

Laboratorio di Elettronica

Lezione 1:

Sicurezza elettrica – Grandezze elettriche e circuiti elettrici

Valentino Liberali, Alberto Stabile



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI MILANO
Dipartimento di Fisica “Aldo Pontremoli”

E-mail: valentino.liberali@unimi.it, alberto.stabile@unimi.it

Milano, 23-24 marzo 2022

Contenuto

- 1 Contenuti, obiettivi e modalità di esame
- 2 Che cos'è l'elettronica
- 3 Grandezze elettriche
- 4 Sicurezza elettrica
- 5 Bipoli elettrici
- 6 La strumentazione
- 7 Tipologie di misure
- 8 Risoluzione dei circuiti
- 9 Leggi di Kirchhoff

Contenuti dell'insegnamento e obiettivi formativi

Il modulo di Elettronica ha lo scopo di insegnare i concetti fondamentali dei circuiti elettrici e della misura delle grandezze elettriche, sia in continua, sia nei domini del tempo e della frequenza.

Organizzazione didattica:

- due mezze giornate alla settimana, in due giorni consecutivi (sarà utile quando avremo circuiti complicati e misure che richiedono tempi più lunghi)
- due ore di lezione teorica in aula (+ aula virtuale, se necessario)
- due ore in laboratorio

In laboratorio ci sono banchi attrezzati con la strumentazione di misura; ciascun banco può ospitare tre studenti.

→ Suddivisione in gruppi di tre studenti e assegnazione dei banchi (oggi)

Durata: 8 settimane

Al termine, saranno possibili alcuni recuperi delle esercitazioni perse in caso di assenza per malattia.

Materiale didattico e modalità di esame

Il sito web dell'insegnamento

<https://vliberalie.ariel.ctu.unimi.it/v5/Home/>

contiene il materiale e ulteriori riferimenti per approfondimenti.

Avvertenza: Il materiale del 2021 verrà progressivamente aggiornato, indicando la data di aggiornamento.

L'esame comprende due parti:

- Due relazioni scritte, su due degli argomenti visti in laboratorio, riportando schematici, spiegazione teorica, misure (o risultati di simulazione), commenti
- Una prova orale volta a dimostrare la comprensione degli argomenti visti

Sarà verbalizzato un solo voto, dato dalla media tra il voto del modulo di Elettronica e quello di Ottica e Fisica Moderna.

Che cos'è l'elettronica

Elettronica

L'elettronica è la disciplina scientifico-tecnologica che si occupa della generazione, del trasporto, del controllo e della raccolta di particelle subatomiche dotate di massa e di carica elettrica (come, ad esempio, gli elettroni).

Gli elettroni sono adatti ad essere impiegati nei sistemi per l'elaborazione, la trasmissione e l'archiviazione delle informazioni. È possibile far muovere un elevato numero di elettroni a grande velocità e impiegando un ridotta quantità di energia, perché la massa delle particelle è piccola.

L'elettronica permette di realizzare sistemi fisici molto complessi ed efficienti.

Il Sistema Internazionale (SI)

Le grandezze elettriche si esprimono mediante le unità di misura del Sistema Internazionale (SI).

Grandezze fondamentali:

- **lunghezza:** metro (m)
- **massa:** kilogrammo (kg)
- **tempo:** secondo (s)
- **corrente (intensità di corrente elettrica):** ampere (A)
- **temperatura:** kelvin (K)

Grandezze derivate:

- **velocità:** metri al secondo (m/s)
- **energia:** joule (J); $1\text{ J} = 1\text{ kg m}^2/\text{s}^2$
- **carica elettrica:** coulomb (C); $1\text{ C} = 1\text{ A s}$

Anche la temperatura potrebbe essere considerata una grandezza derivata, perché esprime l'energia media per particella. Tuttavia, si preferisce usare una apposita unità fondamentale: il kelvin (K).

Convenzioni tipografiche

Le grandezze fisiche vengono indicate con simboli corsivi: ad esempio, t , V , W , q . Invece le unità di misura sono indicate in carattere normale (**mai in corsivo!**): ad esempio, s , V , J , C .

$$V = 2\text{ V}$$

Questo modo di scrivere non è ambiguo:

- la prima V è scritta in corsivo e indica la grandezza fisica (in questo caso, la tensione),
- la seconda V non è scritta in corsivo ed indica l'unità di misura (in questo caso, è l'abbreviazione di volt).

Carica elettrica

La **carica elettrica** si indica con Q , e si misura in coulomb (C);

$$1\text{ C} = 1\text{ A s}$$

La carica elettrica è una proprietà fondamentale della materia, come la massa. A differenza della massa, che non può essere negativa, la carica elettrica può essere sia positiva sia negativa.

Soltamente, la carica elettrica è quantizzata: tutte le cariche sono multiple di una carica elementare $q = 1.6021 \times 10^{-19}$ C.

La materia è elettricamente neutra: ogni atomo contiene un numero uguale di protoni e di elettroni, e quindi la carica totale è zero. Tuttavia, in certe condizioni, è possibile separare le cariche positive da quelle negative.

Occorre distinguere tra **cariche elettriche fisse** e **cariche elettriche mobili**.

Le **cariche elettriche mobili** sono responsabili della corrente elettrica. Le **cariche elettriche fisse**, invece, non contribuiscono alla corrente elettrica.

In un metallo, la corrente elettrica è dovuta solamente al movimento degli elettroni del livello energetico più esterno di ciascun atomo.

Corrente elettrica

La **corrente elettrica** (o, più propriamente, intensità di corrente elettrica), indicata con I , è data dal movimento di cariche mobili (dette “portatori”); matematicamente si esprime come la derivata della carica elettrica rispetto al tempo:

$$I = \frac{dQ}{dt}$$

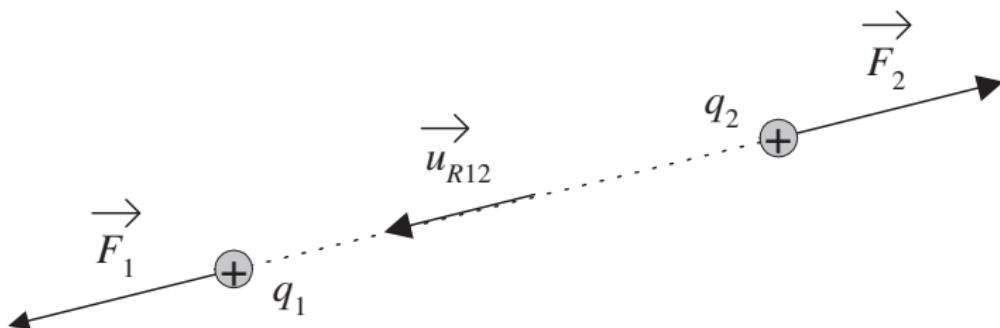
I si misura in ampere (A); $1\text{ A} = 1\text{ C/s}$

Il concetto di carica elettrica è più elementare di quello di corrente elettrica, ma la corrente elettrica è più facile da produrre: per questo motivo l'ampere è stato scelto come grandezza fondamentale.

Forza di Coulomb

La **forza di Coulomb**: due particelle caricate q_1 e q_2 si attraggono (se hanno segno opposto) o si respingono (se hanno lo stesso segno) con una forza direttamente proporzionale al prodotto delle cariche e inversamente proporzionale al quadrato della distanza:

$$\vec{F}_1 = \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{q_1 q_2}{R_{12}^2} \vec{u}_{R_{12}}$$



Campo elettrico

Il **campo elettrico**: è il rapporto tra la forza che agisce su una carica q e la carica q medesima:

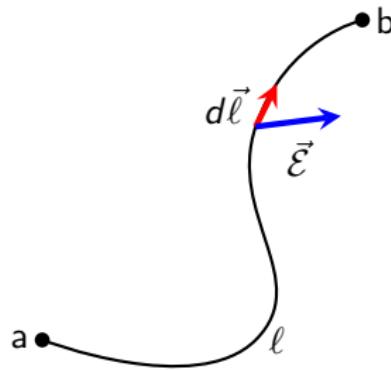
$$\vec{\mathcal{E}} = \frac{\vec{F}}{q} = \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{Q}{R^2} \vec{u}_R$$

Il campo elettrico \mathcal{E} si misura in volt al metro (V/m), che equivalgono a newton al coulomb (N/C); $1\text{V/m} = 1\text{N/C}$

Tensione

La **differenza di potenziale** o **tensione** tra due punti: è l'integrale di linea del campo elettrico su un percorso qualsiasi ℓ che congiunge a e b :

$$V_{ab} = \int_a^b \vec{\mathcal{E}} \cdot d\vec{\ell} = - \int_b^a \vec{\mathcal{E}} \cdot d\vec{\ell}$$



La differenza di potenziale è indipendente dal percorso ℓ e dipende solo dai punti iniziale e finale. Invertendo i due estremi del percorso, la differenza di potenziale cambia segno: $V_{ba} = -V_{ab}$.

Se il percorso è chiuso, la differenza di potenziale è nulla: $V_{aa} = 0$
 V si misura in volt (V); $1\text{ V} = 1\text{ kg m}^2/(\text{A s}^3)$

Potenza

In elettronica, la **potenza** P è esprimibile come il prodotto tra la tensione V e la corrente I :

$$P = VI$$

- tensione, o differenza di potenziale (in inglese, *voltage*): V , in volt (V)
- corrente: I , in ampere (A)

$$1 \text{ V} \cdot 1 \text{ A} = 1 \text{ W}$$

Sicurezza elettrica (1/3)

L'energia elettrica viene distribuita attraverso la rete di distribuzione, con un *sistema trifase* a quattro conduttori: tre conduttori hanno tre tensioni sinusoidali sfasate tra loro di 120° , mentre il quarto, detto *neutro*, è collegato alla terra, che costituisce il potenziale zero di riferimento.

Il *valore medio* della tensione di rete è zero; il *valore efficace* o *valore rms* (root-mean-square, cioè la radice quadrata della media del quadrato) è 230 V (che corrisponde ad un *valore di picco* di circa 325 V ($= 230 \text{ V} \cdot \sqrt{2}$)).

Negli edifici per usi civili, normalmente l'energia elettrica è distribuita attraverso una sola delle tre fasi e il conduttore neutro (*sistema monofase*).

La tensione di rete è pericolosa per le persone e per questo motivo tutte le apparecchiature elettriche devono essere conformi alle norme di sicurezza.

Sicurezza elettrica (2/3)

La **folgorazione** è il passaggio di una forte corrente elettrica attraverso il corpo. Gli effetti della corrente nel corpo umano provocano ustione sulla pelle, stimolazione neuromuscolare, e fibrillazione cardiaca.

La gravità degli effetti dipende dalla intensità di corrente, dalla frequenza, e dal tempo di permanenza sugli organi interessati. L'interruzione rapida potrebbe non avere conseguenze gravi. C'è grande dipendenza dalle condizione del soggetto che subisce gli effetti della corrente.

Sicurezza elettrica (3/3)

Per garantire la sicurezza dell'operatore, le apparecchiature elettriche devono rispettare determinate specifiche di sicurezza.

3 classi di sicurezza:

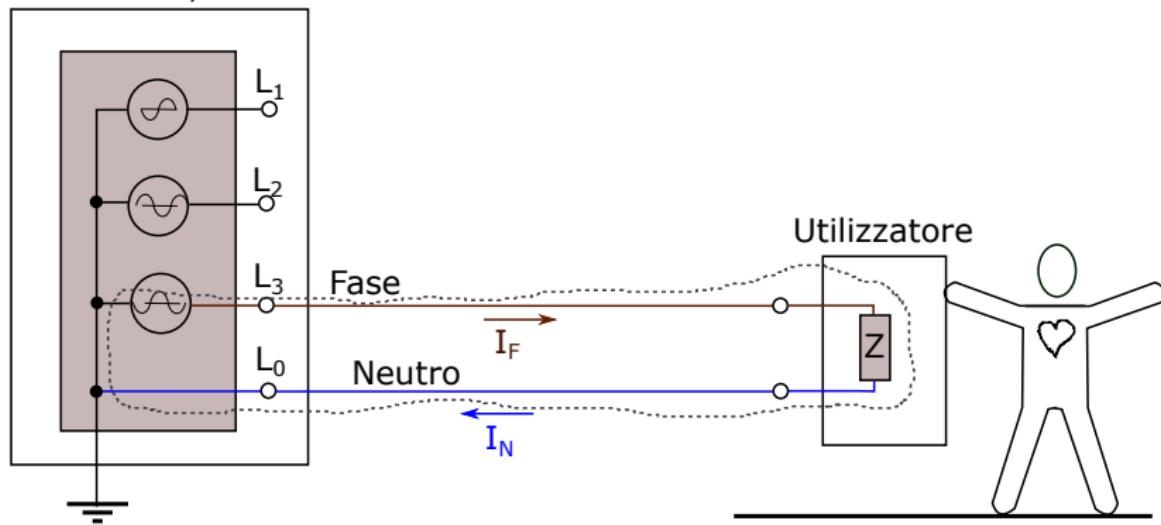
- **Classe I**: messa a terra di protezione
- **Classe II**: doppio isolamento
- **Classe III**: bassissima tensione di sicurezza

Messa a terra di protezione (1/3)

Un circuito elettrico monofase in funzionamento regolare ha tutte le parti in tensione isolate per il livello di tensione nominale, e l'involucro metallico dell'apparecchiatura (*massa*) è collegata alla terra. In queste condizioni, la persona che contatta l'involucro di protezione di un apparecchio elettrico non provoca alcun inconveniente.



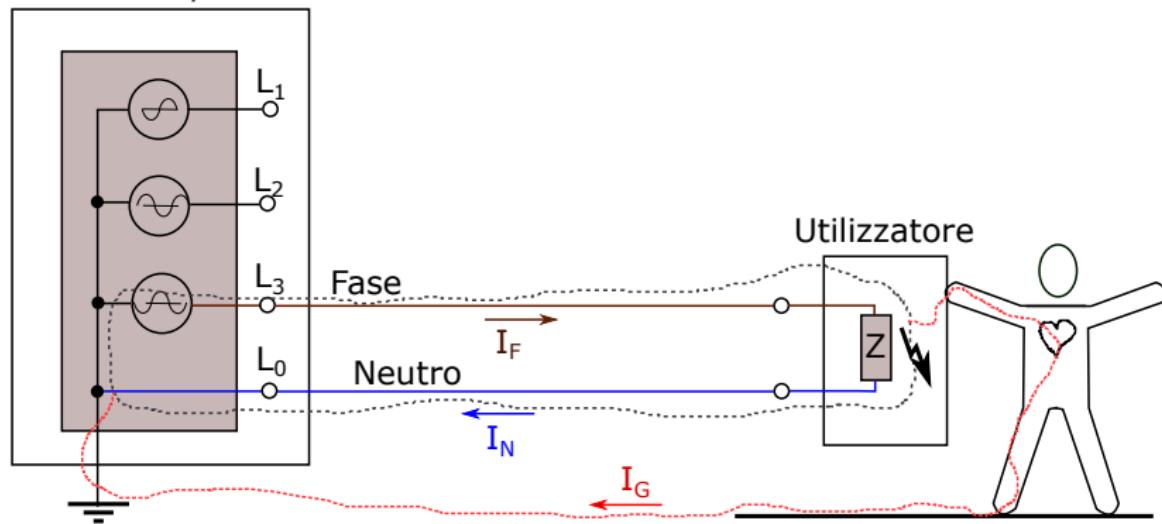
Cabina MT/BT



Messa a terra di protezione (2/3)

Quando vi è un contatto accidentale tra i conduttori interni e l'involucro metallico esterno, si ha un guasto di massa. La corrente di fase I_F si divide in due parti: una corrente I_N che percorre il conduttore neutro, e un'altra corrente I_G , detta *corrente di guasto*, che attraversa l'infortunato e poi il terreno, e si richiude nel nodo centrale del generatore di tensione che è posto a terra.

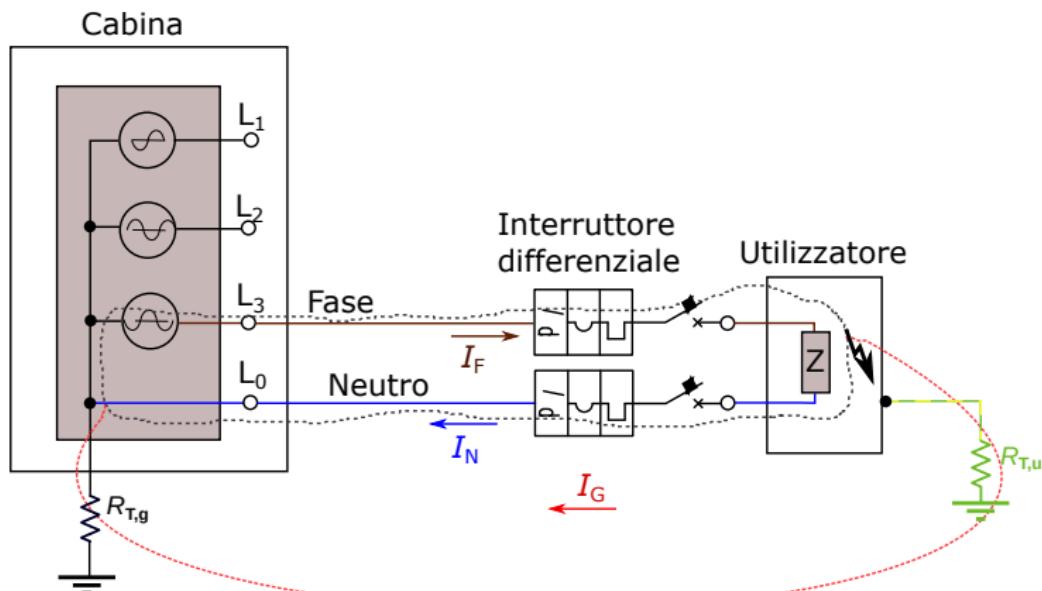
Cabina MT/BT



Messa a terra di protezione (3/3)

Il generatore è posto a terra in cabina con resistenza $R_{T,g}$. Le masse dell'impianto utilizzatore sono poste a terra con resistenza $R_{T,u}$. In caso di guasto, una parte della corrente (la corrente di guasto I_G) va verso la massa e si chiude sulla resistenza $R_{T,u}$.

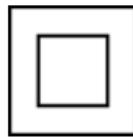
L'interruttore differenziale rileva lo squilibrio fra le correnti I_F e I_n e apre il circuito automaticamente nel giro di 10-20 ms.



Doppio isolamento

Gli apparecchi a doppio isolamento sono progettati in modo da non richiedere la messa a terra.

Sono costruiti in modo che un singolo guasto non possa causare il contatto con tensioni pericolose da parte dell'utilizzatore. Ciò è ottenuto in genere realizzando l'involucro del contenitore in materiali isolanti, o comunque facendo in modo che le parti in tensione siano circondate da un doppio strato di materiale isolante (isolamento principale + isolamento supplementare) o usando isolamenti rinforzati.



Gli apparecchi a doppio isolamento sono contraddistinti da questo simbolo e non hanno il collegamento di terra (esempio: caricabatterie per il telefono cellulare).

Bassissima Tensione di Sicurezza

Una tensione non superiore a 25 V (in alternata) o 50 V (in continua) non rappresenta un pericolo per il corpo umano (SELV = Safety Extra Low Voltage), pertanto non è necessaria nessuna protezione di sicurezza.

Si raccomanda si non collegare in serie gli alimentatori di laboratorio per ottenere valori di tensione superiori!

Avvertenza: molti componenti che useremo in laboratorio devono essere usati con tensioni **inferiori** al limite massimo della SELV. Si consiglia di non superare ± 12 V (o al massimo ± 15 V) per i circuiti che vedremo nelle prossime lezioni.

Marcatura CE

Tutte le apparecchiature elettriche *messe in vendita* devono essere conformi agli standard europei di sicurezza elettrica, certificati, e dotati di marcatura CE.

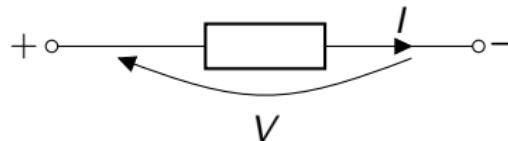


Gli standard di sicurezza prevedono che le apparecchiature elettriche siano sicure per l'utilizzatore, **anche in presenza di guasto singolo**.

Attenzione: la mancanza del collegamento di terra è già un guasto; pertanto, un'apparecchiatura non collegata a terra non è sicura se si verifica un altro guasto!

Bipoli elettrici

I circuiti elettrici sono formati da elementi circuitali interconnessi tra di loro. I più semplici elementi circuitali sono dispositivi a due terminali o bipoli.



Al bipolo è applicata la differenza di potenziale V e attraverso il bipolo fluisce la corrente I . I due terminali del bipolo vengono contrassegnati con i simboli + (morsetto positivo) e - (morsetto negativo).

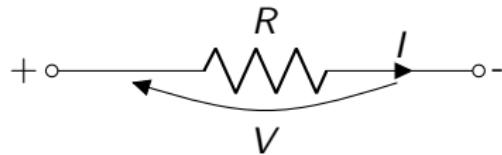
La tensione si misura dal polo negativo a quello positivo. La corrente si considera positiva quando entra nel bipolo dal terminale positivo.

Questa è la convenzione degli utilizzatori, usata in SPICE. Con questa convenzione, la potenza è positiva quando viene assorbita dal bipolo, ed è negativa quando viene erogata.

Resistore

È il più semplice bipolo lineare, caratterizzato da proporzionalità diretta tra tensione e corrente (**Legge di Ohm**):

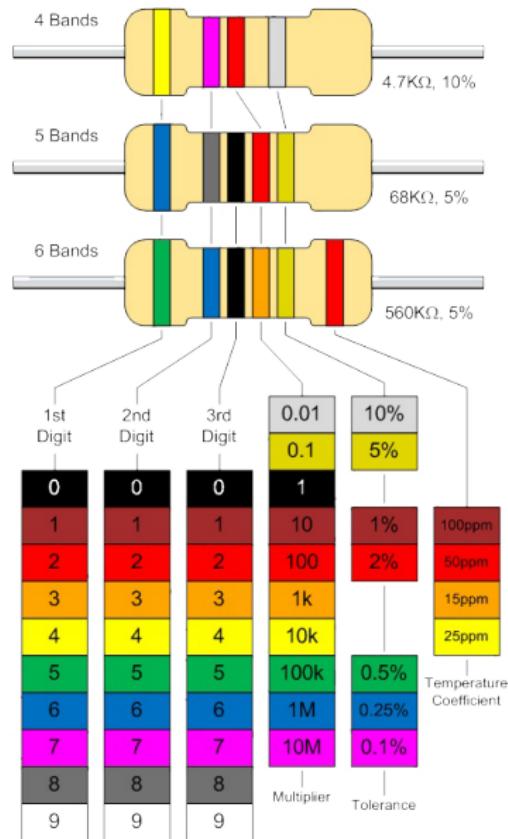
$$V = RI$$



R è la resistenza, che si misura in ohm (Ω);

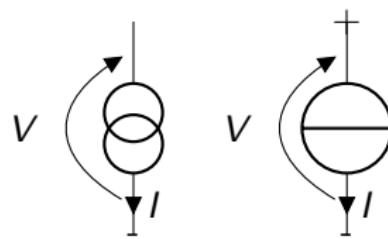
$$1 \Omega = 1 \text{ V/A} = 1 \text{ kg m}^2 / (\text{A}^2 \text{ s}^3)$$

Codici colore per i resistori



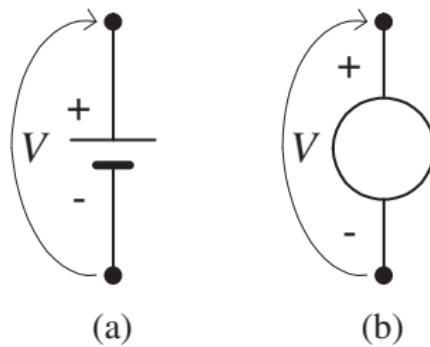
Generatore di corrente

È un bipolo attraversato da una corrente fissata. Costruttivamente, è più complesso da realizzare rispetto ad un generatore di tensione.



Generatore di tensione

È un bipolo che presenta fra i suoi terminali una tensione fissata. Il più semplice generatore di tensione costante nel tempo è una pila o batteria.



(a) = generatore di tensione costante

Il multmetro

Tipicamente un multmetro può misurare tensione, corrente e resistenza.

I multimetri sono di due tipi: analogici e digitali. I multimetri analogici usano un microamperometro con un puntatore per leggere il display. I multimetri digitali hanno un display numerico. Essi possono mostrare una barra grafica che rappresenta il valore misurato. Sono più venduti rispetto a quelli analogici poiché meno costosi e più precisi. Tuttavia quelli analogici sono migliori quando si vuole misurare una cambio repentino nel valore.

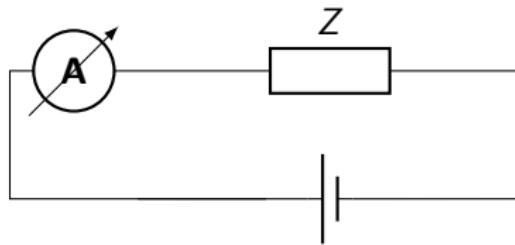
I multimetri sono costruiti in due versioni:

- **Palmari**, molto maneggevoli, non hanno necessità di disporre di una presa di corrente per funzionare in quanto hanno al loro interno le batterie necessarie per l'alimentazione del circuito di misura. Nel caso dei multimetri analogici, l'alimentazione è necessaria solo per la misurazione della resistenza elettrica o per le funzioni aggiuntive in quanto la misura di corrente e tensione avviene sfruttando l'energia del circuito in esame.
- **Portatili e da banco**, sono usati prevalentemente in un posto fisso di lavoro, avendo necessità di un'alimentazione elettrica esterna per funzionare; questi ultimi hanno generalmente prestazioni superiori e la possibilità di essere collegati in rete con altri strumenti tramite bus IEEE-488, ed essere gestiti dal computer.

Misura di corrente

La corrente si misura in serie.

Bisogna aprire il circuito e inserire l'amperometro in serie. Scomodo e non consigliabile. Si può misurare la corrente in continua o in alternata.



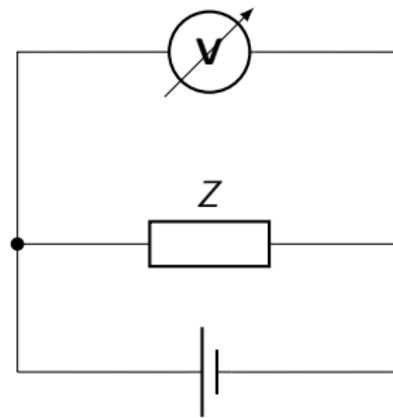
Misura di corrente



Misura di tensione

La tensione si misura in parallelo. Per misurare la tensione bisogna mettere in parallelo al circuito il voltmetro. Comodo e consigliabile. Si può misurare la tensione in continua o in alternata.

Si può anche misurare indirettamente la corrente, misurando la tensione ai capi di una resistenza di valore noto, e ricavando la corrente dalla legge di Ohm.



Misura di tensione



L'alimentatore

Un alimentatore funziona in modo simile ad un generatore ideale, di tensione o di corrente (dipendentemente dal tipo e dalle impostazioni).

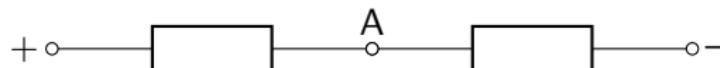
I modelli più comuni si comportano da **generatori di tensione**, fornendo in uscita una tensione **continua, fissa e stabile**, il cui valore è impostabile da 0 V fino a (tipicamente) circa 30 V.

Per evitare danneggiamenti (sia ai circuiti collegati ma anche all'alimentatore stesso) tutti gli alimentatori sono dotati di un circuito di protezione contro i corti circuiti, che provvede a limitare in caso di sovraccarico o di corto circuito accidentale la corrente di uscita ad un valore in genere modificabile dall'utente. Il valore della corrente massima deve essere impostato ad un valore leggermente superiore a quello necessario per il corretto funzionamento del circuito (per le esercitazioni, è sufficiente una corrente di decine o centinaia di milliampere). Si ricordi di collegare la messa a terra a uno dei due terminali!



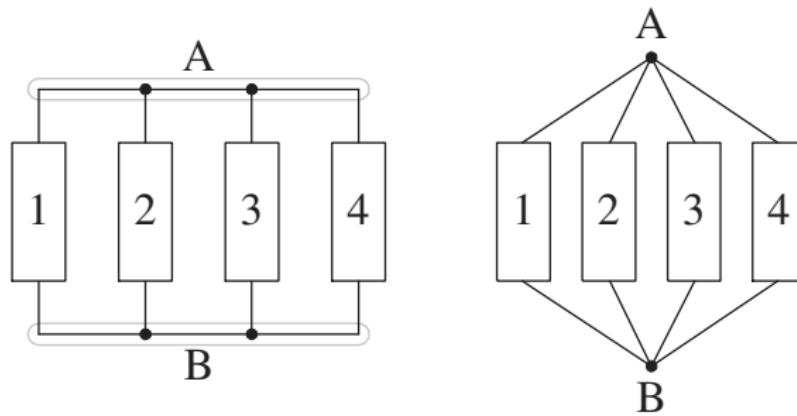
Nodi di un circuito

I bipoli possono essere interconnessi tra loro collegandone i terminali.



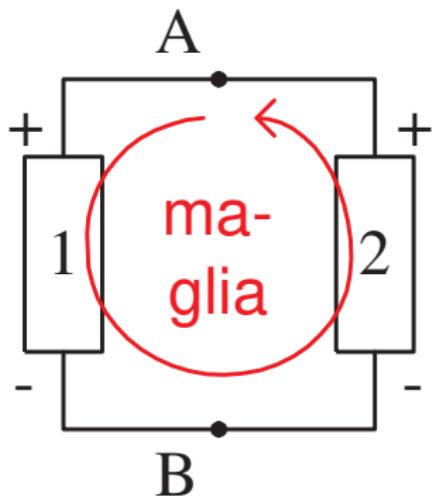
Un punto comune a due o più bipoli è detto nodo. Esempio: A è un nodo.
Attenzione a non farsi ingannare dai diversi modi di disegnare un circuito:
l'importante è guardare i collegamenti elettrici. Non è detto che i nodi debbano
essere puntiformi!

Due circuiti uguali disegnati in modo diverso:

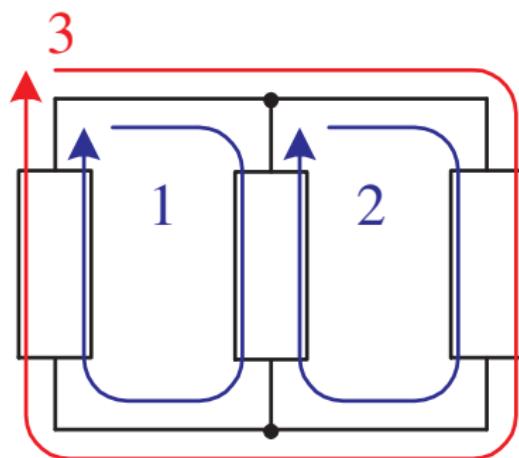


Maglie di un circuito

Una maglia è un percorso chiuso attraverso due o più bipoli di un circuito.



Circuito con una maglia e due nodi

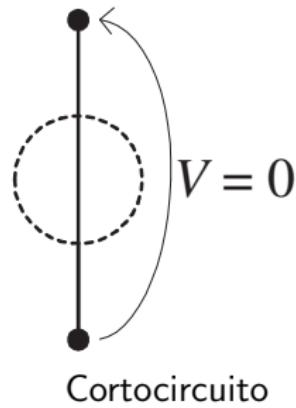


Circuito con tre maglie e due nodi

Cortocircuito

Un generatore di tensione spento ha ai suoi capi una tensione nulla: $V = 0$, e I qualsiasi.

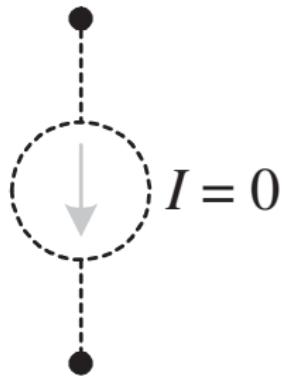
Il **cortocircuito** è un collegamento tra due nodi effettuato con un generatore di tensione nulla (in pratica, un filo di materiale conduttore).



Circuito aperto

Un generatore di corrente spento è percorso da una corrente nulla: $I = 0$, e V qualsiasi.

Il **circuito aperto** è un collegamento tra due nodi effettuato con un generatore di corrente nulla (in pratica, è l'assenza di collegamento).



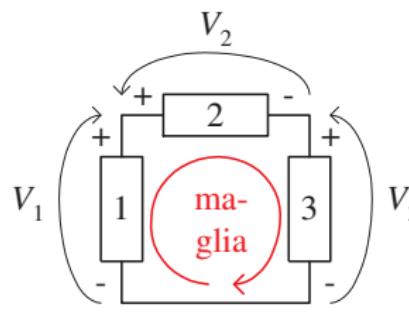
Legge di Kirchhoff per le tensioni

In inglese: *Kirchhoff Voltage Law* o KVL

Lungo qualsiasi maglia di un circuito, la somma algebrica di tutte le tensioni è pari a zero:

$$\sum_{k \in \text{maglia}} V_k = 0$$

Consideriamo positive le tensioni concordi con il verso di percorrenza della maglia, e negative le tensioni discordi con il verso di percorrenza.



$$V_1 - V_2 - V_3 = 0$$

In questo esempio, V_1 è concorde, mentre V_2 e V_3 sono discordi rispetto al verso di percorrenza della maglia. La scelta del verso di percorrenza della maglia è **arbitraria**.

Scegliere il verso opposto è come moltiplicare per -1 tutti i termini dell'equazione.

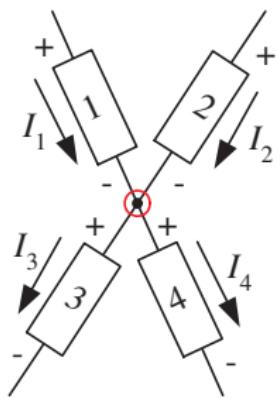
Legge di Kirchhoff per le correnti

In inglese: *Kirchhoff Current Law* o KCL

In qualsiasi nodo di un circuito, la somma algebrica di tutte le correnti è pari a zero:

$$\sum_{k \in \text{nodo}} I_k = 0$$

Consideriamo positive le correnti entranti nel nodo, e negative le correnti uscenti dal nodo.



$$I_1 + I_2 - I_3 - I_4 = 0$$

In questo esempio, I_1 e I_2 sono entranti, mentre I_3 e I_4 sono uscenti dal nodo.

Risoluzione di un circuito

Risolvere un circuito significa calcolare la tensione e la corrente per ogni bipolo.
Per i circuiti in continua, si utilizzano:

- la legge di Ohm per i resistori;
- la legge di Kirchhoff per le tensioni alle maglie;
- la legge di Kirchhoff per le correnti ai nodi.

Numero di equazioni di Kirchhoff indipendenti

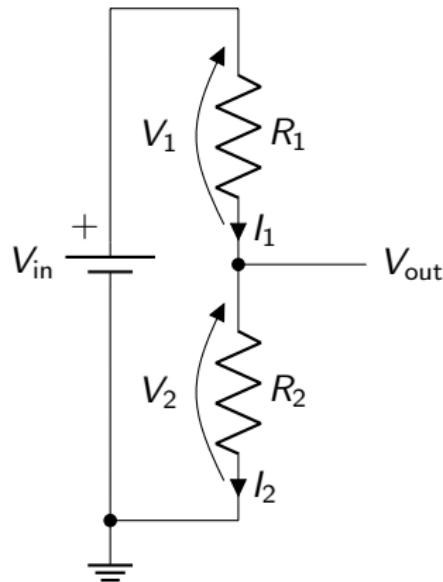
Definendo con N il numero dei nodi di un circuito e con E il numero dei rami (bipoli), si può dimostrare^a che:

- Sono necessarie $2E$ equazioni per descrivere un circuito
- Esistono $E - N + 1$ equazioni delle maglie indipendenti
- Esistono $N - 1$ equazioni dei nodi indipendenti

^a<http://www.wiley.com/college/thomas/0471386790/topology/topology.pdf>

Partitore di tensione (1/2)

Un partitore di tensione è costituito da due o più componenti passivi collegati in serie; se ai capi della serie viene applicata una tensione, essa si ripartirà ai capi dei componenti in base al loro valore.



Partitore di tensione (2/2)

La corrente che fluisce nelle due resistenze è:

$$I_2 = I_1 = I;$$

Inoltre, utilizzando la legge di Ohm ai capi di ogni resistenza si ottiene:

$$V_1 = I_1 R_1 = IR_1$$

$$V_2 = I_2 R_2 = IR_2$$

Utilizzando la KVL si ottiene che $V_{\text{in}} = V_1 + V_2$ e si ha quindi

$$IR_1 + IR_2 = V_{\text{in}}$$

$$I = \frac{V_{\text{in}}}{R_1 + R_2}$$

La tensione ai capi del resistore R_2 sarà:

$$V_2 = V_{\text{in}} \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

Mentre la tensione ai capi del resistore R_1 sarà:

$$V_1 = V_{\text{in}} \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$