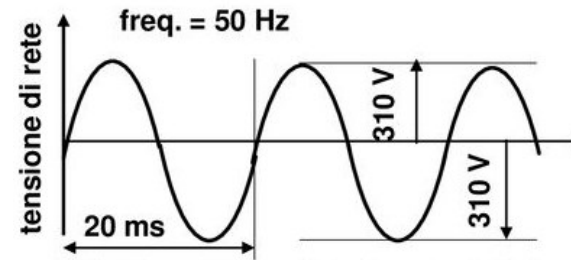
Onda  
Triangolare

Altre  $f(t)$

## Rispetto all'informazione

Deterministici

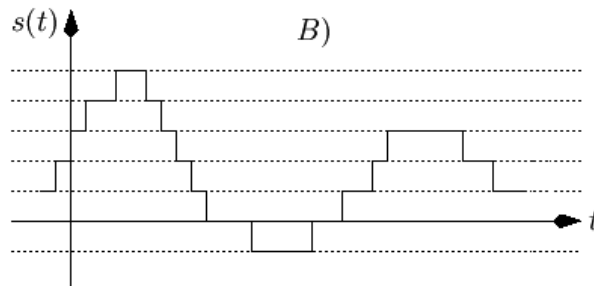
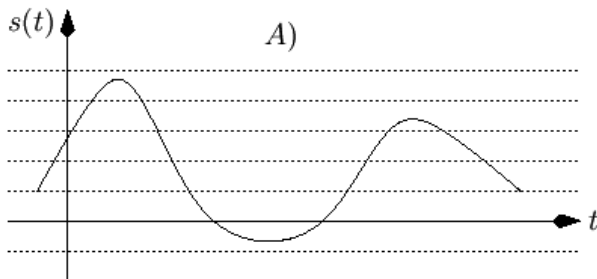
Stocastici/Aleatori



## Rispetto alle ampiezze

Continui

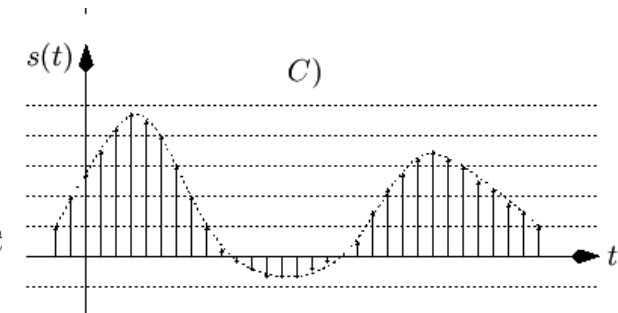
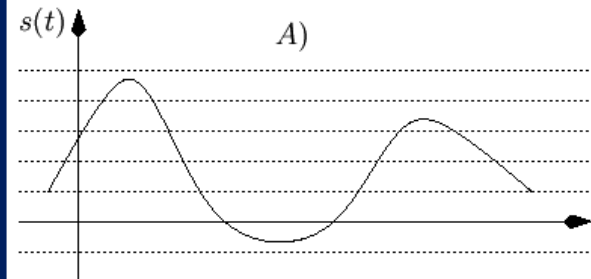
Quantizzati



## Rispetto al tempo

A tempo continuo

A tempo discreto



# Classificazione dei segnali

## Rispetto alla forma

Costanti

Variabili

Periodici

Aperiodici

Onda  
Sinusoidale

Onda  
Quadra

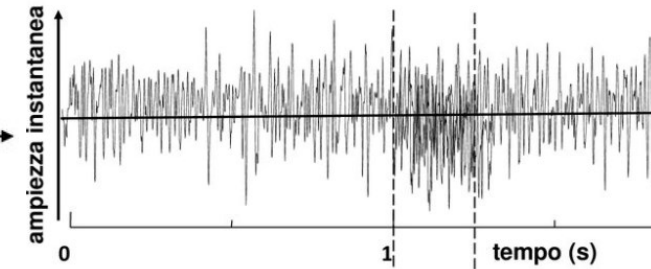
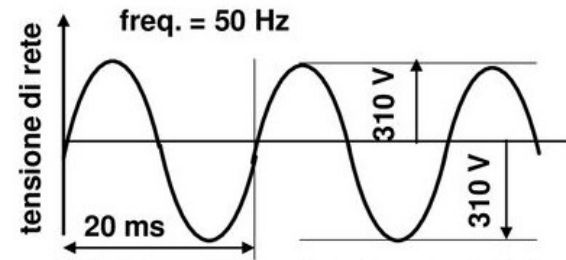
Onda  
Triangolare

Altre  $f(t)$

## Rispetto all'informazione

Deterministici

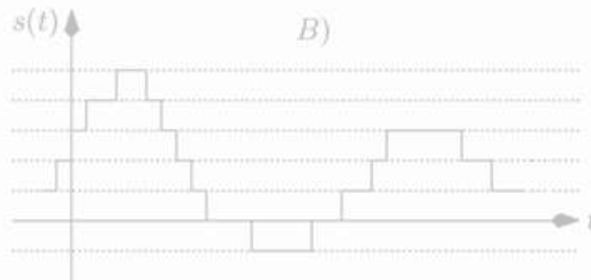
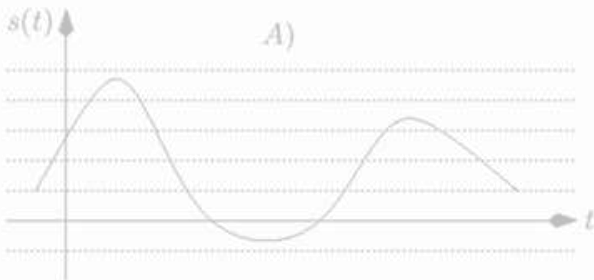
Stocastici/Aleatori



## Rispetto alle ampiezze

Continui

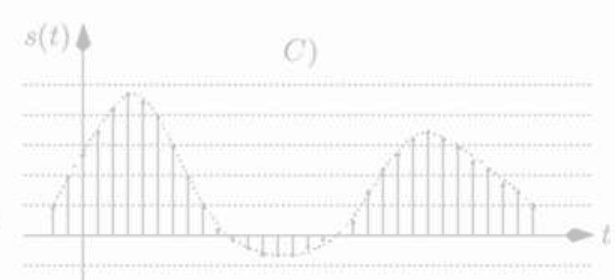
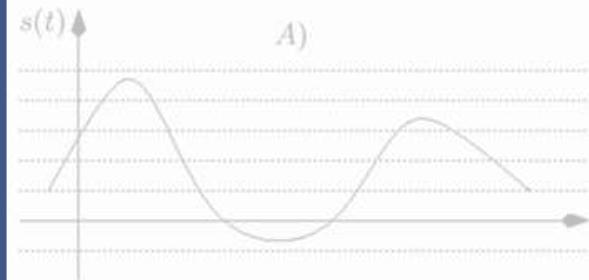
Quantizzati



## Rispetto al tempo

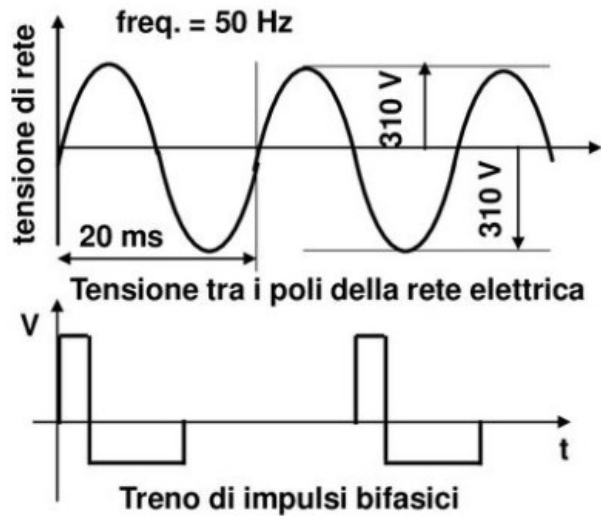
A tempo continuo

A tempo discreto

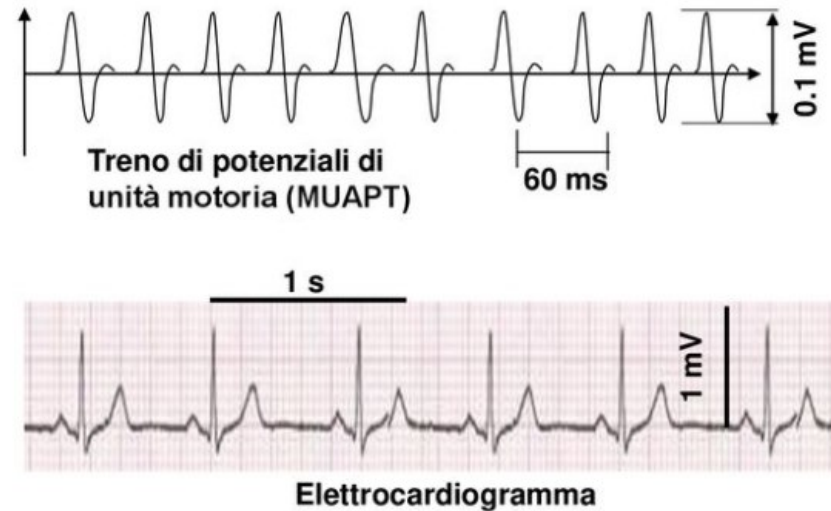


# Esempi di tipologie di segnali biomedici

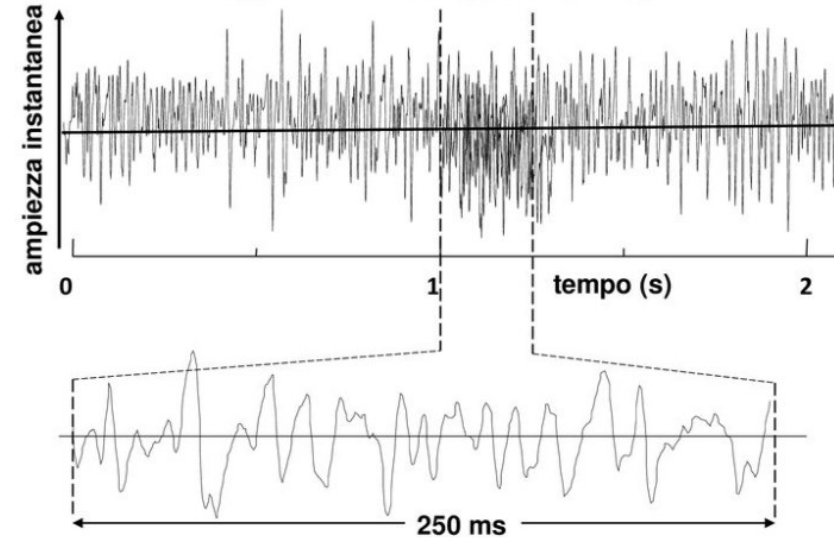
## Segnali deterministici



## Segnali "quasi" deterministici



## Segnali casuali (stocastici)



**Segnale deterministico:** forma d'onda definita matematicamente, spesso periodica. (Es. Tensione di rete, potenziali evocati, serie di impulsi)

**Segnale «quasi» deterministico:** segnale deterministico con alcuni parametri moderatamente e lentamente variabili (Es. ECG, PPG, MUAPT)

**Segnale casuale (stocastico):** non ha una forma d'onda e una precisa descrizione matematica. Ha una descrizione statistica in termini di probabilità di essere maggiore o minore di un dato valore in un dato istante (Es. EEG, EMG)

### Principali informazioni utili a descriverli:

- Periodo/specifiche durate di eventi
  - Spettro in frequenza
  - Ampiezza di Picco
  - Valore efficace
  - Potenza

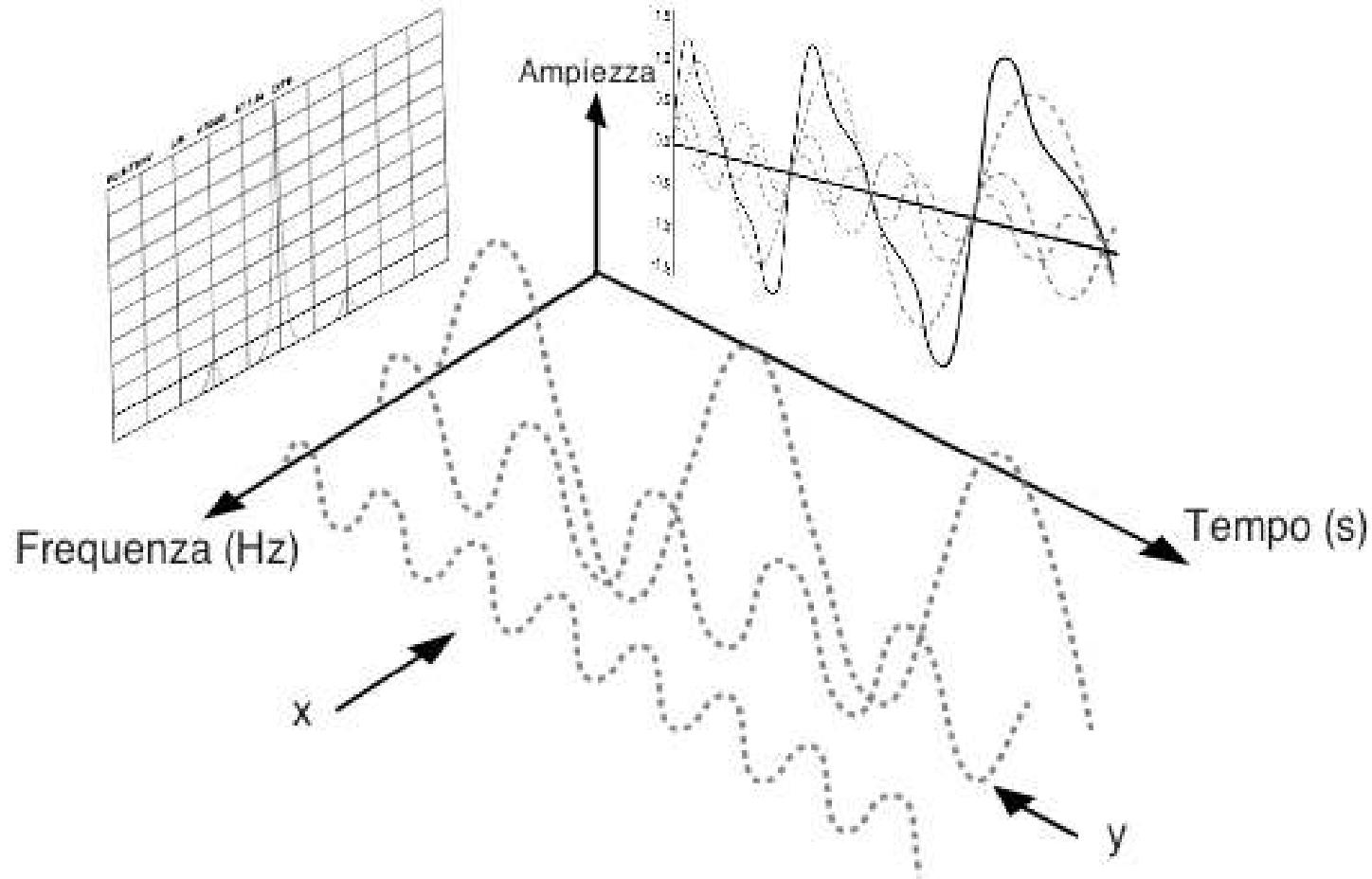
### Principali informazioni utili a descriverli:

- Spettro in frequenza
- Features specifiche in tempo e frequenza (es. Valore efficace, Varianza del segnale nel tempo, media o mediana dello spettro)

# Caratteristiche di un segnale

Lo stesso segnale può essere descritto anche nel dominio delle frequenze  $S(f)$ , cosa che risulta essere spesso più utile per particolari tipologie

Rappresentando il segnale come funzione  $s(t)$  del tempo, è possibile modellare il comportamento del segnale ed analizzarlo matematicamente



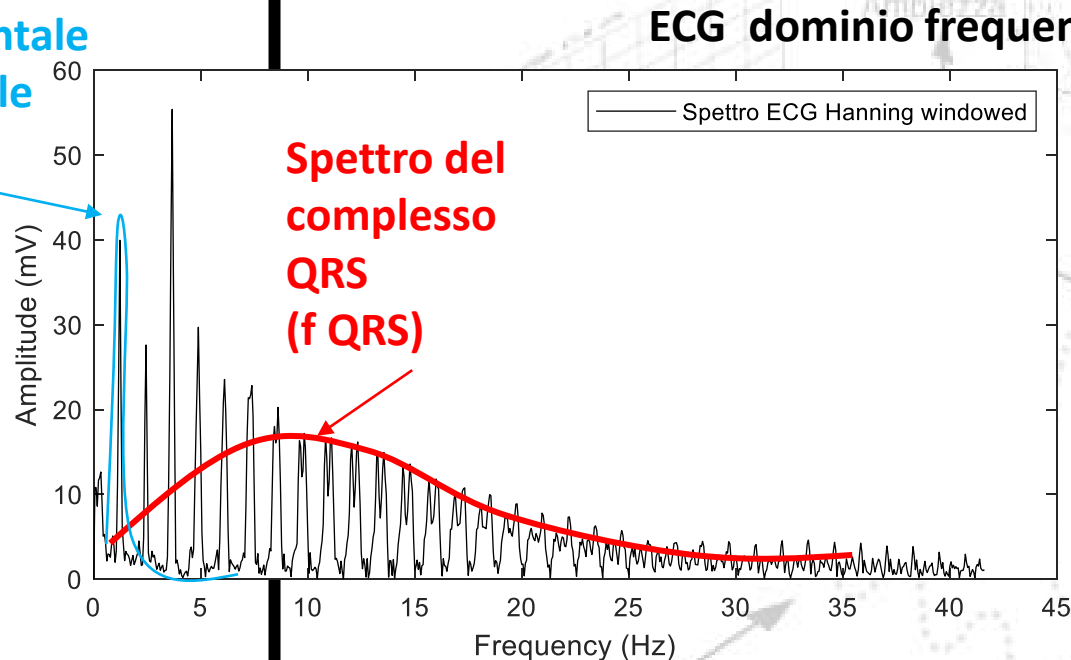


# Caratteristiche di un segnale

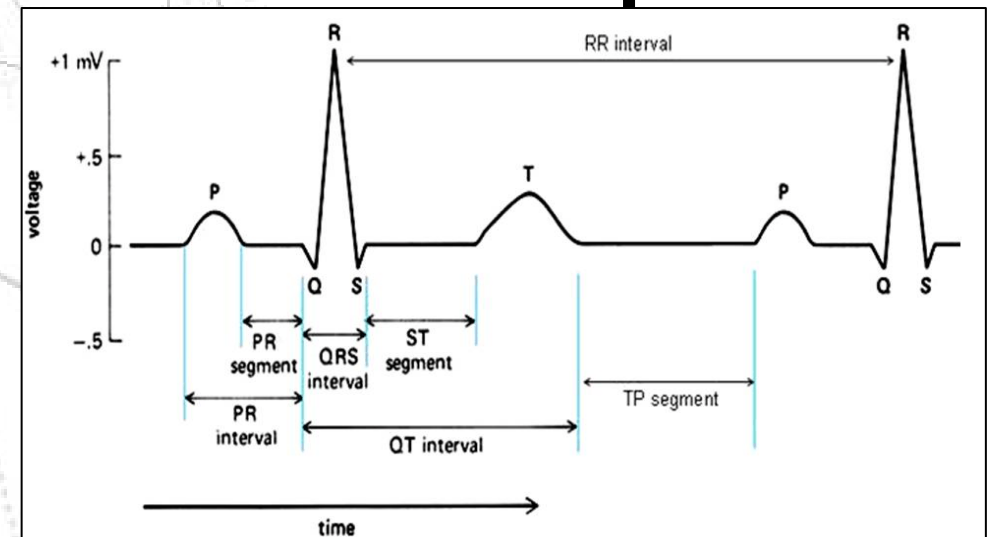
Lo stesso segnale può essere descritto anche nel **dominio delle frequenze  $S(f)$** , cosa che risulta essere spesso più utile per particolari tipologie

Rappresentando il segnale come **funzione  $s(t)$  del tempo**, è possibile modellare il comportamento del segnale ed analizzarlo matematicamente

Frequenza  
fondamentale  
del segnale  
(f ECG)



ECG dominio tempo



# Caratteristiche di un segnale

Lo stesso segnale può essere descritto anche nel **dominio delle frequenze  $S(f)$** , cosa che risulta essere spesso più utile per particolari tipologie

- Frequenze
- Ampiezze delle componenti (lineari o dB)
- Potenza
- Energia

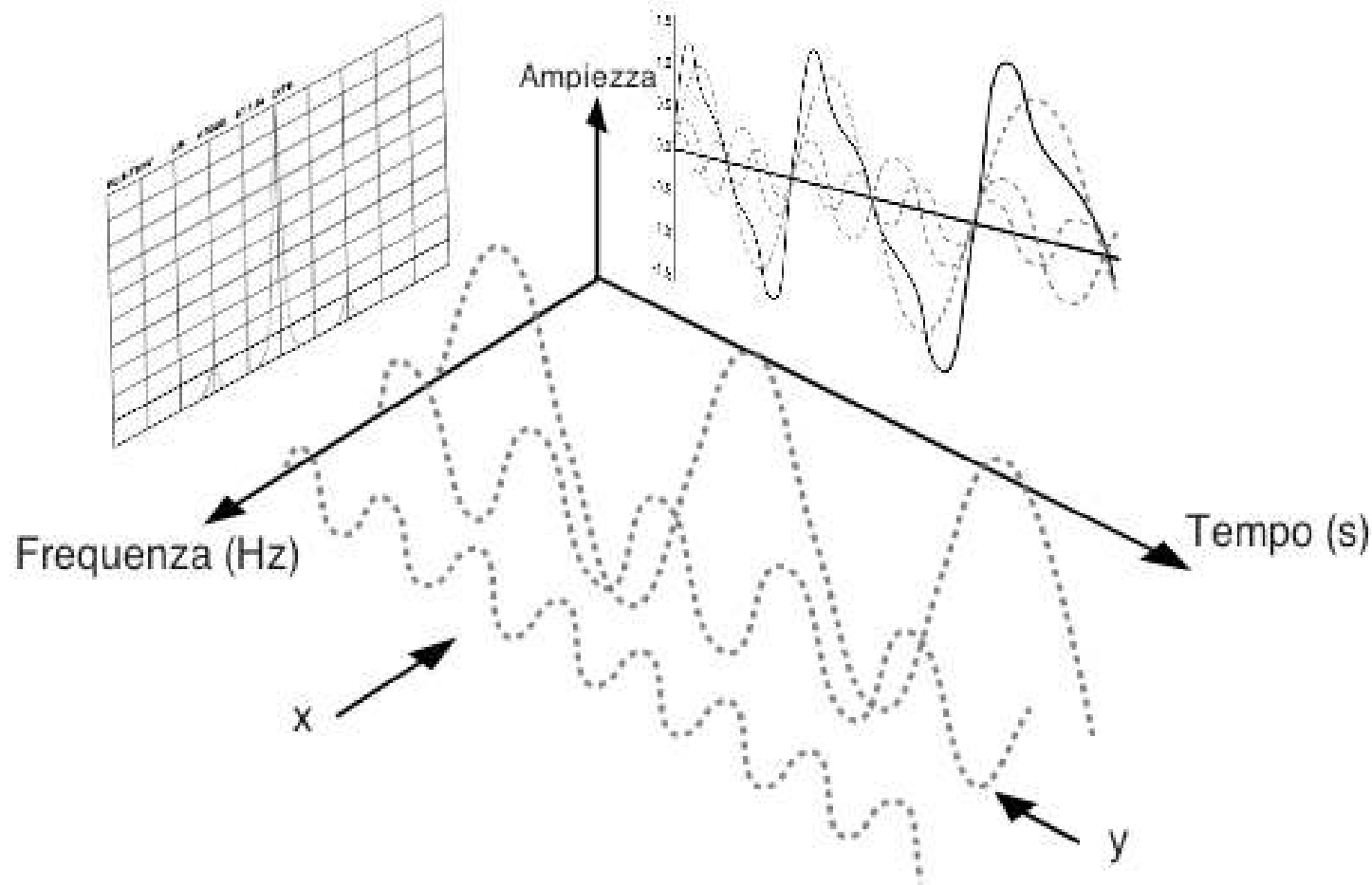
In caso di spettro discreto...

- Granularità in frequenza ( $\Delta f$ )

Rappresentando il segnale come **funzione  $s(t)$  del tempo**, è possibile modellare il comportamento del segnale ed analizzarlo matematicamente

- Periodo
- Fase
- Ampiezza picco- picco
- Valore efficace
- Potenza
- Energia

*In caso di campionamento...*  
→ Intervallo di campionamento ( $\Delta t$ )



# Caratteristiche di un segnale

Lo stesso segnale può essere però descritto nel dominio delle frequenze  $S(f)$ , cosa che risulta essere spesso più utile per particolari tipologie

- Frequenze
- Ampiezze delle componenti (lineari o dB)

- Potenza
- Energia

In caso di spettro discreto...

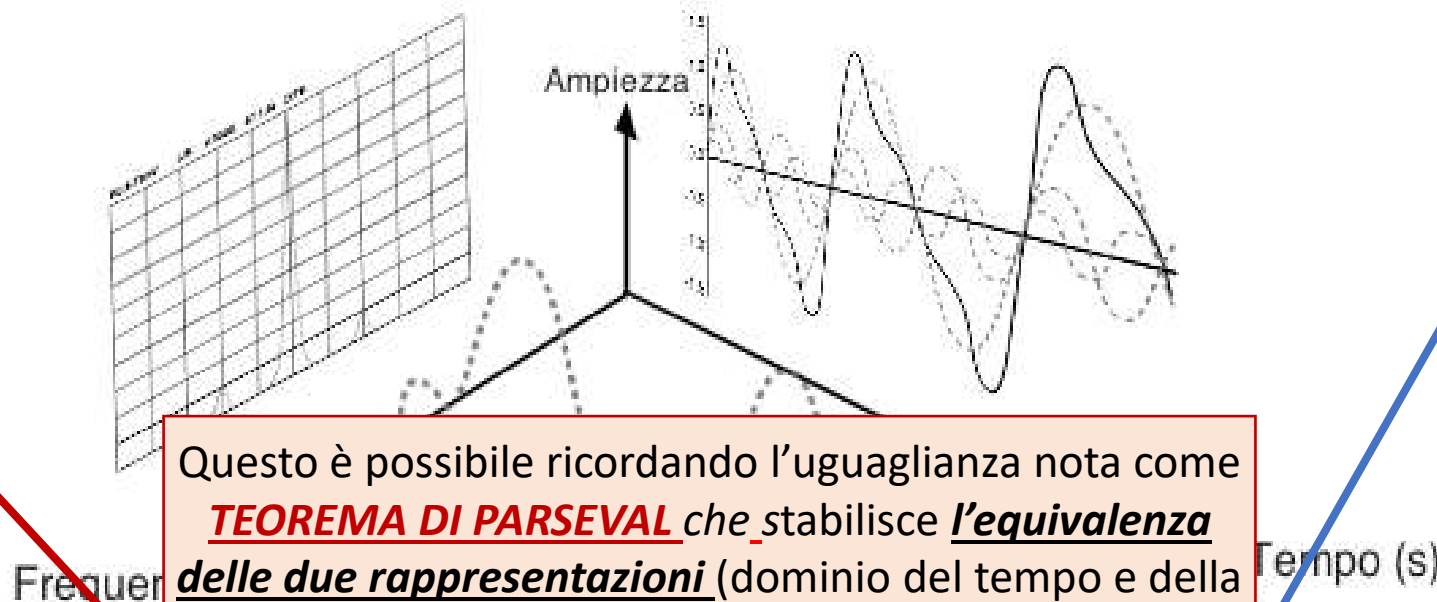
- Granularità in frequenza ( $\Delta f$ )

Rappresentando il segnale come funzione  $s(t)$  del tempo, è possibile modellare il comportamento del segnale ed analizzarlo matematicamente

- Periodo
- Fase
- Ampiezza picco- picco
- Valore efficace

- Potenza
- Energia

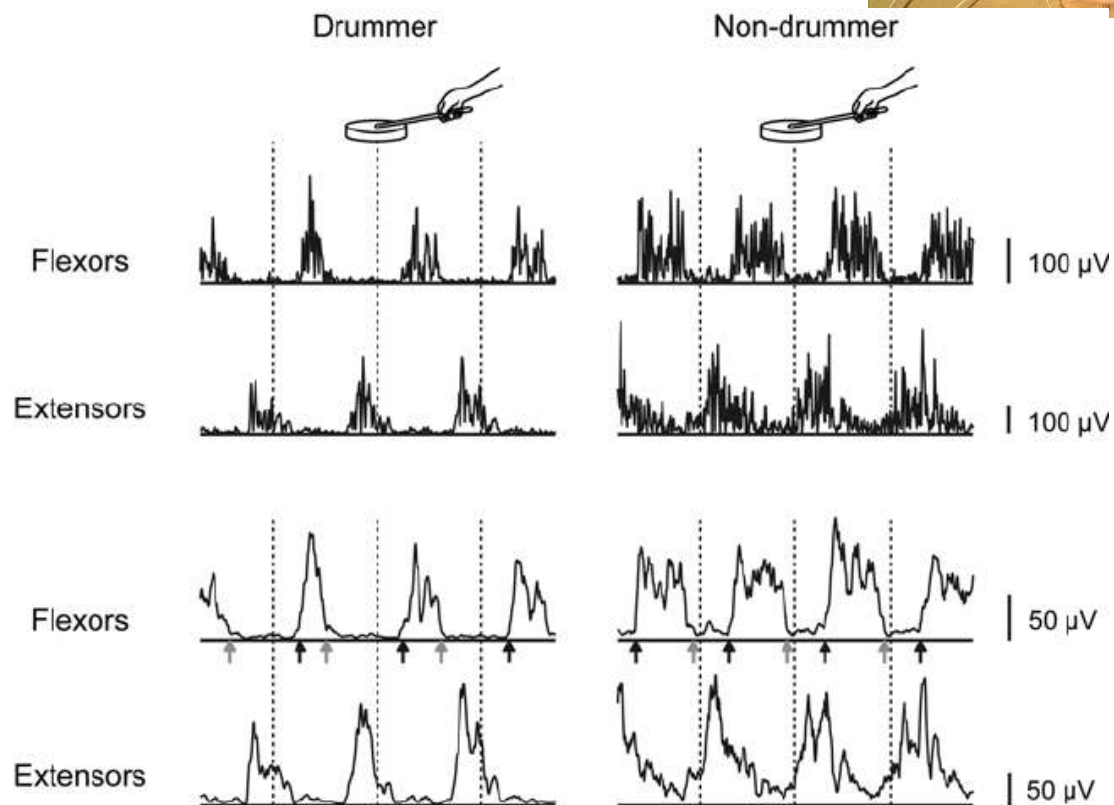
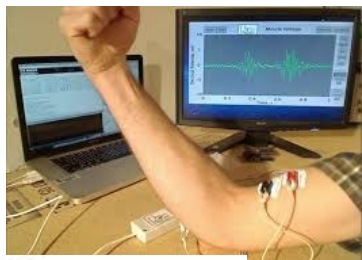
In caso di campionamento...  
→ Intervallo di campionamento ( $\Delta t$ )



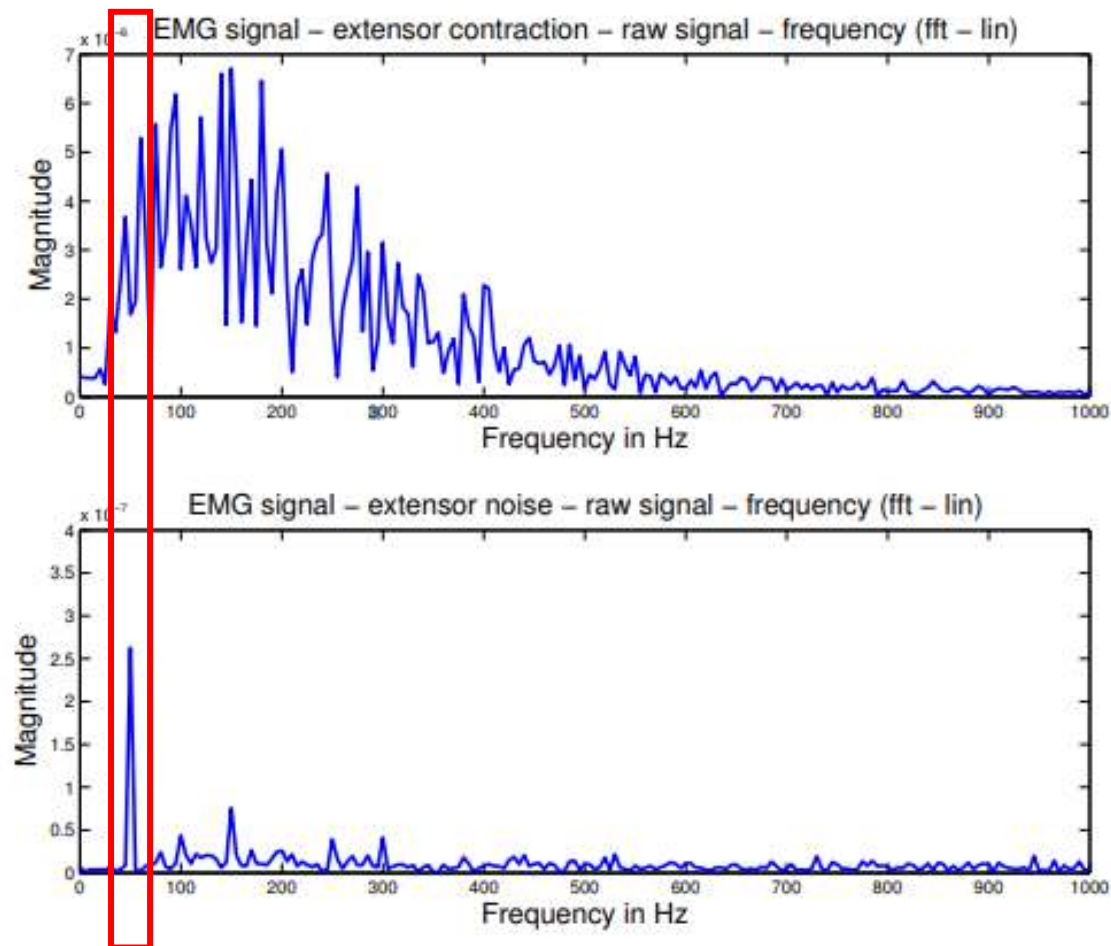
$$\int_{-\infty}^{+\infty} x^2(t) dt = \int_{-\infty}^{+\infty} |X(f)|^2 df$$

# ESEMPIO PRATICO: Utilita' di entrambi i domini nell'analisi del segnale EMG

## Estrazione di features nel tempo



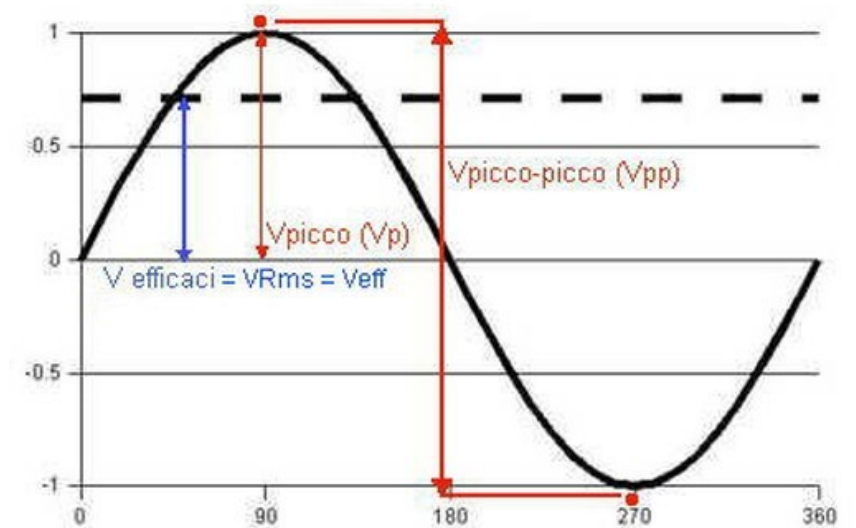
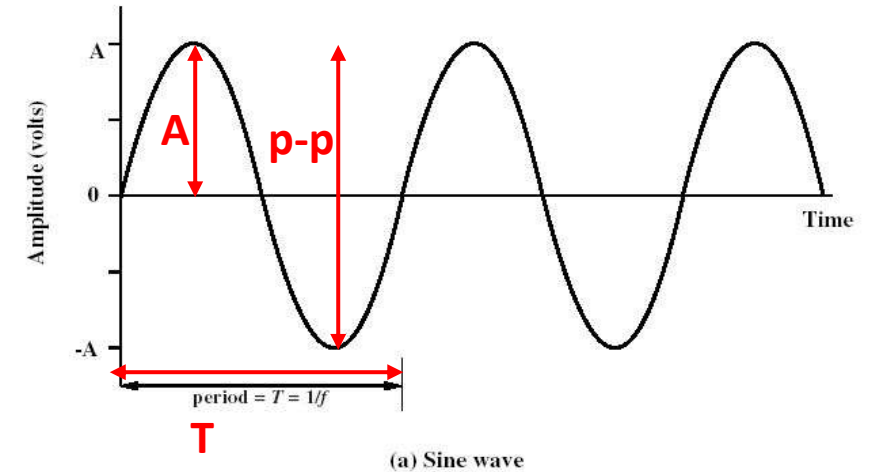
## Analisi del contenuto in frequenza



→ Oltre ad estrarre le features nel tempo, conoscere contenuto in frequenza aiuta a capire come è meglio elaborare il segnale in relazione con i disturbi e le interferenze, per evitare perdita del segnale

# Caratteristiche quantitative segnali

- **Valore picco (A)**: livello massimo del segnale
- **Valore picco-picco (p-p)**: distanza tra picco massimo e picco minimo
- **Fase ( $\phi$ )**: misura della posizione relativa all'origine del segnale in un dato istante
- **Periodo o lunghezza d'onda (T)**: intervallo temporale della periodicità, distanza tra due punti uguali della forma d'onda
- **Frequenza (f)**: inverso del periodo
- **Pulsazione ( $\omega=2\pi f$ )**  
$$f = \frac{1}{T} \text{ in Hertz : } 1\text{Hz} = \frac{1}{\text{sec}}$$
- **Valore efficace o ampiezza quadratica media ( $V_{rms}$  o  $V_{eff}$ )** di un segnale periodico è il valore che avrebbe un segnale costante con uguale potenza media.





# Spoiler... ESE 1 MATLAB

## OBIETTIVO: Simulare una sinusoide con Ampiezza, Frequenza e Fase assegnate

```
% DEFINIZIONE DEI PARAMETRI E DI Tw
V0=2; %Volt, valore di picco
Phi0=0; %s, valore della fase
f0=5; %Hz, valore della frequenza della sinusoide
Tw=6; %s, larghezza della finestra di osservazione
```

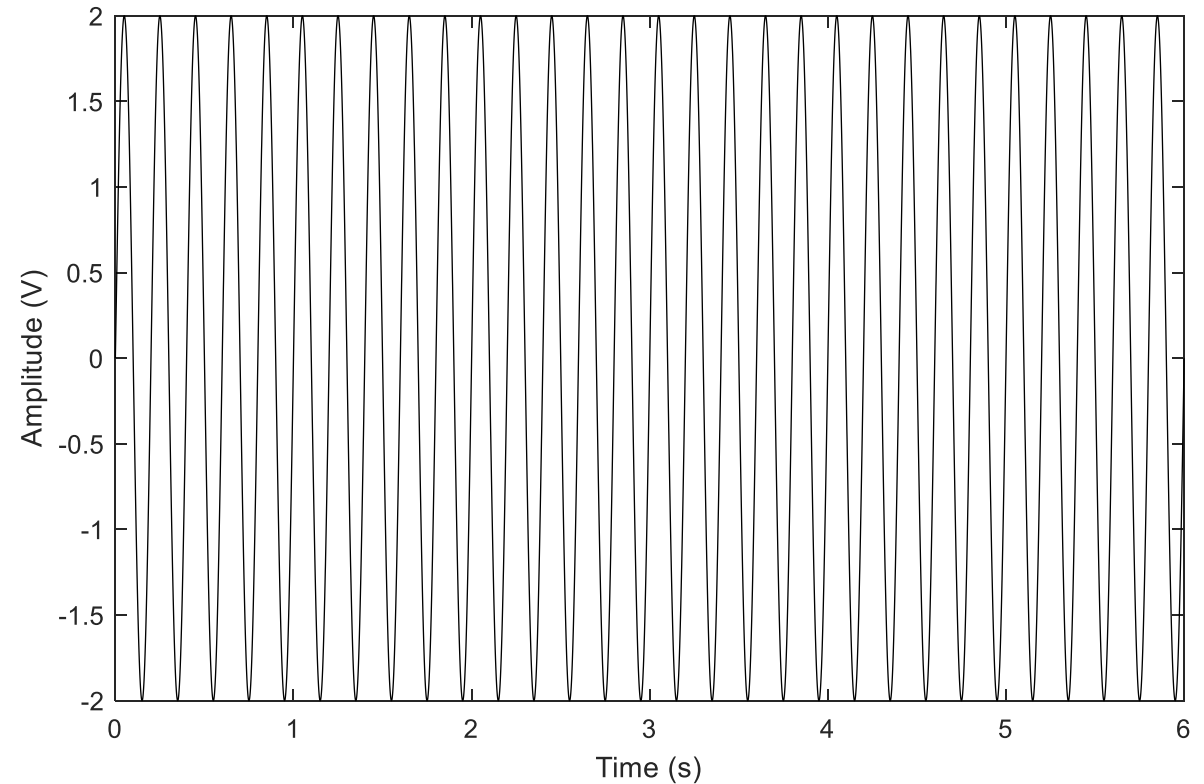
```
% CREAZIONE ASSE DEI TEMPI CONTINUO (PER ORA
IGNORIAMO FREQUENZA DI CAMPIONAMENTO)
t=linspace(0,Tw,10000);
% Notare che questo comando realizza un vettore con
punti equispaziati di  $Tw/N-1=0.2/9999=0.00002$  s,
corrispondente quindi a un campionamento di circa
50000 Hz, ben 1000 volte la frequenza del segnale:
tale numero è più che sufficiente per simulare
un'acquisizione continua
```

```
% CREAZIONE DEL SEGNALE CONTINUO
```

```
V=V0*sin(2*pi*f0*t+Phi0);
```

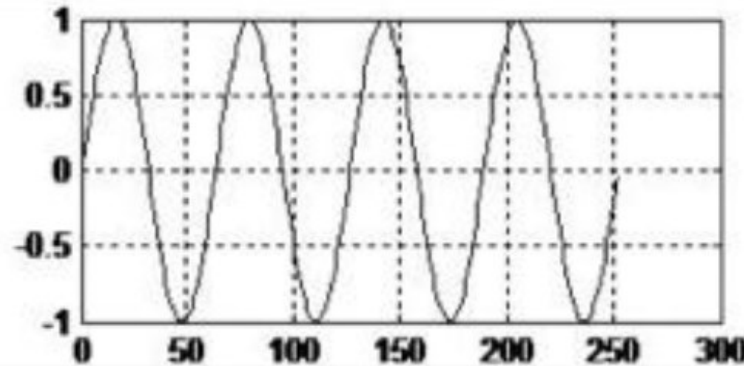
```
figure
plot(t,V,'k');
xlabel('Time (s)');
ylabel('Amplitude (V)');
```

**Pulsazione ( $\omega=2\pi f$ )**



# Valore efficace o RMS

Valore efficace o ampiezza quadratica media ( $V_{rms}$  o  $V_{eff}$ ) di un segnale periodico è il valore che avrebbe un segnale costante con uguale potenza media.

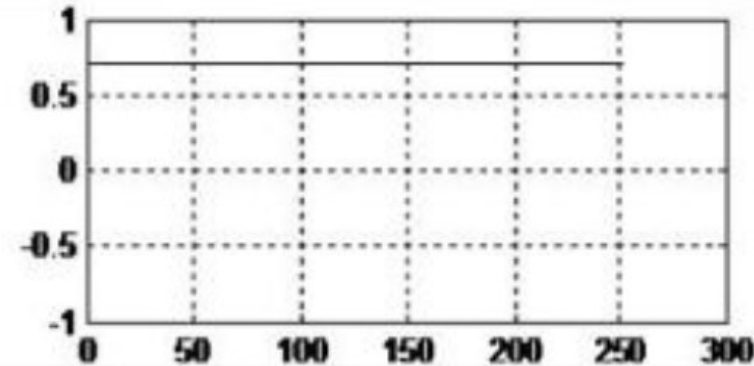


POTENZA MEDIA

$$P = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} |x(t)|^2 dt$$

Considerando  
una corrente/tensione alternata:

$$P = A_{picco}^2 / 2$$



Considerando  
una corrente/tensione continua:

$$P = A_{cont}^2$$

I due segnali alternato e continuo darebbero la stessa potenza media se la seguente relazione viene rispettata:

$$A_{cont} = A_{picco} / \sqrt{2}$$

$A_{picco} / \sqrt{2}$  si definirà quindi **valore efficace dell'alternata**: per tale valore le due correnti o tensioni saranno equivalenti dal punto di vista energetico

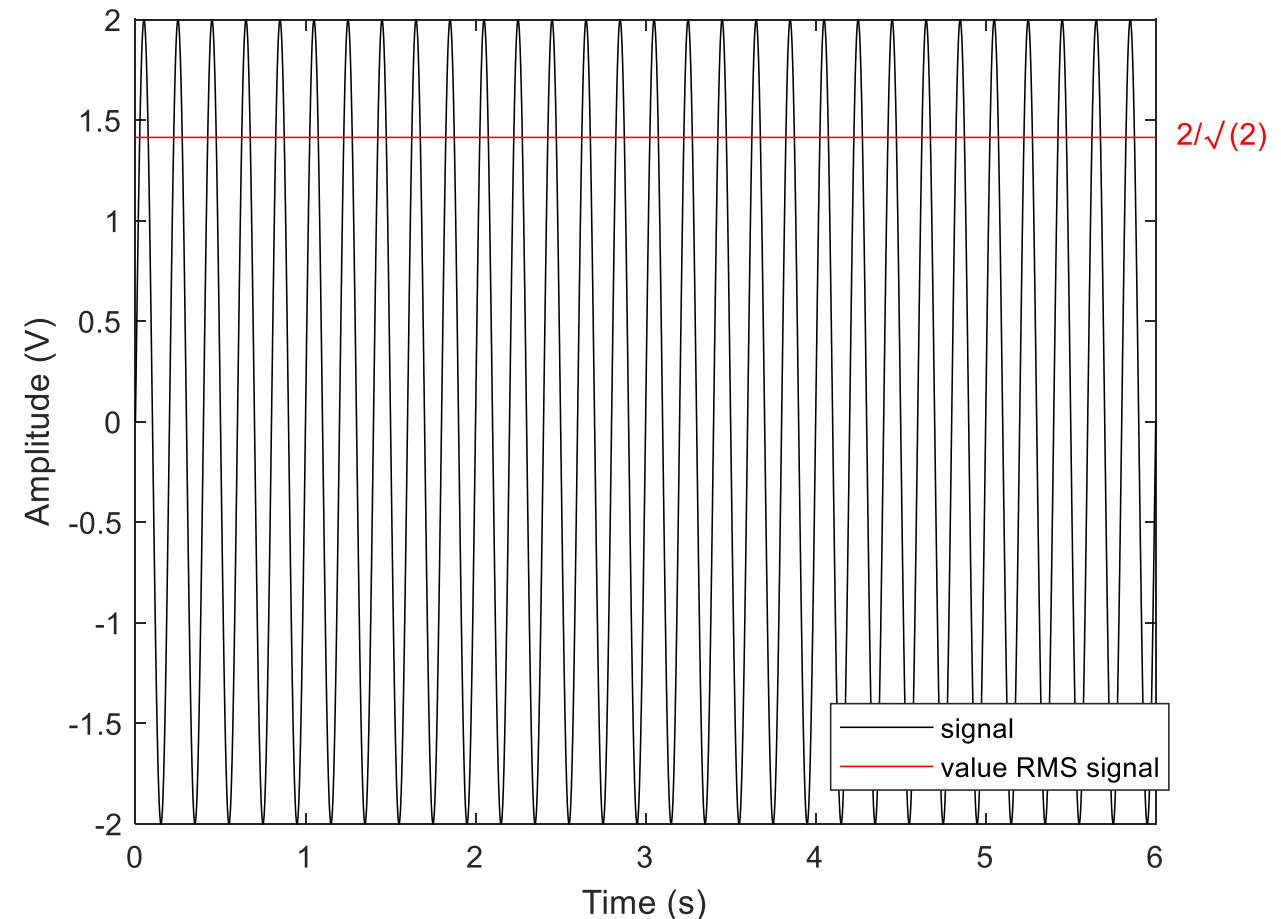
## OBIETTIVO: Calcolo del Valore efficace di una sinusoide simulata in Matlab

$$\begin{array}{cc} \textit{Continuo} & \textit{Discreto} \\ V_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T_0} \int_{t_0}^{t_0+T_0} v^2(t) dt} & \Rightarrow V_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} v^2(nT_s)} \end{array}$$

% VALORE EFFICACE CALCOLATO SUI  
CAMPIONI DEL SEGNALE CAMPIONATO,  
ATTRAVERSO LA FORMULA VISTA DA TEORIA

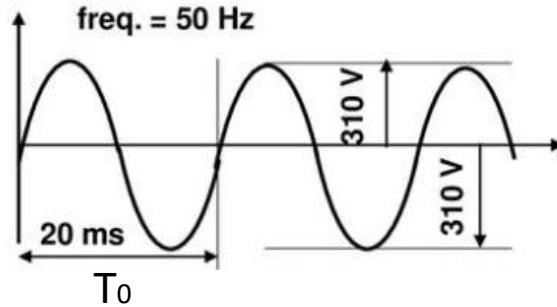
```
V_RMS_cont=
sqrt(1/10000*(sum(V.*V)));
hold on

plot(t,V_RMS_cont*ones(1,length(t)),'
r');
text(5,1,'2/2/\surd(2)');
legend('signal','value RMS signal');
```



# Valore RMS in segnali deterministici vs non deterministici

## DETERMINISTICI (es. ECG, PPG, MUAPT...)

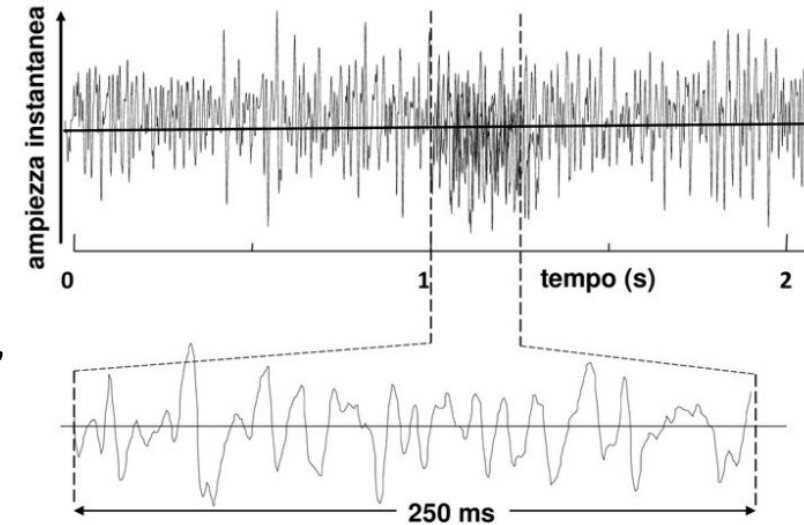


- Sono anche definiti **predicibili**, caratterizzati da una forma d'onda ben definita con un proprio periodo
- **Non ha senso caratterizzarli con parametri probabilistici** (deviazione standard o varianza) poichè è ben noto come il segnale evolverà nel tempo e quindi **non serve ricorrere a stime di quanto i campioni siano dispersi attorno alla media**.
- La formula per il calcolo del **loro valore efficace** (il più generico possibile) è:

$$V_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T_0} \int_{t_0}^{t_0+T_0} v^2(t) dt}$$

## STOCASTICI (es. EEG, EMG)

→ Non sono predicibili, quindi l'unico modo che abbiamo per caratterizzarli è con **parametri probabilistici (media, deviazione standard, varianza)** poichè a priori non si conosce

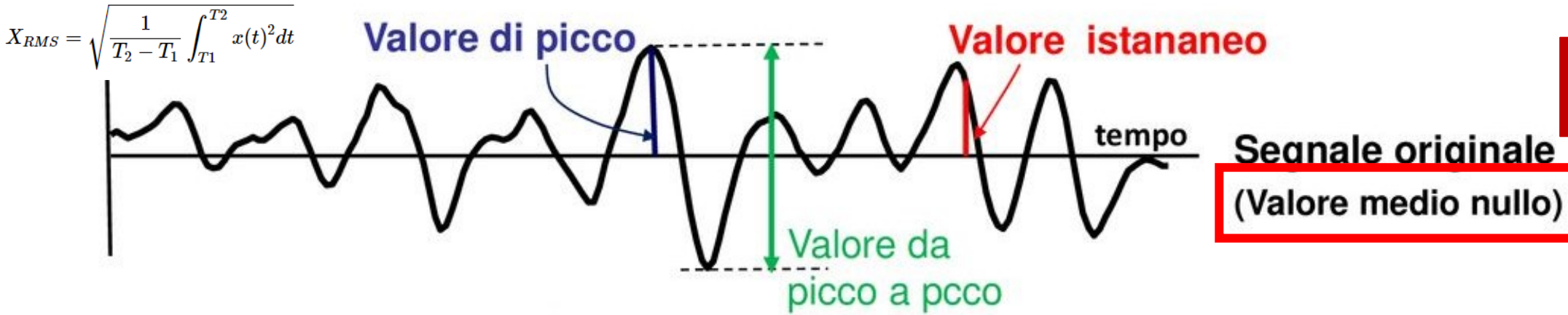


- l'evoluzione nel tempo e quindi si può solo descrivere in un intervallo di osservazione specifico attorno a che valore medio i campioni varino e quanto siano dispersi attorno alla media.
- La formula per il calcolo del loro valore efficace deve tenere conto del fatto che **perde significato il concetto di periodo di ripetizione ma avremo piuttosto un intervallo di osservazione compreso tra  $T_1$  e  $T_2$** .

$$X_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T_2 - T_1} \int_{T_1}^{T_2} x(t)^2 dt}$$

# Caratteristiche utili in segnali non deterministici

$$X_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T_2 - T_1} \int_{T_1}^{T_2} x(t)^2 dt}$$



**...in segnali non deterministici**

**Deviazione standard**  
Assume il significato di **valore efficace o root mean square**

$$\sigma = \sqrt{\sigma^2} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{k=0}^{N-1} (x[k] - \cancel{\mu})^2} = X_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} (x[1]^2 + x[2]^2 + \dots + x[N]^2)}$$

$$\sigma_x^2(t) = P_x(t) - \cancel{\mu^2(t)}$$

**Mean Square Value (RMS<sup>2</sup>)**  
**Valore quadratico medio o Varianza del segnale.**

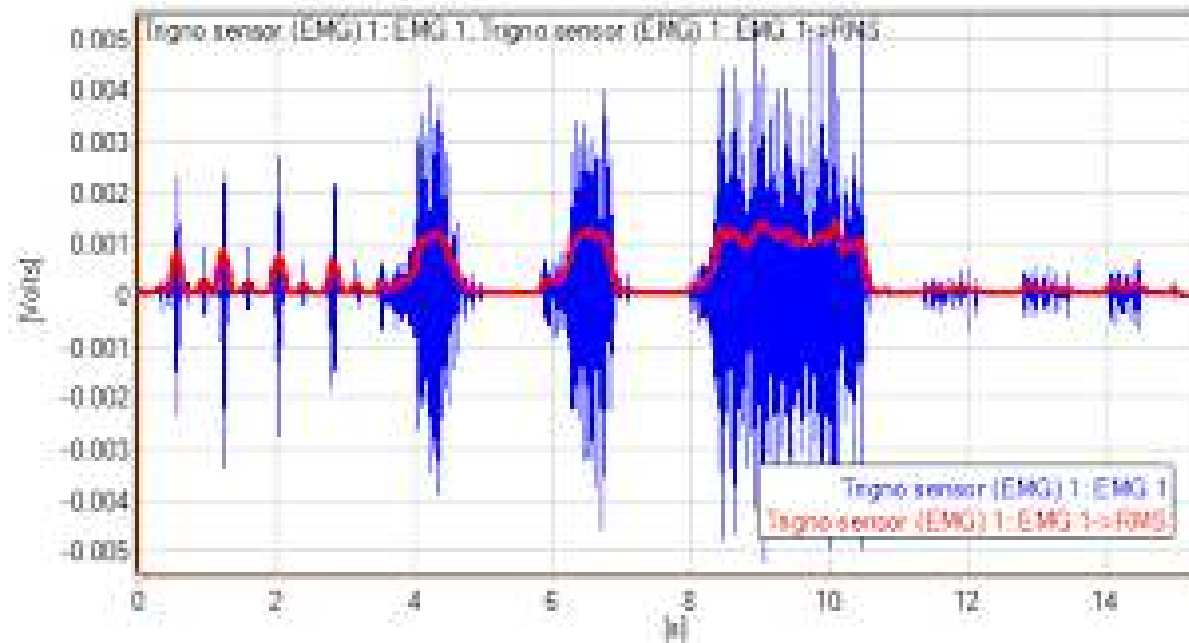
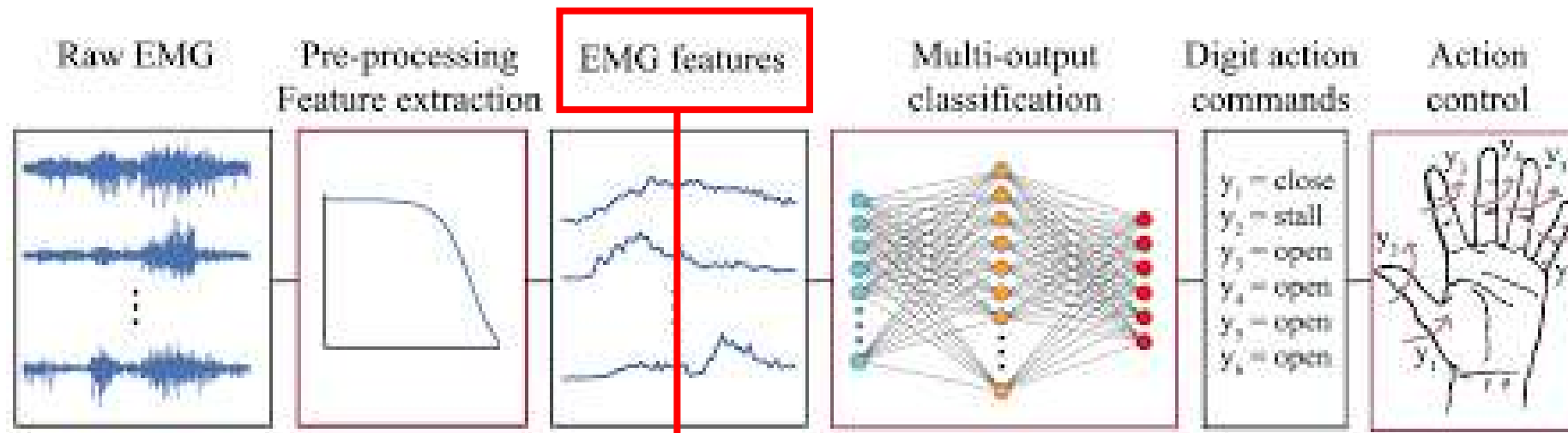


**Varianza**  
Assume il significato di **potenza** e quindi di **quadrato del valore efficace**

**RMS = deviazione standard della distribuzione statistica di ampiezza.**



# ESEMPIO PRATICO: Utilità RMS per segnale biomedico stocastico (EMG)



**Il Valore Efficace del segnale EMG grezzo è una delle features più utilizzata per svariate applicazioni**

# Un particolare di segnale stocastico: il rumore

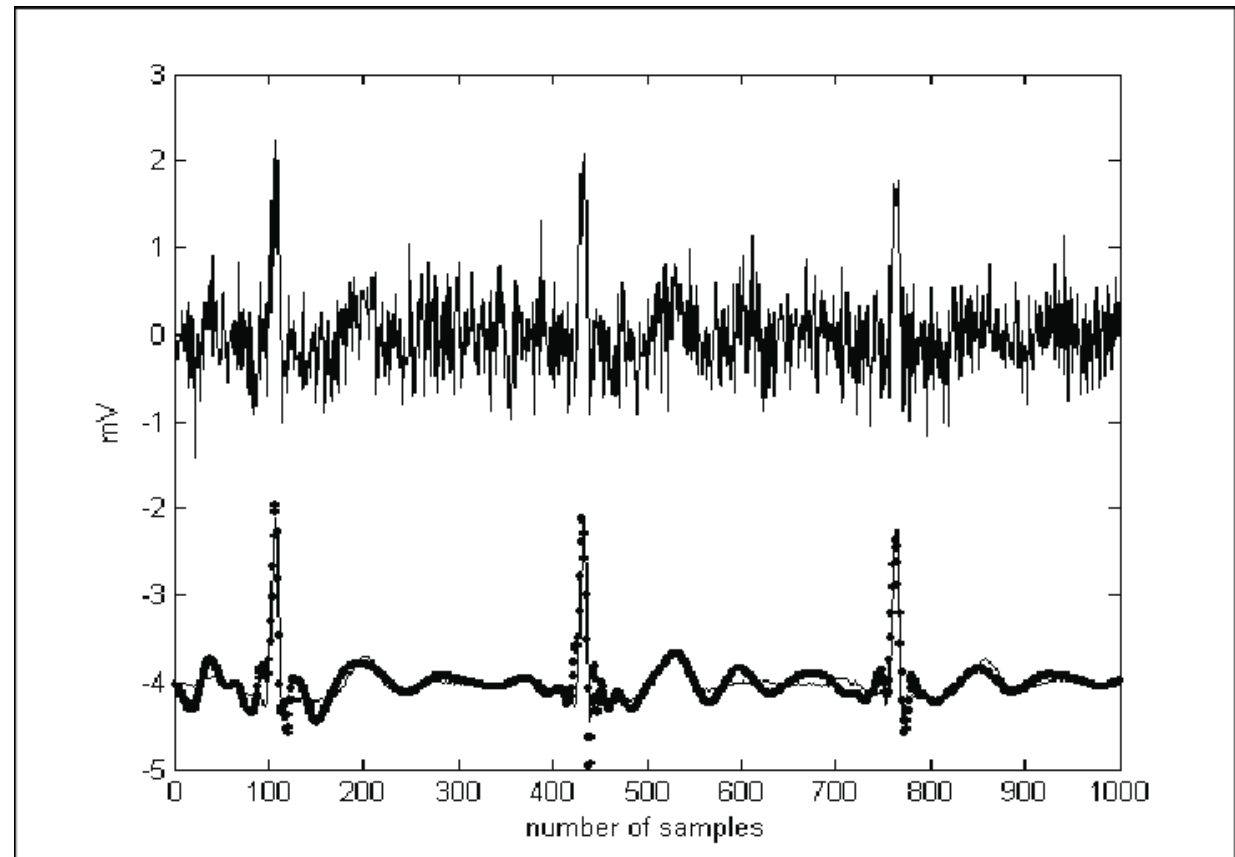


- insieme di segnali, in tensione o corrente elettrica, imprevisti e indesiderati che si sovrappongono al **segnale utile**, trasmesso o da elaborare, tipicamente presente sul canale di comunicazione e sui dispositivi di ricezione/elaborazione.
- provoca **perdita d'informazione** o **alterazione del messaggio** trasmesso

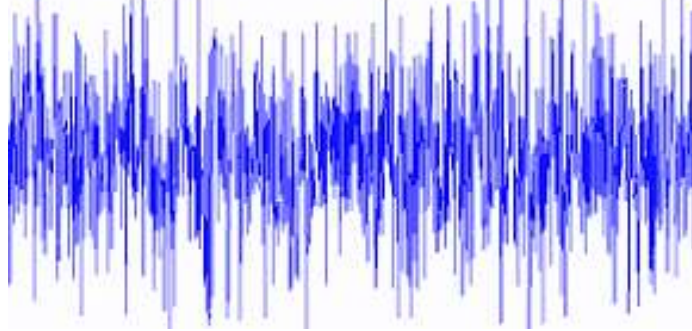
Esempio:

Electrocardiogram recording

*Fondamentali strategie di filtraggio e algoritmi di de-noising per estrarre informazioni desiderate*

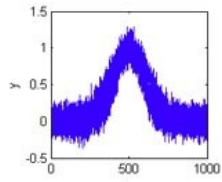


# Un particolare di segnale stocastico: il rumore

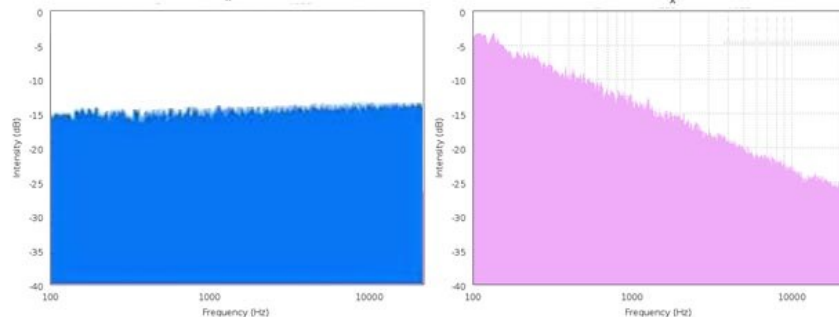
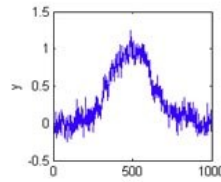


Rumore bianco e Rumore rosa: spettro a confronto

Rumore bianco



Rumore rosa



→ insieme di segnali, in tensione o corrente elettrica, imprevisti e indesiderati che si sovrappongono al **segnale utile**, trasmesso o da elaborare, tipicamente presente sul canale di comunicazione e sui dispositivi di ricezione/elaborazione.

→ provoca **perdita d'informazione** o **alterazione del messaggio** trasmesso

→ **varie classificazioni** possibili in base al contenuto in frequenza, alla fonte che lo genera, alle distribuzioni statistiche

**RUMORE BIANCO** → uguale contributo alle diverse frequenze,

**RUMORE COLORATO** → che presenta specifiche caratteristiche in frequenza, con un contributo più significativo ad alcune frequenze

**RUMORE TEMPO VARIANTE** → che presenta caratteristiche influenzate dalla variabile tempo

→ Spesso utilizzato grazie alle sue caratteristiche non deterministiche per eccitare in modo casuale sistemi o filtri e valutarne la risposta

# Il concetto di rapporto segnale-rumore (Signal-to-Noise Ratio SNR)

è un numero puro o adimensionale che esprime quanto il segnale sia più potente del rumore nel sistema considerato.

$$SNR = \frac{P_{segnale}}{P_{rumore}} \quad \text{con} \quad 0 \leq SNR < \infty$$

➤ Spesso espresso in **Decibel (dB)**

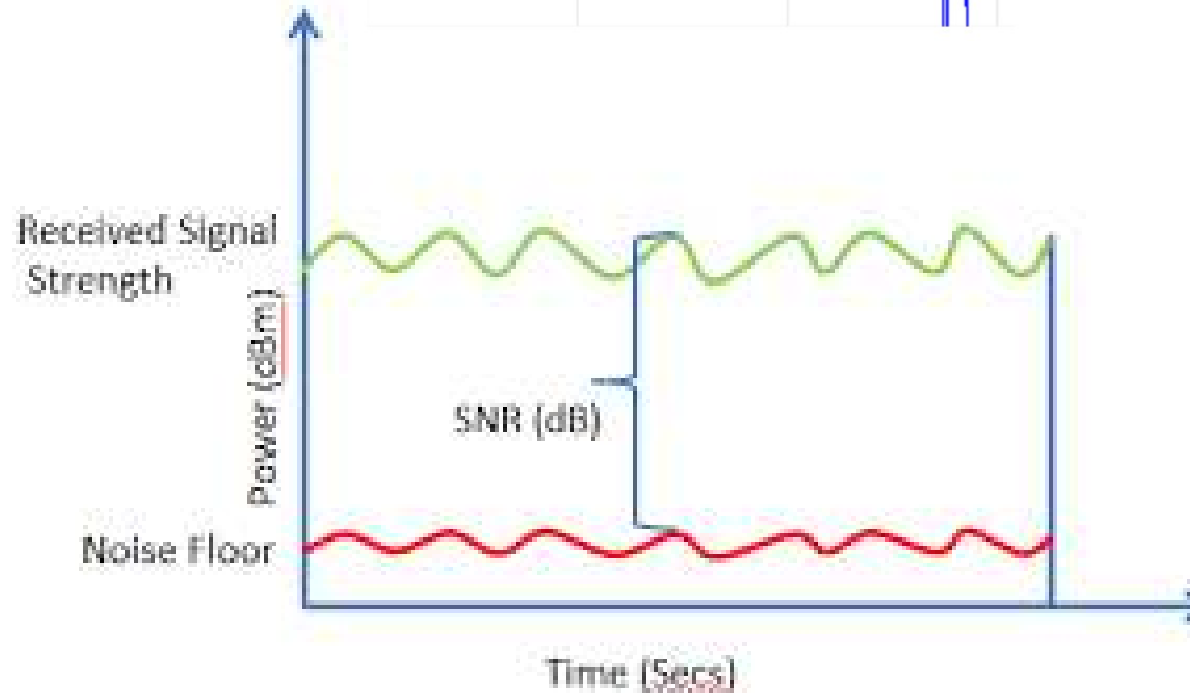
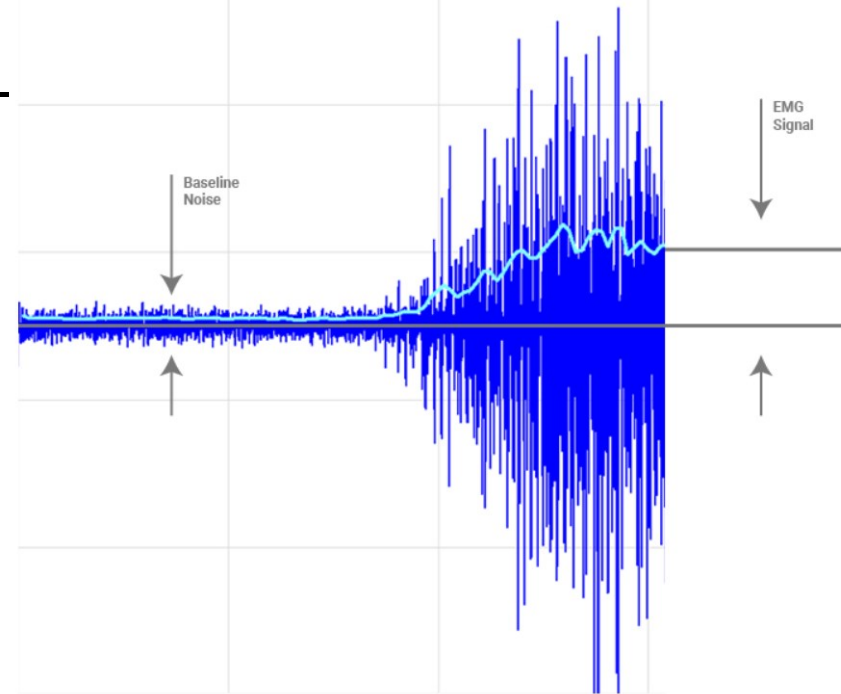
Utilizzando le potenze:

$$SNR \text{ (dB)} = 10 \log_{10} \left( \frac{P_S}{P_N} \right)$$

Utilizzando le tensioni efficaci:

$$SNR \text{ (dB)} = 20 \log_{10} \left( \frac{V_S}{V_N} \right)$$

Equivalenza tra le due è data dalla proprietà:  
 $\log_{10}(x^2) = 2\log_{10}(x)$



10 Log X	X
100	10000000000
90	1000000000
80	100000000
70	10000000
60	1000000
50	100000
40	10000
30	1000
20	100
10	10
0	1
-10	0.1
-20	0.01
-30	0.001
-40	0.0001
-50	0.00001
-60	0.000001
-70	0.0000001
-80	0.00000001
-90	0.000000001
-100	0.0000000001

Rapporto tra dB (LogX) e il valore assoluto dell'elemento misurato

# Classificazione dei segnali

## Rispetto alla forma

Costanti

Variabili

Periodici

Aperiodici

Onda  
Sinusoidale

Onda  
Quadra

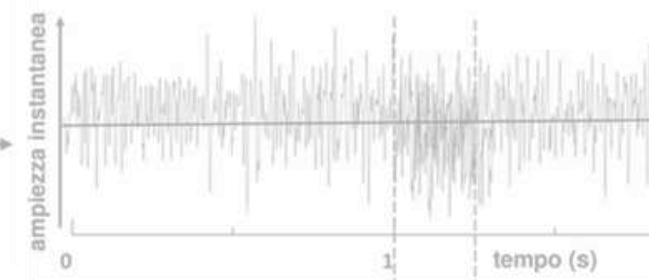
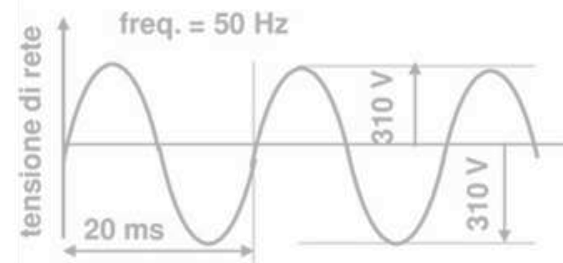
Onda  
Triangolare

Altre  $f(t)$

## Rispetto all'informazione

Deterministici

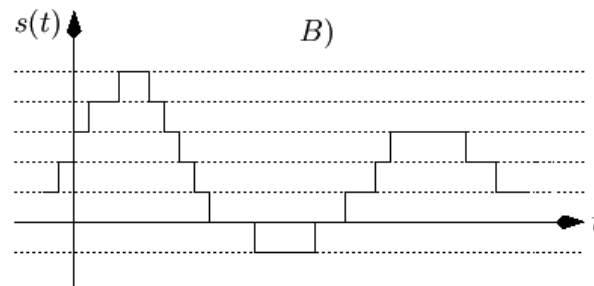
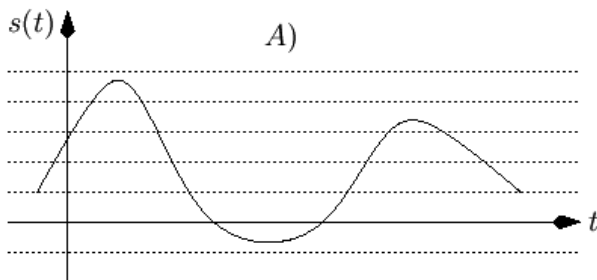
Stocastici/Aleatori



## Rispetto alle ampiezze

Continui

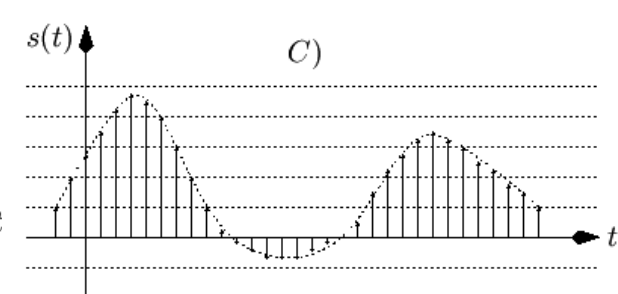
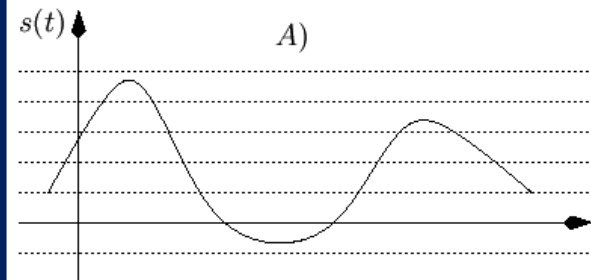
Quantizzati



## Rispetto al tempo

A tempo continuo

A tempo discreto





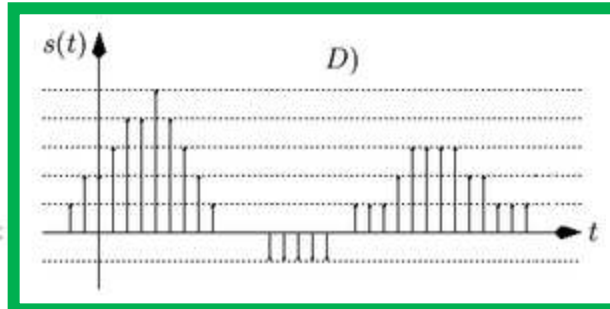
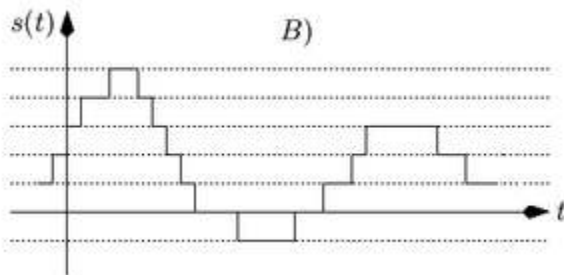
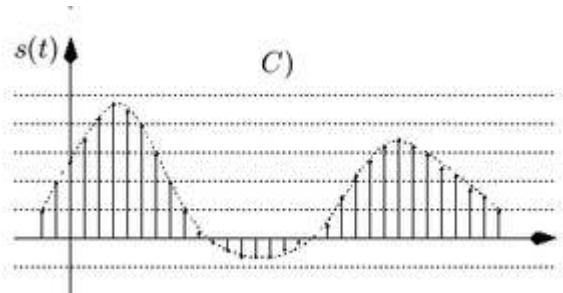
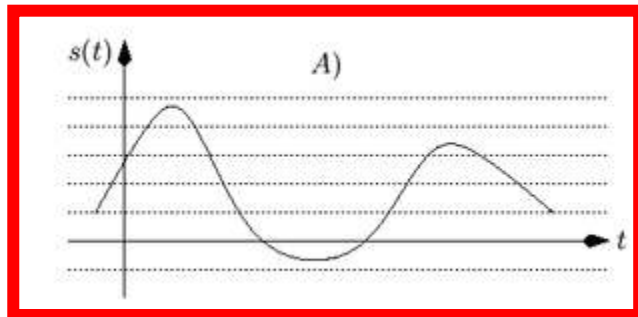
# Segnali analogici e digitali

	Tempo continuo	Tempo discreto
Ampiezze continue	Analogici	Campionati o a tempo discreto
Ampiezze discrete	Quantizzati	Numerici o Digitali

**Segnale analogico**: Funzione del tempo definita su di un insieme continuo di valori.

**Segnale digitale**: Funzione del tempo che può assumere solo un insieme discreto di valori.

Se questo insieme è costituito da due soli valori, il segnale viene definito binario.

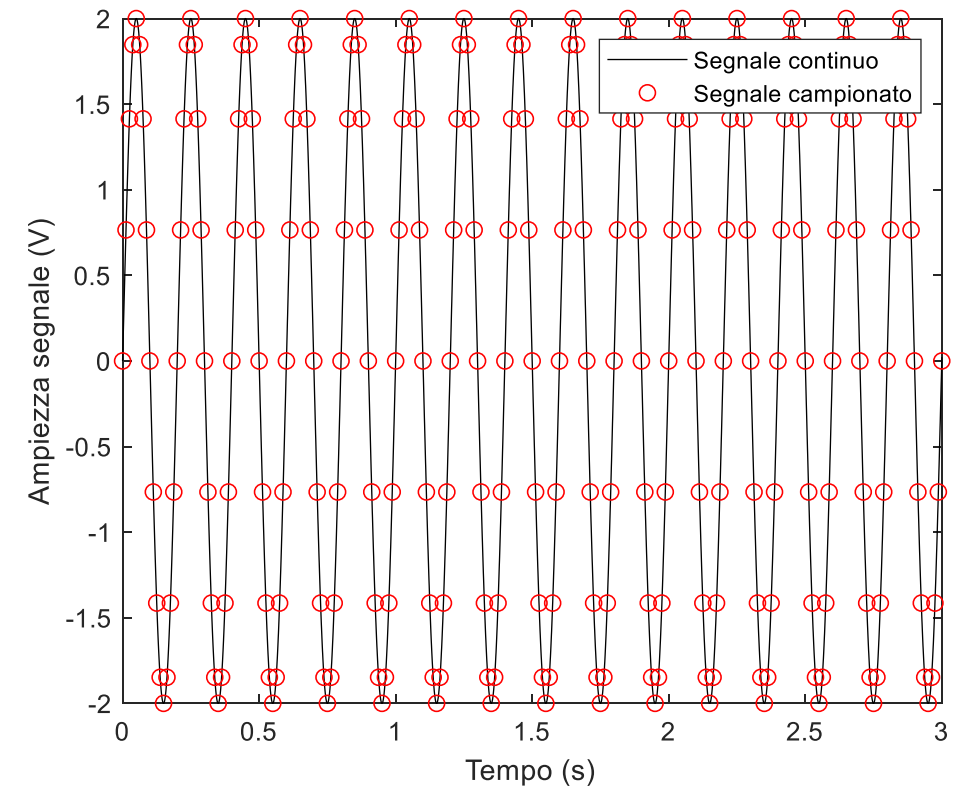


# Spoiler... ESE 1 MATLAB

```
%% CREAZIONE DELL'ASSE DEI TEMPI E SEGNALE CAMPIONATO
fs=80; %Hz
ts=1/fs; %s, intervallo di campionamento
N_sample=round(Tw/ts);
% il comando round arrotonda al numero intero più vicino. In questo
caso restituirà il numero di campioni acquisiti nella finestra di
osservazione
t_sample=[0:N_sample-1]*ts;
% poichè i campioni saranno N_sample, partendo da 0 è necessario
porre come limite superiore N_sample-1, altrimenti la lunghezza del
vettore sarebbe N_sample+1

%% CREAZIONE DEL SEGNALE CAMPIONATO
V_SAMPLE=V0*sin(2*pi*f0*t_sample+Phi0);

%% CONFRONTO TRA SEGNALE CONTINUO E CAMPIONATO
figure
plot(t,V,'k'); % segnale continuo
hold on
plot(t_sample,V_SAMPLE,'ro');
% segnale campionato mostrato come dots rossi interpolati con linee
% spezzate continue
legend('Segnale continuo','Segnale campionato')
xlabel('Tempo (s)')
ylabel('Ampiezza segnale (V)')
hold off
```



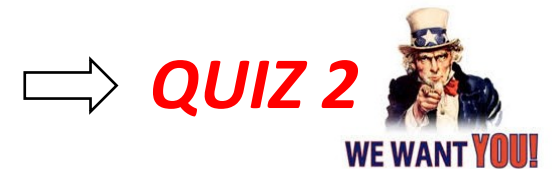
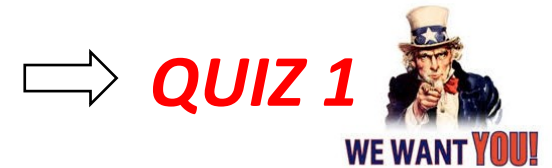
# OUTLINE

- Esempi di sistemi di acquisizione e misura di dati biomedici: differenze e tratti in comune

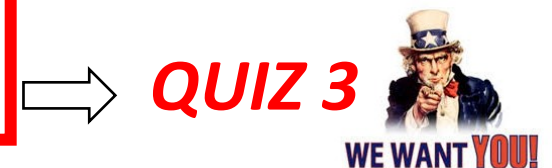
- Classificazione dei segnali

- Caratteristiche in tempo e frequenza di segnali deterministici e stocastici

- Concetto di digitalizzazione dei segnali



- Definizione di misura
- Grandezze metrologiche



# Significato di «misurazione»



«Processo che permette di ottenere, per via sperimentale, uno o più valori ragionevolmente attribuibili ad una grandezza»

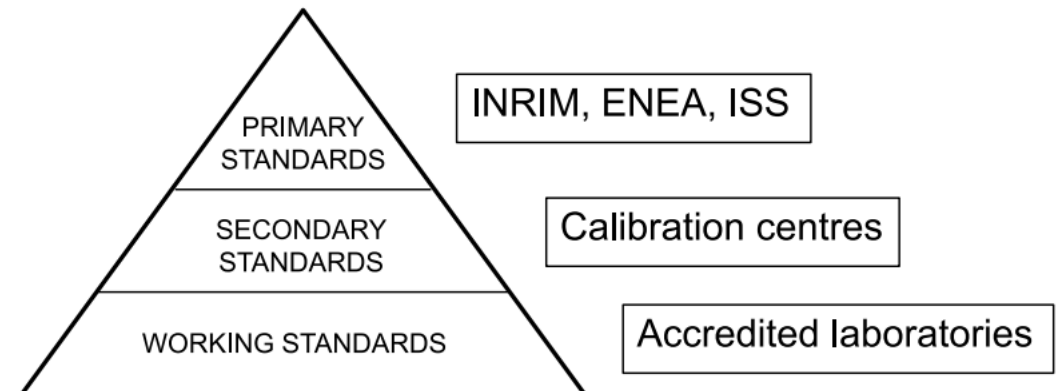
*(Vocabolario Internazionale di Metrologia (VIM). Il documento, redatto in inglese e francese, è reperibile on-line all'indirizzo:*

*[www.bipm.org/en/publications/guides.](http://www.bipm.org/en/publications/guides.))*

**MISURA** = rapporto tra una grandezza incognita ed una ad essa omogenea, assunta come riferimento ed indicata come unità (di misura).

**RIFERIMENTI** = campioni, ossia realizzazioni di una determinata grandezza ottenute attraverso particolari prototipi, fenomeni fisici o materiali di riferimento, il cui valore è predeterminato ed espresso anch'esso in riferimento all'unità.

Grandezza	Unità di misura	Simbolo
lunghezza	metro	<i>m</i>
massa	kilogrammo	<i>kg</i>
tempo	secondo	<i>s</i>
corrente elettrica	ampère	<i>A</i>
temperatura termodinamica	kelvin	<i>K</i>
intensità luminosa	candela	<i>cd</i>
quantità di materia	mole	<i>mol</i>



# Utilità delle misure in ingegneria biomedica

L'ambito biomedico è caratterizzato da un'enorme varietà riguardo al **tipo di grandezze da misurare**, ai **principi fisici utilizzati nella misurazione** ed alle **tipologie di strumentazione**.

## Alcuni segnali biomedici...

Misurando	Ampiezze	Frequenza, Hz	Metodo
Flussi ematici	1 - 300 ml/s	0 – 20	Elettromagnetico, ultrasuoni
Pressione sanguigna	0 - 400 mmHg	0 – 50	strain gage o cuffia
Portata cardiaca	4 - 25 l/min	0 – 20	Fick, diluzione color. o term.
Elettrocardiografia(ECG)	0.5 - 4 mV	0.05 – 150	Elettrodi cutanei
Elettroencefalografia(EEG)	5 - 300 $\mu$ V	0.5 – 150	Elettrodi cutanei
Elettromiografia(EMG)	0.1 - 5 mV	0 – 10000	Elettrodi cutanei o ad ago
Elettroretinografia (ERG)	0 - 900 $\mu$ V	0 – 50	Lente Elettrodo
Elettrooculografia (EOG)	50 - 3500 $\mu$ V	0 – 50	Elettrodi cutanei
pH	3 - 13 pH units	0 – 1	Elettrodo per pH
$p\text{CO}_2$	40 - 100 mmHg	0 – 2	Elettrodo per $p\text{CO}_2$
$p\text{O}_2$	30 - 100 mmHg	0 – 2	Elettrodo per $p\text{O}_2$
Pneumotachography	0 - 600 L/min	0 – 40	Pneumotacometro
Frequenza respiratoria	2 - 50 atti/min	0.1 – 10	Impedenziometria, sens. dilataz. toracica, termistore nasale

## Alcuni dispositivi biomedici...

**Defibrillatori** → tensioni ordine di **kV**,

**Radioterapia** → tensioni fino a **centinaia di kV e MV** e frequenze di qualche centinaia di **kHz**

**Risonanza magnetica nucleare** → frequenze di sollecitazione dell'ordine delle **decine di MHz**, in presenza di campi magnetici di alcuni **Tesla [T]**.

## DUPLICE FUNZIONE DELLE MISURE IN BIOINGEGNERIA:

→ **Diagnostica medica**  
basate su analisi di segnali, analisi di immagini, valutazione di proprietà fisico-chimiche.

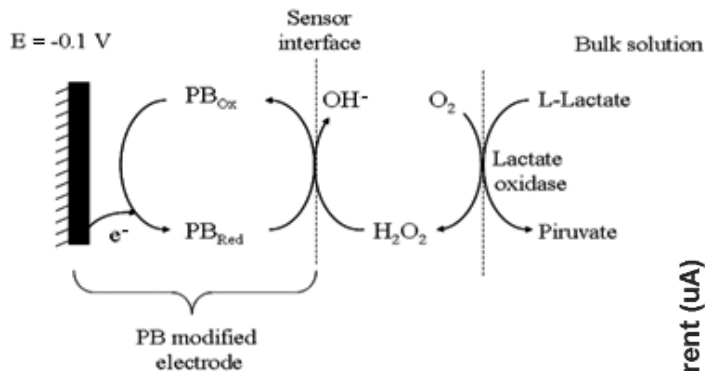
→ **Misure e prove sperimentali** forniscono conoscenze indispensabili ai progettisti per la **realizzazione e la messa a punto dei relativi dispositivi elettronici**.

# Taratura di dispositivi e sensori biomedici

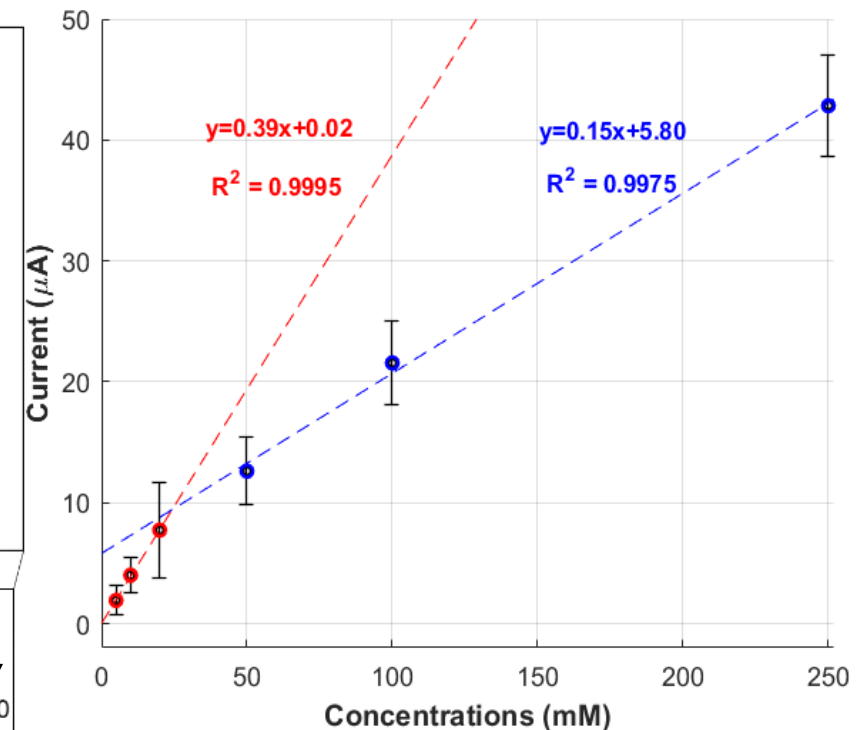
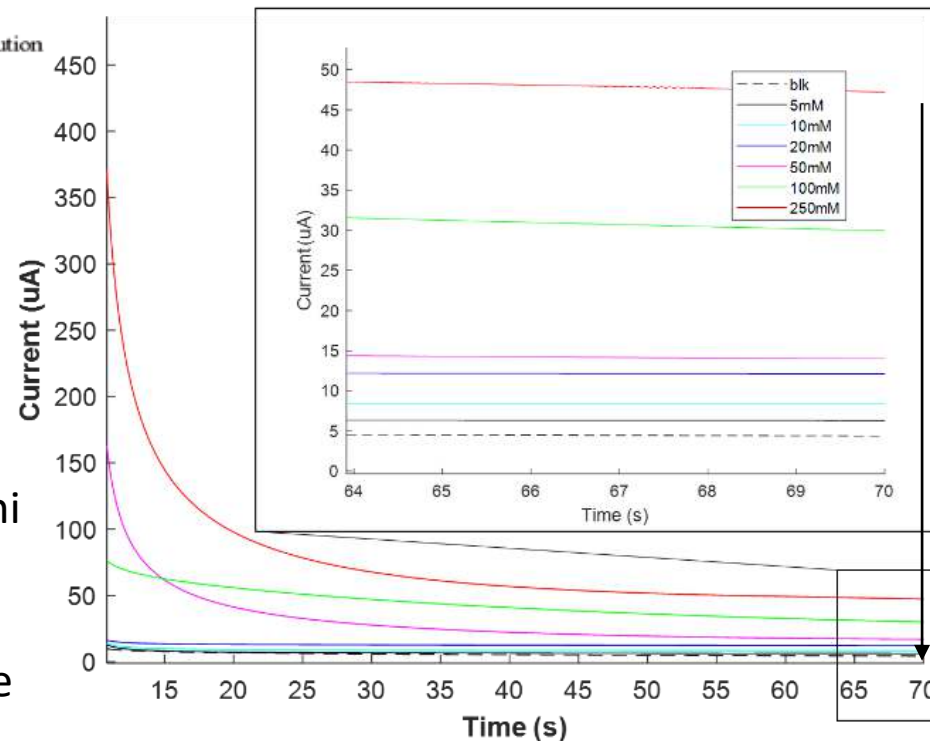
**Taratura (calibration)**: operazione eseguita in condizioni specificate, che in una prima fase stabilisce una relazione tra i **valori di una grandezza**, con le rispettive **incertezze di misura**, forniti da **campioni di misura**, e le corrispondenti **indicazioni**, comprensive delle **incertezze di misura** associate, e in una seconda fase usa queste informazioni per stabilire una relazione che consente di ottenere un **risultato di misura** a partire da un'**indicazione**

Source: <https://www.ceinorme.it/it/normazione-it/vim/vim-content-it?>

## **Esempio: Taratura di sensori elettrochimici stampati homemade di lattato**



Sensore modificato con mediatore e enzima esposto a concentrazioni note (**campioni di misura**) e a ciascuno di questi associato il valore di corrente a regime (**indicazione**) con relativa incertezza (**su 5 misure**)



N.B. Questo esempio prescinde dalla variabilità nella stampa dei sensori che andrebbe ad aggiungersi come fonte di incertezza

Source: pdf articolo su Moodle «MeMeA\_2021\_Patch\_multisensing»



# Taratura di dispositivi e sensori biomedici

**Taratura (calibration)**: operazione eseguita in condizioni specificate, che in una prima fase stabilisce una relazione tra i **valori di una grandezza**, con rispettive **incertezze di misura**, forniti da **campioni di misura**, e le corrispondenti **indicazioni**, comprensive delle **incertezze di misura** associate, e in una seconda fase usa queste informazioni per stabilire una relazione che consente di ottenere un **risultato di misura** a partire da un'**indicazione**

Source: <https://www.ceinorme.it/it/normazione-it/vim/vim-content-it?>

## In generale...

La taratura è un'operazione che si può suddividere in due fasi:

- nella prima fase, si determina la relazione tra le indicazioni date dallo strumento ed i valori di uno più campioni, con la relativa incertezza di misura. Si ottiene in questo modo un insieme di terne: {valore indicato, valore del campione, incertezza}, riferite a condizioni di misura ben specificate;

- nella seconda fase, le informazioni ottenute sono utilizzate per stabilire una relazione che permette di ottenere un risultato di misura dall'indicazione fornita dallo strumento.

$\text{valore misurato} = f(\text{valore indicato})$

Se siamo in un range lineare

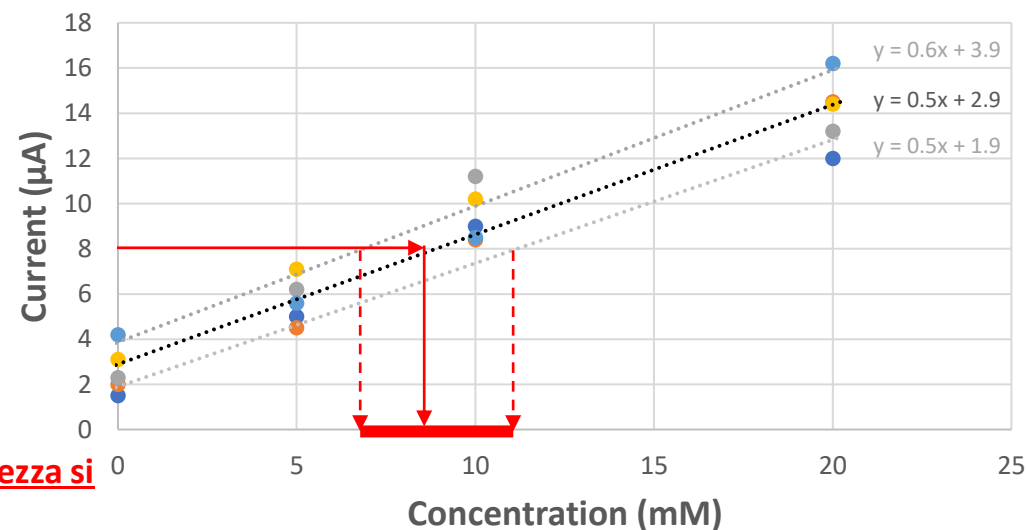
→  $\text{Valore indicato} = m \cdot \text{Valore misurato} + q$

Quindi **Valore misurato (es. conc) = (Valore indicato (es. corr) - q) / m**

**N.B. Solo tenendo conto di questa relazione insieme a quelle sull'incertezza si ottiene una misura completa**

## ...in un esempio pratico

Concentrazioni	misura 1	misura 2	misura 3	misura 4	misura 5	Valor Medio	St Dev
conc 1: 0 mM	1.5 $\mu\text{A}$	2 $\mu\text{A}$	2.3 $\mu\text{A}$	3.1 $\mu\text{A}$	4.2 $\mu\text{A}$	2.6	1.1
conc 2: 5 mM	5 $\mu\text{A}$	4.5 $\mu\text{A}$	6.2 $\mu\text{A}$	7.1 $\mu\text{A}$	5.6 $\mu\text{A}$	5.7	1.0
conc 3: 10 mM	9 $\mu\text{A}$	8.4 $\mu\text{A}$	11.2 $\mu\text{A}$	10.2 $\mu\text{A}$	8.5 $\mu\text{A}$	9.5	1.2
conc 4: 20 mM	12 $\mu\text{A}$	14.5 $\mu\text{A}$	13.2 $\mu\text{A}$	14.4 $\mu\text{A}$	16.2 $\mu\text{A}$	14.1	1.6



# Regolazione di dispositivi e sensori biomedicali

**Regolazione di un sistema di misura (adjustment)**: insieme di operazioni svolte su un sistema di misura, affinché esso fornisca **indicazioni** prescritte in corrispondenza di determinati **valori** di **grandezze** da sottoporre a **misurazione**

## Esempio 1: Regolazione bilancia di precisione



### Fase 1: Taratura svolta dal produttore:

Individuata la relazione che permette di tenere conto delle trasformazioni subite dal misurando in modo da far corrispondere un'indicazione del suo peso

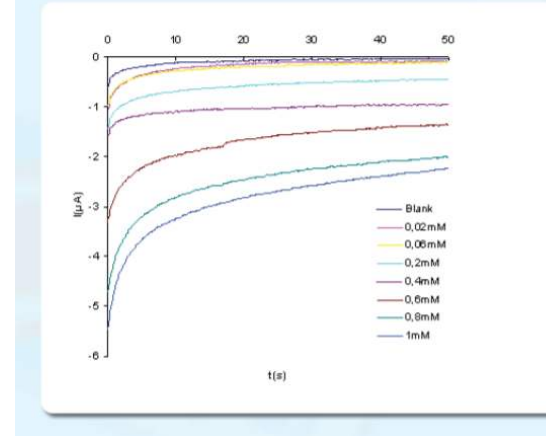
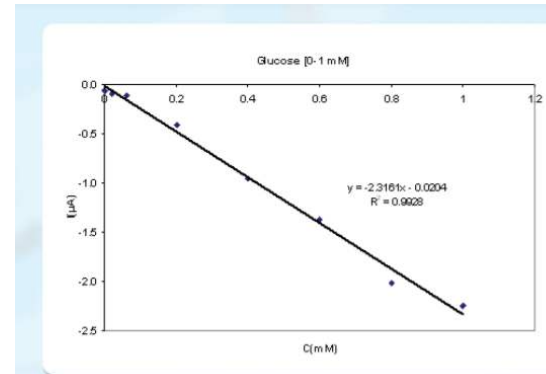


### Fase 2: Regolazione offset svolta dall'utilizzatore:

Regolata la relazione in modo da fornire un adeguato valore di offset in base alle condizioni di partenza della misurazione

## Esempio 2: Regolazione sensori elettrochimici commerciali per glucosio

### Fase 1: Taratura svolta dal produttore

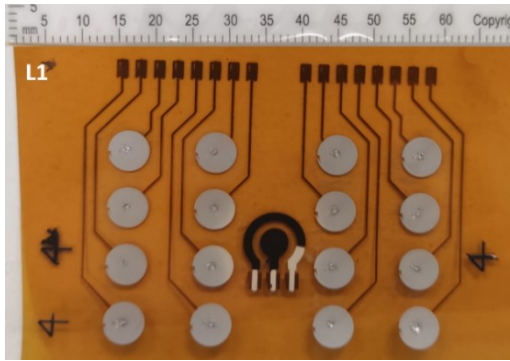


### Fase 2: Regolazione guadagno/offset svolta dall'utilizzatore:

Ripetuta valutazione con concentrazioni note in modo da regolare la curva di taratura in base alle nuove condizioni di laboratorio

[https://www.dropsens.com/en/pdfs\\_products/new\\_brochures/glu10.pdf](https://www.dropsens.com/en/pdfs_products/new_brochures/glu10.pdf)

# Valutazione della «qualità» di una misura



## Misure di resistenza elettrodi EMG

Lotto 1



$R1 = 2.5 \Omega$



Lotto 2


















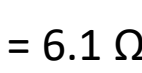




$R2 = 6.3 \Omega$

Sarei portato a credere che il lotto uno produca elettrodi più conduttivi rispetto al lotto 2... Ma posso concluderlo dopo solo una misura? Ho sufficienti informazioni sulla «qualità» della stessa?



# Valutazione della «qualità» di una misura

## Misure di resistenza elettrodi EMG

<u>Lotto 1</u>	R1 ( $\Omega$ )	R2 ( $\Omega$ )	<u>Lotto 2</u>
	2.5	6.3	
	5.4	6.1	
	6.2	5.2	
	7.3	5.9	
	5.0	5.7	
	5.4	6.2	
	10.8	6.4	
	5.0	6.5	
	5.9	6.8	
	7.5	5.7	

Valor medio resistenza lotto1

$$R1 = 6.1 \Omega$$

Valor medio resistenza lotto2





















$$R2 = 6.1 \Omega$$

Sarei portato a credere  
che i due lotti producano  
sensori del tutto  
equivalenti. Ho sufficienti  
informazioni sulla  
«qualità» della stessa?



# Valutazione della «qualità» di una misura

## Misure di resistenza elettrodi EMG

<u>Lotto 1</u>	R1 ( $\Omega$ )	R2 ( $\Omega$ )	<u>Lotto 2</u>
	2.5	6.3	
	5.4	6.1	
	6.2	5.2	
	7.3	5.9	
	5.0	5.7	
	5.4	6.2	
	10.8	6.4	
	5.0	6.5	
	5.9	6.8	
	7.5	5.7	

Valor medio resistenza lotto1  
± deviazione standard

$$R1 = 6.1 \pm 2.2 \Omega$$

Valor medio resistenza lotto2  
± deviazione standard

$$R2 = 6.1 \pm 0.5 \Omega$$

A questo punto la misura della resistenza degli elettrodi di entrambi i lotti è espressa in modo più completo e mi permette di concludere che la procedura adottata nel lotto 2 porti a elettrodi la cui misura di resistenza risulta più **accurata** e più **ripetibile** rispetto al lotto 1.





# Valutazione della «qualità» di una misura: accuratezza e incertezza

**ACCURATEZZA DI MISURA:** grado di concordanza tra un **valore misurato** e un **valor vero** di un **misurando**.  
L'**accuratezza di misura** non è una **grandezza** e a essa non si assegna un **valore numerico**. Una **misurazione** è ritenuta tanto più accurata quanto minori sono gli **errori di misura** che la caratterizzano.

**INCERTEZZA DI MISURA:** parametro **non negativo** che caratterizza la dispersione dei **valori** che sono attribuiti a un **misurando**, sulla base delle informazioni utilizzate.

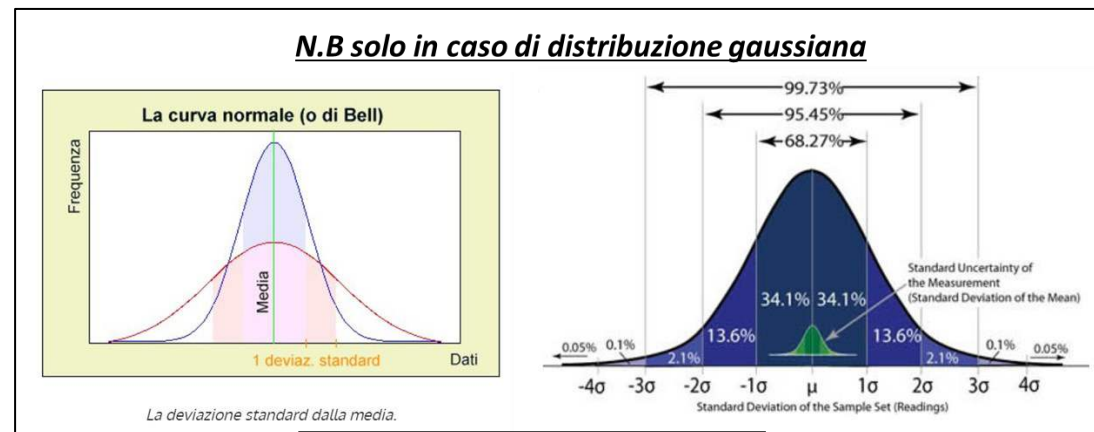
Generalmente, l'**incertezza di misura** comprende numerose componenti, **suddivisibili in due categorie**:

## INCERTEZZA DI TIPO A

Comprende componenti che si ottengono partendo dalle distribuzioni statistiche dei valori provenienti da una serie di misurazioni, e possono essere caratterizzate dai corrispondenti scarti tipo.

Calcolata con  
metodi statistici

$$u = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2}$$



$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2}$$



# Valutazione della «qualità» di una misura: accuratezza e incertezza

**ACCURATEZZA DI MISURA:** grado di concordanza tra un **valore misurato** e un **valor vero** di un **misurando**.  
L'**accuratezza di misura** non è una **grandezza** e a essa non si assegna un **valore numerico**. Una **misurazione** è ritenuta tanto più accurata quanto minori sono gli **errori di misura** che la caratterizzano.

**INCERTEZZA DI MISURA:** parametro **non negativo** che caratterizza la dispersione dei **valori** che sono attribuiti a un **misurando**, sulla base delle informazioni utilizzate.

Generalmente, l'**incertezza di misura** comprende numerose componenti, **suddivisibili in due categorie**:

## INCERTEZZA DI TIPO A

Comprende componenti che si ottengono partendo dalle distribuzioni statistiche dei valori provenienti da una serie di misurazioni, e possono essere caratterizzate dai corrispondenti scarti tipo.

Calcolata con  
metodi statistici

$$u = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2}$$

## INCERTEZZA DI TIPO B

Comprende componenti che possono essere caratterizzate da scarti tipo stimati in base a funzioni di densità di probabilità derivate dall'esperienza o da altre informazioni.

Calcolata non con  
metodi statistici

$$u = \sqrt{a^2 + b^2 + c^2 + \dots}$$

# Valutazione della «qualità» di una misura: La differenza tra «ripetibilità» e «riproducibilità»

## RIPETIBILITA':

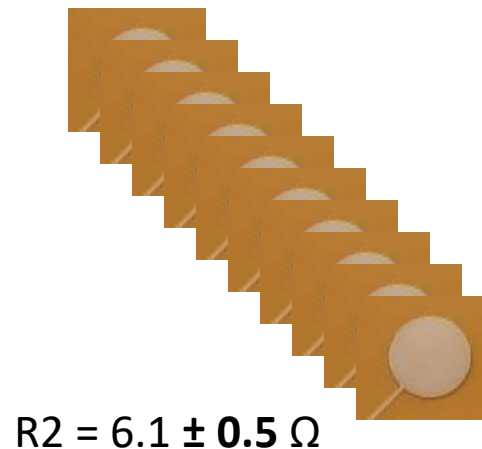
**precisione di misura** ottenuta in condizioni che assicurino: medesima **procedura di misura**, stessi operatori, stesso **sistema di misura**, medesime condizioni operative e stesso luogo, nonché l'esecuzione di **misurazioni** ripetute dello stesso oggetto, o di oggetti simili, in un intervallo di tempo breve



## RIPRODUCIBILITA':

**precisione di misura** ottenuta in **condizioni** che assicurino: differenti luoghi, operatori e **sistemi di misura**, e l'esecuzione di **misurazioni** ripetute dello stesso oggetto, o di oggetti simili.

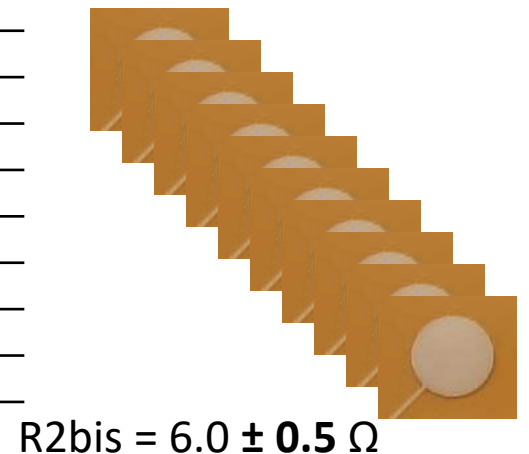
### Lotto 2: misurato @UniPd



### R2 (Ω) R2 bis (Ω)

6.3	6.2
6.1	5.9
5.2	5.4
5.9	5.7
5.7	5.4
6.2	6.3
6.4	6.2
6.5	6.7
6.8	6.9
5.7	5.6

### Lotto 2bis: misurato @UniBs



ELEVATA RIPRODUCIBILITA'



# Take home messages

## ESEMPI DI SISTEMI DI ACQUISIZIONE E MISURA DI DATI BIOMEDICI: DIFFERENZE E TRATTI IN COMUNE

- Nonostante la grande varietà di segnali e sensori biomedici, nei sistemi di acquisizione possono essere individuati elementi comuni: caratterizzazione e la taratura del sensore, il condizionamento, la conversione analogico digitale, la memorizzazione, la trasmissione e la visualizzazione. Tali passaggi possono essere considerati parte del processo di elaborazione e approssimazione ingegneristica dei segnali.

## CLASSIFICAZIONE DEI SEGNALE

- Segnali classificabili in base a: **forma, informazione, ampiezze e tempo**.
- La distinzione più utile per indirizzare l'analisi è tra segnali **deterministici, quasi deterministici e stocastici**.

## CARATTERISTICHE IN TEMPO E FREQUENZA DI SEGNALE DETERMINISTICI E STOCASTICI

- Fondamentale considerare i segnali sia per il loro contenuto nel **dominio del tempo** che delle **frequenze**, per garantire la conservazione delle loro informazioni anche in caso di interferenze.
- **Parametri fondamentali** di un segnale: ampiezza, periodo, frequenza, energia, potenza, valore efficace, spettro in frequenza. Da ricordare che l'utilità di ciascuno di essi varia a seconda della tipologia di segnale.

## CONCETTO DI DIGITALIZZAZIONE DEI SEGNALE

- La possibilità di analizzare e memorizzare i dati è garantita dalla digitalizzazione dei segnali analogici acquisiti dal corpo umano. Tale digitalizzazione è resa possibile da due passaggi: il **campionamento**, che discretizza i tempi, e la **quantizzazione**, che opera sulle ampiezze.

## GRANDEZZE METROLOGICHE: PRECISIONE, ACCURATEZZA E INCERTEZZA DI MISURA

- La «**misurazione**» è un processo che permette di ottenere, per via sperimentale, tramite il confronto con un campione di riferimento uno o più valori ragionevolmente attribuibili ad una grandezza. I suoi elementi imprescindibili sono: **misurando, riferimento, incertezza**
- La **taratura** è un processo a due fasi che permette di associare un risultato di misura a un'indicazione dello strumento. La **regolazione** fa sì che il sistema di misura fornisca **indicazioni** prescritte in corrispondenza di determinati **valori di grandezze** da sottoporre a **misurazione**
- Le caratteristiche che definiscono la qualità di una misura sono l'**accuratezza**, l'**incertezza**, la **precisione**, la **ripetibilità** e la **riproducibilità**.