

CAPITOLO 1 MISURA E MISURAZIONE

Misurare significa valutare quantitativamente una grandezza fisica, il **misurando**, mediante il confronto con una grandezza fisica ad essa omogenea, il **campione**, presa a riferimento.

Un campione deve essere:

- assoluto: il suo valore non deve dipendere dal luogo in cui è conservato;
- stabile: il suo valore non deve variare nel tempo;
- riproducibile e disseminabile: deve essere possibile realizzare delle copie fedeli da conservare in luoghi diversi.

Il **misurando** è la grandezza fisica sottoposta a misura, valutata nello stato assunto dal sistema di misura durante la stessa misurazione.

La **misurazione** è il processo che porta alla valutazione oggettiva del misurando.

Il risultato di una misurazione è chiamato **misura**.

La Norma UNI 4546 definisce misura: *Informazione costituita da un numero, una incertezza ed una unità di misura, assegnata a rappresentare una grandezza in un determinato stato del sistema.*

Il "numero" esprime in maniera quantitativa il valore della grandezza fisica e fornisce quante volte il misurando è rapportato al campione, mentre "l'unità di misura" è il termine di riferimento adottato, per convenzione, per confrontare una grandezza con altre ad essa omogenea.

L'**incertezza** è un indice della qualità della misurazione, ovvero rappresenta "il grado di indeterminazione" con il quale il processo di misurazione ha ottenuto il risultato. Essa associa al risultato di una misurazione una indicazione sulla dispersione dei valori che possono ragionevolmente essere attribuiti al misurando.

Una misura si esprime, quindi, nel modo seguente:

<u>grandezza</u>	<u>numero</u>	<u>incertezza</u>	<u>u.d.m.</u>	<u>simbolo</u>
Tensione =	100	± 1	volt	V
Corrente =	1,15	± 0,02	ampere	A
Resistenza =	20,0	± 0,1	ohm	Ω

Ovvero: $(100 \pm 1) V$, $(1,15 \pm 0,02) A$ e $(20,0 \pm 0,1) \Omega$

Unità di misura

Per una chiara presentazione del risultato di una misurazione, è importante che l'unità di misura (u.d.m.) adottata per il misurando sia riconosciuta a livello internazionale. Il sistema di unità di misura convenzionalmente adottato è il Sistema Internazionale (SI) che si basa sulla definizione di 7 u.d.m. fondamentali.

<u>grandezza</u>	<u>u.d.m.</u>	<u>simbolo</u>
massa	kilogrammo	kg
tempo	secondo	s
lunghezza	metro	m
intensità di corrente elettrica	ampere	A
quantità di sostanza	mole	mol
temperatura	kelvin	K
intensità luminosa	candela	cd

Vi sono, inoltre, due particolari u.d.m., dette "supplementari", che risultano essere adimensionali: esse sono il "radiante" (u.d.m. dell'angolo piano - simbolo rad) e lo "steradiano" (u.d.m. dell'angolo solido - simbolo sr).

Dalle u.d.m. di base si possono ricavare, mediante le "leggi di coordinamento", le unità di misura di tutte le altre grandezze, come quelle riportate in tabella:

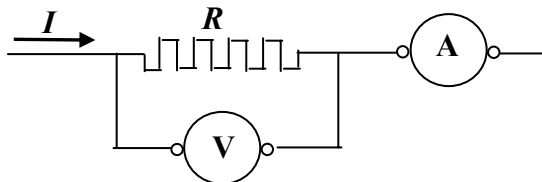
<u>grandezza</u>	<u>u.d.m.</u>	<u>simbolo</u>	<u>legge di coordinamento</u>
Frequenza	hertz	Hz	$1 \text{ Hz} = 1 \text{ s}^{-1}$
forza	newton	N	$1 \text{ N} = 1 \text{ m} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$
Pressione	pascal	Pa	$1 \text{ Pa} = 1 \text{ m}^{-1} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$
energia, lavoro	joule	J	$1 \text{ J} = 1 \text{ m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$
Potenza	watt	W	$1 \text{ W} = 1 \text{ m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-3}$
carica elettrica	coulomb	C	$1 \text{ C} = 1 \text{ s} \cdot \text{A}$
potenziale elettrico	volt	V	$1 \text{ V} = 1 \text{ m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-3} \cdot \text{A}^{-1}$
impedenza, resistenza, reattanza elettrica	ohm	Ω	$1 \Omega = 1 \text{ m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{A}^{-2}$
Ammetenza, conduttanza, suscettanza elettrica	siemens	S	$1 \text{ S} = 1 \text{ m}^{-2} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^3 \cdot \text{A}^2$
capacità elettrica	farad	F	$1 \text{ F} = 1 \text{ m}^{-2} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^4 \cdot \text{A}^2$
flusso di induzione magnetica	weber	Wb	$1 \text{ Wb} = 1 \text{ m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{A}^{-1}$
induzione magnetica	tesla	T	$1 \text{ T} = 1 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{A}^{-1}$
Induttanza e mutua induttanza	henry	H	$1 \text{ H} = 1 \text{ m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{A}^{-2}$
flusso luminoso	lumen	lm	$1 \text{ lm} = 1 \text{ cd} \cdot \text{sr}$

Illuminamento	lux	lx	$1 \text{ lx} = 1 \text{ cd} \cdot \text{sr} \cdot \text{m}^{-2}$
attività (di una sorgente radioattiva)	becquerel	Bq	$1 \text{ Bq} = 1 \text{ s}^{-1}$
dose assorbita (di radiazione)	gray	Gy	$1 \text{ Gy} = 1 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$
equivalente di dose	sievert	Sv	$1 \text{ Sv} = 1 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$

Misurazioni dirette ed indirette

Quando il valore del misurando è ricavato mediante il confronto diretto tra due grandezze omogenee si parla di **misurazione diretta** ed il metodo utilizzato è detto **metodo diretto**. Ad esempio, è diretta una misurazione di lunghezza ottenuta mediante confronto con un metro campione.

Il valore del misurando è, talvolta, ottenuto applicando una relazione nota che lo lega ai valori di altre grandezze. Le misurazioni dirette di queste grandezze forniscono anche il valore cercato. Ad esempio, la misura del valore di una resistenza R si può ricavare misurando con un amperometro la corrente di prova I che fluisce nella resistenza e con un voltmetro la caduta di potenziale V ai suoi capi, usando la nota relazione $R=V/I$.



- figura 1.1 -

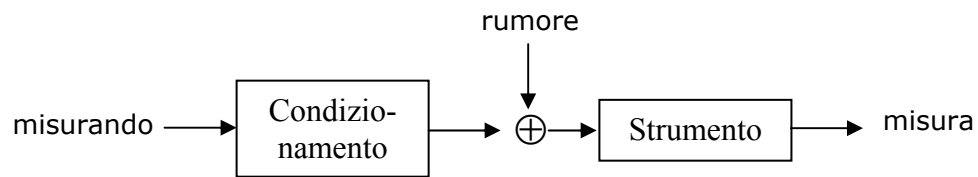
In questo caso si parla di **misurazione indiretta** ed il metodo utilizzato è detto **metodo indiretto**.

Sistemi di misura

Il confronto tra due grandezze viene effettuato mediante un'architettura di apparati, il cui complesso prende il nome di **sistema di misura**. Lo schema di riferimento è riportato in figura 1.2.

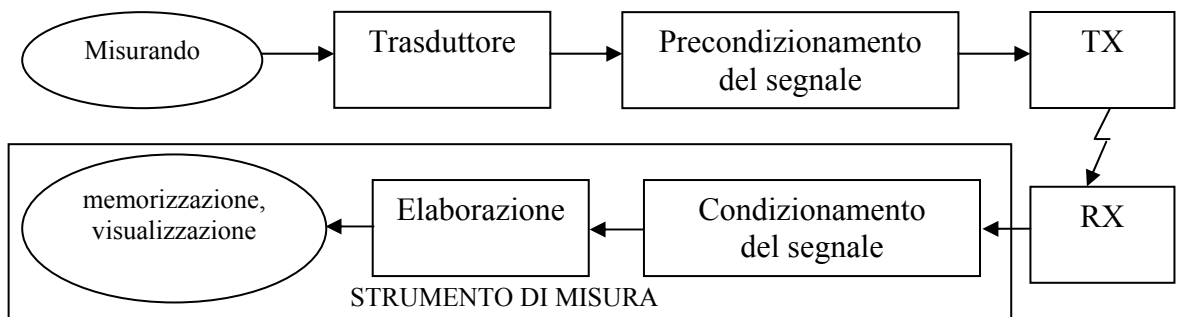
La maggior parte dei sistemi di misura è di tipo elettronico, e cioè sistemi composti in una o più parti di dispositivi elettronici che accettano in ingresso segnali solo di natura elettrica.

I principali vantaggi del loro utilizzo sono dati da una grande affidabilità, costo contenuto, elevata velocità e possibilità di memorizzare il valore misurato.



- figura 1.2 -

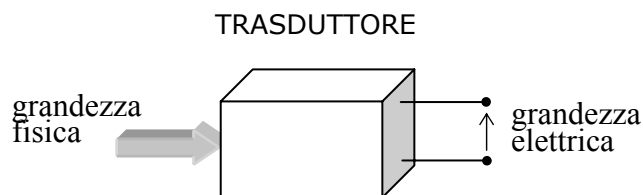
Un tipico modello di **sistema elettronico di misura** è riportato in figura 1.3.



- figura 1.3 -

I blocchi mostrati in figura 1.3 non sono sempre tutti necessari: i blocchi TX ed RX, infatti, che rappresentano rispettivamente i sistemi di trasmissione e ricezione dati, sono usati solo in applicazioni di telemisura; la sezione di memorizzazione assume una certa rilevanza quando occorre analizzare i risultati di misurazioni ripetute.

Non sempre è possibile l'applicazione diretta del misurando al sistema elettronico di misura: nel caso di una grandezza non elettrica è necessario l'uso di **trasduttori**, dispositivi in grado di fornire in uscita un segnale elettrico il cui valore è funzione dell'andamento della grandezza fisica non elettrica presente all'ingresso.



- figura 1.4 -

Il **blocco di condizionamento** trasforma, se necessario, una grandezza elettrica passiva, in una attiva. Nel caso dell'esempio nel seguito riportato, trasforma una resistenza in una tensione.

Sono, ad esempio, grandezze elettriche passive le resistenze, le capacità, le induttanze, e, quindi, le impedenze e le ammettenze. Sono, invece, grandezze elettriche attive le tensioni e le correnti.

Il **blocco di condizionamento** modifica le caratteristiche del segnale in ingresso per renderlo più facilmente trattabile dal blocco di elaborazione, attenuandolo o amplificandolo, oppure condizionandolo in modo opportuno per eliminare effetti indesiderati, come il rumore, le distorsioni, gli accoppiamenti con altri circuiti, ecc.. Ad esempio, per misurare l'ampiezza di un segnale continuo di 100V utilizzando uno strumento con fondo scala di 10V occorre attenuare il segnale almeno 10 volte.

Il **blocco di elaborazione** del segnale condizionato consente di eseguire tutte le operazioni necessarie all'estrazione dell'informazione di misura desiderata, tra le quali linearizzare, traslare e regolare in ampiezza il segnale di misura. Il risultato della misurazione verrà, quindi, visualizzato o memorizzato su di un opportuno supporto in modo da renderlo disponibile successivamente per altre operazioni.

La presentazione del risultato della misura, qualora destinata all'operatore, può avvenire secondo un'indicazione analogica su una scala graduata o mediante una indicazione numerica su un *visualizzatore* o *display* (tipicamente a *led* o a cristalli liquidi), oppure su *monitor* per i sistemi basati su *Personal Computer*.

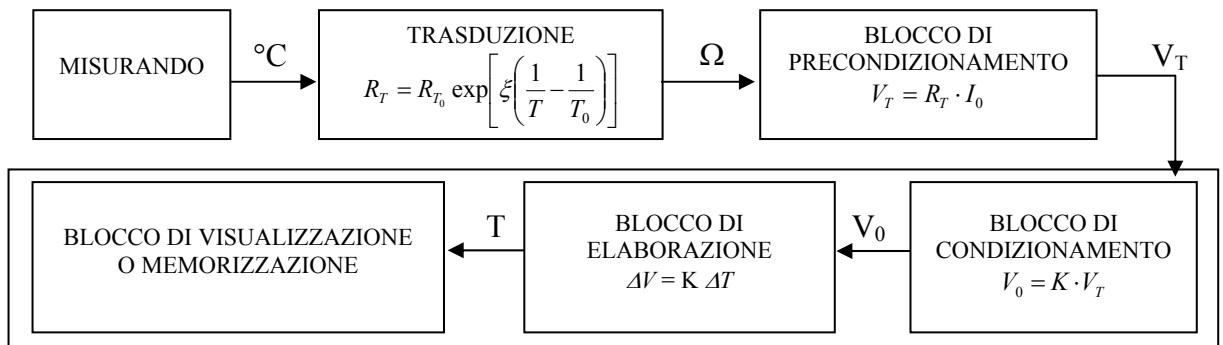
Consideriamo, come esempio di sistema elettronico di misura, il caso ideale di una misura della temperatura di un corpo o di un dato ambiente.

In quest'esempio il misurando è una grandezza non elettrica e, quindi, il sistema elettronico di misura necessita di un "termistore", cioè di un trasduttore che è in grado di esibire una variazione della propria resistenza in funzione della variazione di temperatura secondo la seguente legge:

$$R_T = R_{T_0} \exp \left[\xi \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right] \quad (1.1)$$

Iniettando nella resistenza una corrente costante di intensità nota, sarà possibile prelevare ai suoi capi una caduta di potenziale ad essa proporzionale secondo la nota equazione:

$$V_T = R_T \cdot I_0 \quad (1.2)$$



- figura 1.5 -

In relazione alla figura 1.5, il blocco di preconditionamento trasforma una resistenza in una tensione, mentre il blocco di condizionamento consente di operare sul segnale in ingresso in modo da permettere di eseguire la misurazione nelle condizioni ottimali e, nel caso specifico, sarà un amplificatore o un attenuatore.

La sua uscita sarà:

$$V_0 = K \cdot V_T \quad (1.3)$$

Questa tensione tuttavia non è un "buon" ingresso per lo strumento di misura a causa del legame esponenziale esibito dalla R_T .

Per rendere lineare la variazione di tensione con la temperatura è necessario che il blocco di elaborazione includa, in questo caso, anche un amplificatore logaritmico. In questo modo il legame risulta del tipo:

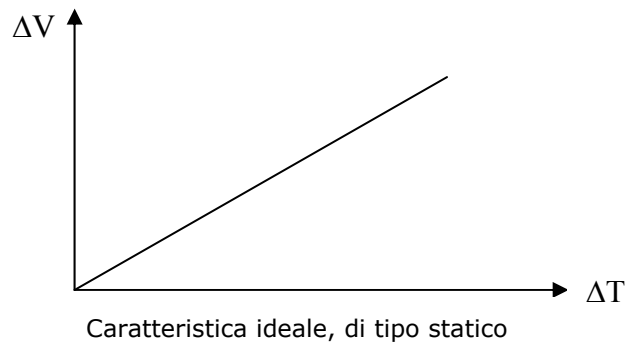
$$\log \frac{V_0}{kR_{T_0} I_0} = -\alpha \cdot \Delta T \quad (1.4)$$

con $\Delta T = T - T_0$. L'amplificatore logaritmico può anche non essere presente nella struttura complessiva quando al blocco di elaborazione sono applicati segnali che esibiscono un legame funzionale già di tipo lineare.

In ipotesi di segnale di basso livello di ampiezza, e in particolari condizioni di funzionamento, l'amplificatore logaritmico fornirà in uscita una variazione di tensione ΔV direttamente proporzionale alla variazione di temperatura ΔT :

$$\Delta V = K \cdot \Delta T \quad (1.5)$$

Questa variazione di tensione viene poi resa disponibile all'ultimo blocco che trasforma con una costante di proporzionalità la tensione in temperatura.



Caratteristiche dei segnali

Si definisce **segnale** la modificazione dello stato di un sistema usata per ottenere, elaborare e/o trasmettere un'informazione.

Un segnale, dunque, contiene informazioni, e rappresenta la descrizione del modo di evolvere di una grandezza fisica in relazione ad una o più variabili.

La tipologia di segnale definisce, generalmente, il tipo di strumento di misura da utilizzare per ricavare l'informazione richiesta, oltre che il tipo di analisi da effettuare.

Si parla ad esempio di analisi nel dominio delle ampiezze, del tempo e della frequenza a seconda che le informazioni da ricavare siano rispettivamente ampiezze, intervalli di tempo e composizione spettrale. Per un segnale che non varia nel tempo, l'unica informazione che può essere estratta è la sua ampiezza, mentre per un segnale sinusoidale è possibile ricavare più informazioni, come il valore della ampiezza massima (dominio delle ampiezze) e il numero di oscillazioni in un secondo (dominio del tempo).

In relazione al tempo i segnali si distinguono in:

- **Segnali tempo continuo** – la variabile indipendente, il tempo, varia con continuità;
- **Segnali tempo discreto** – le informazioni relative al segnale sono definite solo in determinati istanti di tempo.

In relazione all'ampiezza i segnali si distinguono in:

- **Segnali a valori continui o analogici** – la variabile dipendente, l'ampiezza, varia con continuità assumendo tutti i valori reali compresi tra il suo valore massimo ed il suo valore minimo;
- **Segnali a valori discreti** – l'ampiezza del segnale assume valori che appartengono ad un insieme "numerabile"; le variazioni sono quantizzate.

I segnali a tempo ed ampiezza discreta, che assumono solo un numero finito di valori, si chiamano anche *numerici* o *digitali*.

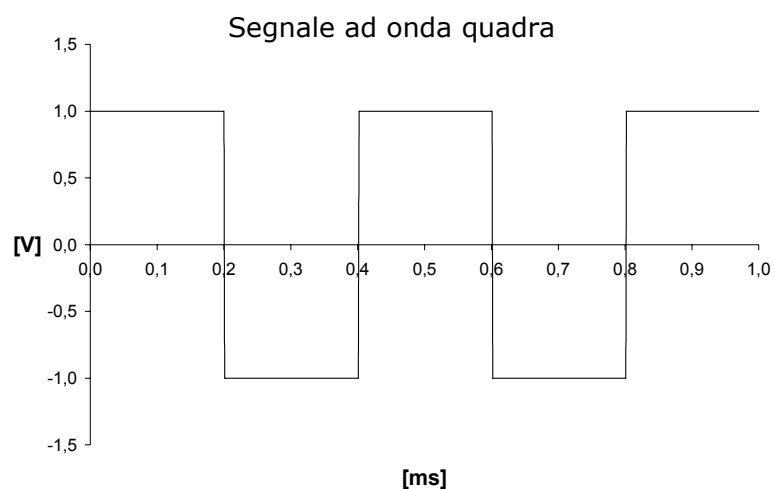
Un segnale si dice **deterministico** se è completamente descritto da un'espressione matematica, da un grafico, da una tabella o da una regola.

Un segnale si dice **aleatorio** se è una collezione di valori risultanti da un esperimento casuale.

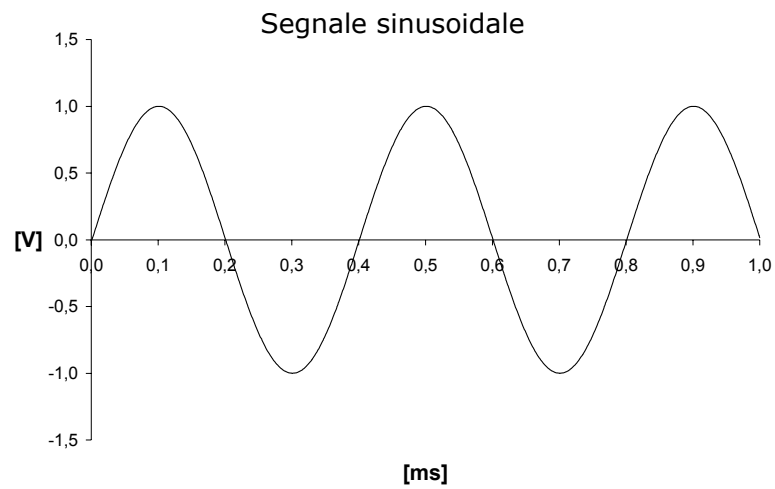
Sono segnali deterministici i segnali continui, periodici e transitori.

Un segnale si dice **periodico** se si ripete ad intervalli di tempo uguali. Il più piccolo intervallo di tempo che verifica tale proprietà è detto **periodo**. Esempi di segnali periodici sono riportati in figura 1.6, figura 1.7 e figura 1.8.

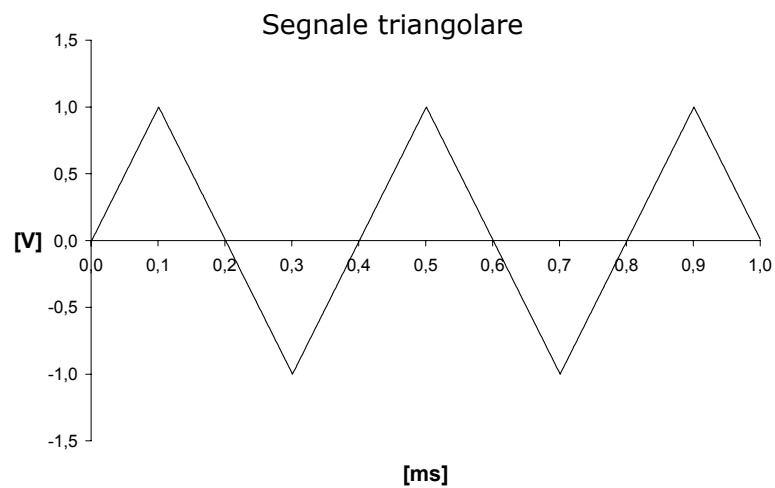
Il reciproco del periodo è la **frequenza** e si misura in hertz (s^{-1}).



- figura 1.6 -

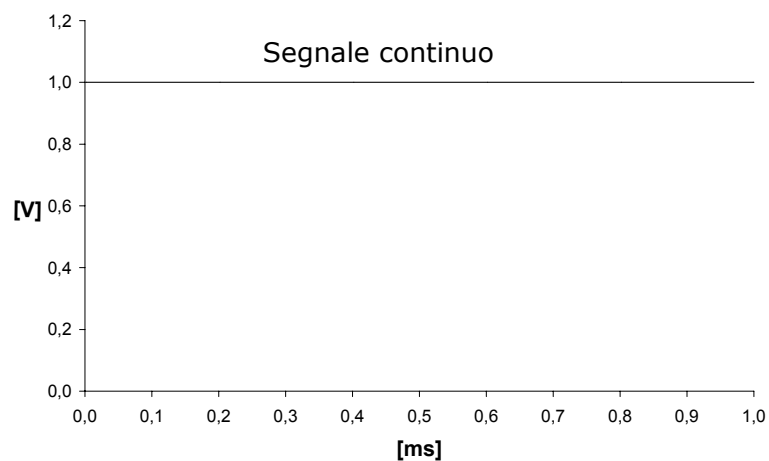


- figura 1.7 -



- figura 1.8 -

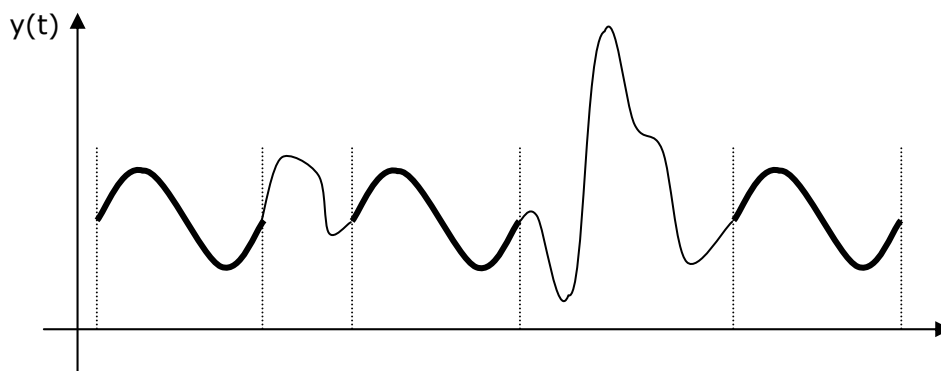
Si definisce **continuo** un segnale la cui ampiezza non cambia nel tempo. Esso può essere visto come un segnale periodico con periodo infinito (figura 1.9).



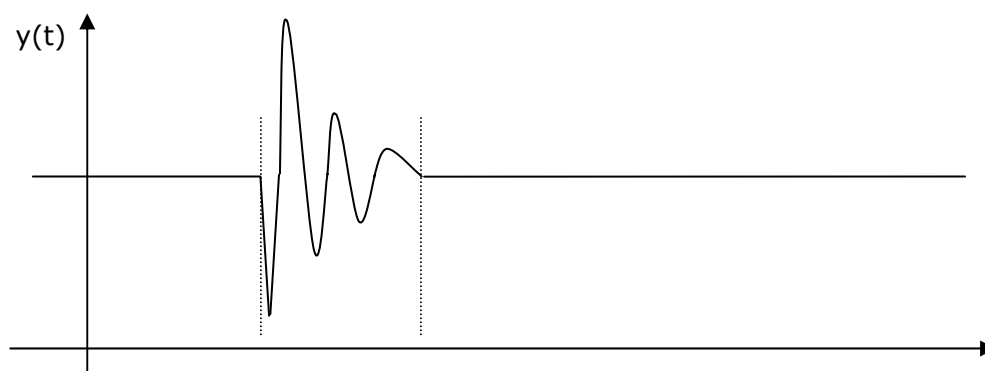
- figura 1.9 -

I segnali continui sono una sottoclasse di quelli periodici, che a loro volta costituiscono una sottoclasse dei segnali ripetitivi.

Un segnale si dice **ripetitivo** (figura 1.10) se nella sua evoluzione è possibile individuare delle zone caratterizzate da uguali andamenti, anche non regolarmente distanziate tra di loro.



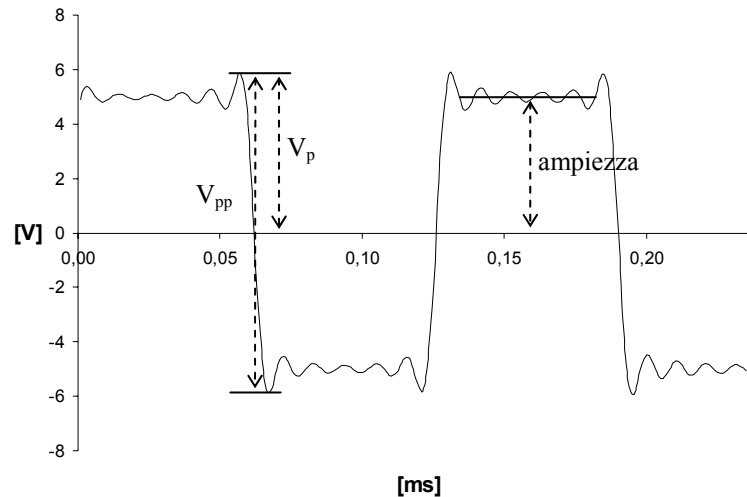
- figura 1.10 -



- figura 1.11 -

Un segnale si dice **transitorio** (figura 1.11) se risulta significativo solo su un certo intervallo di tempo la cui durata è breve rispetto al tempo di osservazione.

Le grandezze relative al valore assunto dal segnale in un dato istante prendono il nome di **grandezze istantanee**. Ad esempio, sono grandezze istantanee l'**ampiezza**, il **valore di picco** (V_p) o **valore massimo**, che è il massimo valore che assume il segnale, ed il **valore picco picco** (V_{pp}), che è la differenza tra i suoi valori massimo e minimo.



- figura 1.12 -

Le **grandezze medie** sono ottenute mediando i valori che il segnale assume in un intervallo di tempo, il tempo di osservazione; occorre integrare il segnale nel tempo di osservazione ΔT e dividere il risultato per lo stesso ΔT :

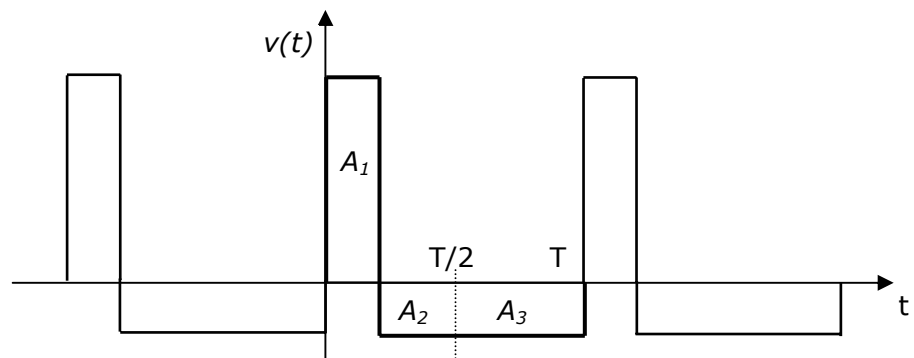
$$V_m = \frac{1}{T} \int_0^T v(t) dt \quad (1.6)$$

Si dice **alternativo** o **alternato** un segnale periodico a valor medio nullo (figura 1.12). Per tale classe di segnali è utile definire il valore medio convenzionale:

$$V_{mc} = \frac{1}{T} \int_0^T |v(t)| dt \quad (1.7)$$

dove T è il periodo.

Il valore medio sul periodo T del segnale alternato di figura 1.13, ad esempio, è nullo, poiché l'area della regione A_1 è uguale alla somma delle aree delle regioni A_2 e A_3 ma con segno opposto. Per esso, infatti, risultano le (1.8).



- figura 1.13 -

$$A_1 = A_2 + A_3 \Rightarrow \begin{cases} V_m = 0 \\ V_{mc} = \frac{A_1 + A_2 + A_3}{T} \end{cases} \quad (1.8)$$

Altre grandezze di notevole importanza sono:

Il **valore efficace**: è definito allo scopo di confrontare gli effetti termici generati da segnali elettrici periodici (T finito) con quelli generati da segnali elettrici continui. Dal punto di vista energetico la definizione è: *una corrente variabile ha valore efficace di 1A se, circolando in un resistore, produce gli stessi effetti termici di quelli prodotti da una corrente costante di 1A, nello stesso intervallo di osservazione.*

Analiticamente si definisce come:

$$V_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v^2(t) dt} \quad (1.9)$$

Per un segnale sinusoidale il valore efficace vale $V_{eff} = V_p / \sqrt{2}$, dove V_p è suo valore di picco.

Il **fattore di cresta**: è definito come il rapporto tra il valore di picco e il valore efficace. Esso fornisce indicazioni sulle entità delle sovraelongazioni del segnale rispetto al suo valore efficace.

$$\frac{V_p}{V_{eff}} \quad (1.10)$$

Il **fattore di forma**: è il rapporto tra il valore efficace e il valore medio convenzionale. Esso fornisce indicazioni sull'eventuale deformazione del segnale rispetto all'andamento atteso.

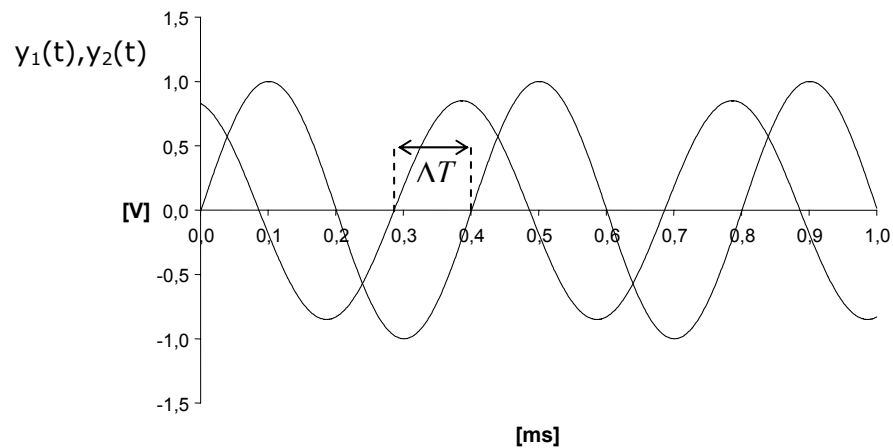
$$\frac{V_{eff}}{V_{mc}} \quad (1.11)$$

Per un segnale sinusoidale il fattore di cresta è $\sqrt{2}$, e quello di forma è 1,11.

Informazioni temporali ricavabili dai segnali periodici sono ad esempio:

- 1) l'intervallo di tempo tra due eventi del segnale (ad esempio, un evento può verificarsi quando il segnale supera un certo livello di ampiezza con una determinata pendenza);
- 2) il periodo - tempo che intercorre tra due eventi uguali e consecutivi, scelti come riferimento;
- 3) lo sfasamento tra due segnali isofrequenziali (figura 1.14) - differenza di fase tra due segnali di pari frequenza: si determina misurando l'intervallo di tempo ΔT tra due eventi (ad esempio passaggi consecutivi per lo zero con pendenza positiva) e calcolando la fase mediante la nota relazione:

$$\varphi = \omega_0 \Delta T = 2\pi f \Delta T .$$



- figura 1.14 -

Sviluppo in serie di Fourier

Tutti i segnali periodici possono essere visti come sovrapposizione di infiniti segnali sinusoidali, detti *armoniche*, ciascuna a frequenza multipla di quello di base, detto *fondamentale*.

Analizzare un segnale nel dominio della frequenza significa individuare l'ampiezza e la fase di ciascuno dei segnali componenti. La successione delle ampiezze delle varie armoniche è denominata *spettro di ampiezza*; La successione delle fasi delle varie armoniche è denominata *spettro di fase*.

Formalmente, un segnale periodico è espresso mediante la serie di Fourier:

$$y(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(n\omega_0 t) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin(n\omega_0 t) \quad (1.12)$$

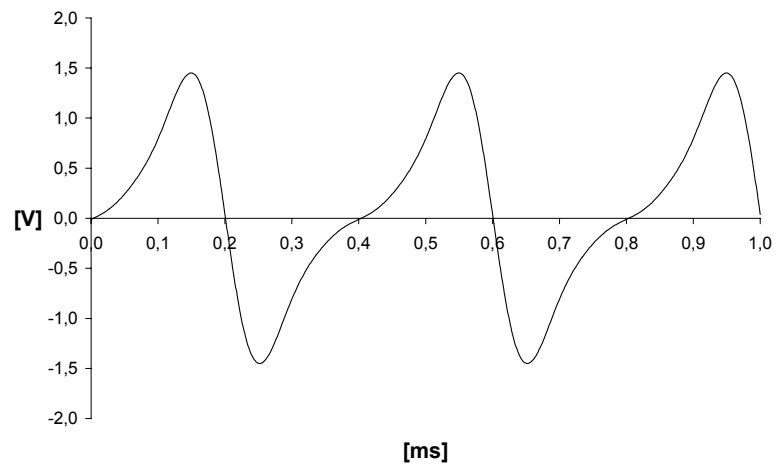
dove:

$$\omega_0 = \frac{2\pi}{T_0} \text{ è la pulsazione fondamentale,}$$

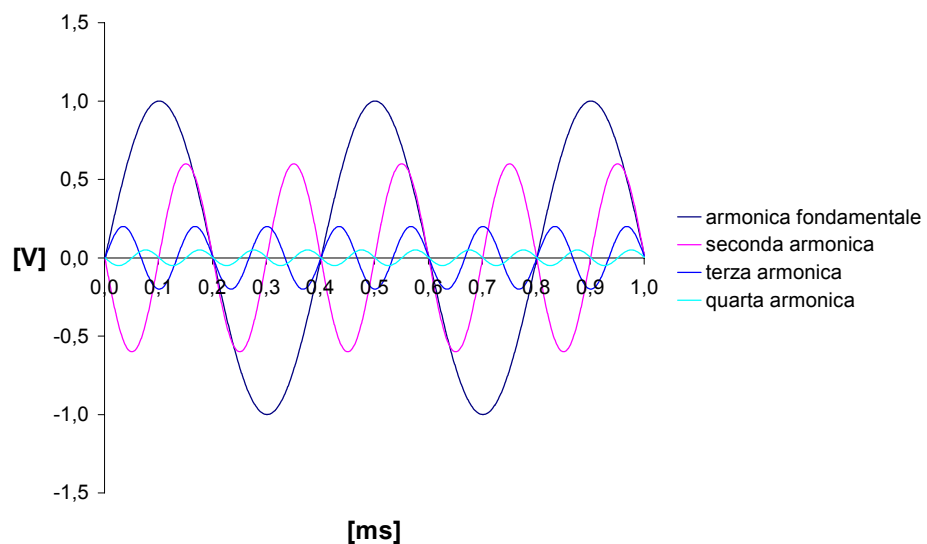
$$a_0 = \frac{1}{T_0} \int_{T_0} y(t) dt \text{ è il valore medio di } y(t),$$

$$a_n = \frac{2}{T_0} \int_{T_0} y(t) \cos(n\omega_0 t) dt, \quad b_n = \frac{2}{T_0} \int_{T_0} y(t) \sin(n\omega_0 t) dt ;$$

Ad esempio, il segnale periodico di figura 1.15 può essere visto come composto dai segnali sinusoidali di figura 1.16.



- figura 1.15 -



- figura 1.16 -

Una relazione più compatta che fornisce informazioni dirette sull'ampiezza e sulla fase è la seguente:

$$y(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \sin(n\omega_0 t + \varphi_n) \quad (1.13)$$

dove

$$A_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \quad \text{e} \quad \varphi_n = \arctg\left(\frac{b_n}{a_n}\right) \pm k\pi$$

Dall'analisi dei circuiti, ad esempio, è noto che se la tensione su di un resistore di 1Ω vale:

$$v_n(t) = a_n \cos(\omega_n t) + b_n \sin(\omega_n t) \quad (1.14)$$

la potenza media dissipata sul resistore vale $\langle P_n \rangle = \frac{\langle v_n^2(t) \rangle}{R} = \frac{a_n^2 + b_n^2}{2}$ watt.

Il quadrato dello spettro di ampiezza è quindi una misura della potenza dissipata in un resistore di 1Ω alle differenti frequenze ($n=0,1,2,\dots$). Sommando la potenza dissipata ad ogni frequenza si ottiene la potenza media totale dissipata quando la tensione applicata è periodica.

Caratteristiche degli strumenti di misura

- 1) **Portata** o **fondo scala** – rappresenta, in genere, il valore massimo della grandezza che lo strumento è in grado di misurare.
- 2) **Sensibilità** – è definita, nell'accezione più generale, come il rapporto tra il più piccolo valore rappresentabile da uno strumento di misura e il corrispondente valore della grandezza in ingresso. Analiticamente, è la derivata dell'uscita rispetto l'ingresso. In relazione al tipo di strumento la sensibilità può assumere anche significati diversi. Nel caso di strumenti analogici per la rilevazione di zero, la sensibilità è la minima variazione della grandezza in ingresso affinché l'indice del visualizzatore si sposti dalla posizione di riposo alla prima deviazione rappresentata sulla scala graduata dello strumento. Nel caso dei contatori numerici, essa è intesa come la minima ampiezza che il segnale in ingresso deve avere per poter essere analizzato.

- 3) **Risoluzione** – minimo valore *rappresentabile* dallo strumento di misura e, come tale, è legata al dispositivo di visualizzazione dello strumento.
Per un dispositivo con indicazione digitale, la risoluzione coincide con la variazione di una unità per la cifra meno significativa.
Per esempio, un voltmetro che può visualizzare al massimo 49999 conteggi e con portata di 500mV, la massima indicazione possibile è di 499.99mV. La minima quantità che può essere visualizzata è di 0.01mV=10 μ V che è, pertanto, la risoluzione sulla portata di 500mV.
In termini relativi, si può dire che lo strumento consente di apprezzare una parte su 50000. Questo corrisponde ad una risoluzione relativa di 2×10^{-5} .
- 4) **Dinamica** – è l'intero intervallo di valori, detto *range*, che può essere rappresentato dallo strumento di misura; è la differenza tra la portata e la sensibilità (vista come ampiezza minima dell'ingresso).
- 5) **Precisione** – fornisce indicazioni sulla qualità della misurazione; risulta tanto maggiore quanto più basso è il margine di indeterminazione, ossia l'incertezza.
- 6) **Tempo di misura** – tempo necessario allo strumento per effettuare la misurazione e per fornire all'utente il risultato.

Molto spesso è necessario un compromesso tra le ultime due caratteristiche: si può decidere di eseguire una misurazione rapida al costo di un maggior degrado della precisione, oppure una misura estremamente accurata ma con maggior costo in termini di tempi di attesa.