

# ELETTROTECNICA GENERALE

Concetti Introduttivi

prof. Cleto Azzani  
IPSIA Moretto Brescia  
Novembre 2006  
Rel. 21-2-07

# INDICE

Tabella dei multipli e sottomultipli nel Sistema Internazionale .....	3
Prefissi dei multipli sistema binario.....	3
Esempi e confronti con i prefissi del Sistema Internazionale .....	4
Classificazione dei conduttori.....	5
Tipi di conduttori.....	5
Conduttori metallici.....	5
Conduttori elettrolitici.....	5
Conduttori gassosi.....	5
Isolanti .....	6
Semiconduttori.....	6
La conduzione nei Conduttori, isolanti e semiconduttori.....	6
Conducibilità nei conduttori.....	7
Conducibilità negli isolanti.....	7
Conducibilità nei semiconduttori.....	8
Superconduttività .....	8
Corrente elettrica .....	9
Carica elettrica elementare .....	10
Intensità di corrente.....	10
Unità di misura pratica della carica elettrica.....	10
Pile e Batterie: i generatori .....	11
Tensione o differenza di potenziale .....	12
Sorgente di tensione.....	12
Osservazione:.....	12
Esempio di Tensioni .....	13
Analogia con un circuito idraulico.....	13
Caduta di tensione.....	13
Legge di Ohm: Resistenza elettrica.....	14
Legge di Ohm .....	14
Seconda legge di Ohm.....	16
<i>Resistori commerciali: il Codice dei Colori</i> .....	18
<i>Resistori commerciali e Valori Normalizzati</i> .....	18
Collegamenti di lampade in parallelo e in serie .....	19
Nodi di una rete elettrica .....	20
KCL legge (o Primo Principio) di Kirchhoff ai nodi .....	20
Collegamenti di resistenze in serie.....	21
Osservazioni.....	21
Collegamenti di resistenze in parallelo.....	21
Osservazioni.....	22
Formule di Conversione $\Delta$ -Y e Y- $\Delta$ .....	23
Conversione $\Delta$ -Y .....	24
Conversione Y- $\Delta$ .....	24
Nodi, lati, maglie di una rete elettrica .....	24
KVL legge (o Secondo Principio) di Kirchhoff alle maglie.....	26
Risoluzione dei circuiti elettrici utilizzando i due principi di Kirchhoff .....	26
Potenza elettrica.....	27
Convenzioni di segno per un generatore e per un utilizzatore .....	27
Convenzioni di segno in un generico bipolo .....	28
Bilancio Energetico (o di Potenza) di una rete elettrica .....	28
Strumenti di misura e loro impiego .....	29
Metodo Volt-Amperometrico.....	30
Potenziometro .....	36
Reostato .....	37
Circuito di Ayrton.....	42

## Tabella dei multipli e sottomultipli nel Sistema Internazionale

fattore di moltiplicazione	prefisso	simbolo	valore	
$10^{24}$	<b>yotta</b>	<b>Y</b>	1 000 000 000 000 000 000 000 000	<b>1991</b>
$10^{21}$	<b>zetta</b>	<b>Z</b>	1 000 000 000 000 000 000 000	<b>1991</b>
$10^{18}$	<b>exa</b>	<b>E</b>	1 000 000 000 000 000 000	<b>1975</b>
$10^{15}$	<b>peta</b>	<b>P</b>	1 000 000 000 000 000	<b>1975</b>
$10^{12}$	<b>tera</b>	<b>T</b>	1 000 000 000 000	1960
$10^9$	<b>giga</b>	<b>G</b>	1 000 000 000	<b>1960</b>
$10^6$	<b>mega</b>	<b>M</b>	1 000 000	<b>1960</b>
$10^3$	<b>chilo</b>	<b>k</b>	1 000	<b>1960</b>
$10^2$	<b>etto</b>	<b>h</b>	100	<b>1960</b>
$10^1$	<b>deca</b>	<b>da</b>	10	<b>1960</b>
$10^{-1}$	<b>deci</b>	<b>d</b>	0.1	<b>1960</b>
$10^{-2}$	<b>centi</b>	<b>c</b>	0.01	<b>1960</b>
$10^{-3}$	<b>milli</b>	<b>m</b>	0.001	<b>1960</b>
$10^{-6}$	<b>micro</b>	<b>μ</b>	0.000 001	<b>1960</b>
$10^{-9}$	<b>nano</b>	<b>n</b>	0.000 000 001	<b>1960</b>
$10^{-12}$	<b>pico</b>	<b>p</b>	0.000 000 000 001	<b>1960</b>
$10^{-15}$	<b>femto</b>	<b>f</b>	0.000 000 000 000 001	<b>1964</b>
$10^{-18}$	<b>atto</b>	<b>a</b>	0.000 000 000 000 000 001	<b>1964</b>
$10^{-21}$	<b>zepto</b>	<b>z</b>	0.000 000 000 000 000 000 001	<b>1991</b>
$10^{-24}$	<b>yocto</b>	<b>y</b>	0.000 000 000 000 000 000 000 001	<b>1991</b>

In U.S. il prefisso **deca** è comunemente definito **deka**

In occasione della 11° Conférence Générale des Poids et Mésures (CGPM) del 1960, venne adottata la prima serie dei prefissi e simboli dei multipli e sottomultipli decimali delle unità del Sistema Internazionale.

I prefissi  $10^{-15}$  e  $10^{-18}$  sono stati inseriti nel 1964 dalla 12° CGPM.

I prefissi  $10^{15}$  e  $10^{18}$  nel 1975 dalla 15° CGPM.

I prefissi  $10^{21}$ ,  $10^{24}$ ,  $10^{-21}$  e  $10^{-24}$ , proposti nel 1990 dal CIPM, per essere poi approvati nel 1991 dalla 19° CGPM.

### Prefissi dei multipli sistema binario

fattore	nome	simbolo	origine	derivato SI
$2^{10}$	kibi	Ki	kilobinary: $2^{10}$	kilo: $10^3$
$2^{20}$	mebi	Mi	megabinary: $(2^{10})^2$	mega: $(10^3)^2$
$2^{30}$	gibi	Gi	gigabinary: $(2^{10})^3$	giga: $(10^3)^3$
$2^{40}$	tebi	Ti	terabinary: $(2^{10})^4$	tera: $(10^3)^4$
$2^{50}$	pebi	Pi	petabinary: $(2^{10})^5$	peta: $(10^3)^5$
$2^{60}$	exbi	Ei	exabinary: $(2^{10})^6$	exa: $(10^3)^6$

## Esempi e confronti con i prefissi del Sistema Internazionale

1 kibibit 1 Kibit =  $2^{10}$  bit = 1024 bit  
1 kilobit 1 kbit =  $10^3$  bit = 1000 bit  
1 mebibyte 1 MiB =  $2^{20}$  B = 1 048 576 B  
1 megabyte 1 MB =  $10^6$  B = 1 000 000 B  
1 gibibyte 1 GiB =  $2^{30}$  B = 1 073 741 824 B  
1 gigabyte 1 GB =  $10^9$  B = 1 000 000 000 B

I prefissi dei multipli binari sono stati adottati nel 1998 dalla **Commissione Elettrotecnica Internazionale** (IEC), per indicare i multipli espressi con la potenza del 2, a differenza dei multipli e sottomultipli del SI espressi con la potenza del 10. Vengono utilizzati principalmente nei settori della elaborazione e trasmissione dati.

### UN PO' DI STORIA

- 1790 Il governo francese avvia il primo tentativo di costruire un sistema di unità di misura.
- 1795 Il governo francese introduce per legge il **Sistema metrico decimale**.  
Prima definizione del **metro** come la frazione  $1/10^7$  dell'arco di meridiano terrestre dal polo all'equatore. La definizione verrà modificata nel 1799.
- 1799 Il campione naturale del **metro** ( $1/10^7$  dell'arco di meridiano terrestre dal polo all'equatore) viene sostituito da un campione artificiale costituito da una barra in platino (*metro legale di Fortin*). Il campione verrà sostituito nel 1889.  
Viene costruito il campione in platino del **chilogrammo**.
- 1832 Gauss promuove il Sistema Metrico, adottando per le misure di tempo il secondo definito astronomicamente.
- 1874 La British Association for the Advancement of Science (BAAS) introduce il **sistema c.g.s.**, un sistema coerente basato sulle tre unità meccaniche: centimetro, grammo, secondo.
- 1875 La **Convenzione del metro** viene firmata a Parigi dai rappresentanti di 17 stati.  
Viene istituito il **Bureau International des Poids et Mesures**.
- 1880 La British Association for the Advancement of Science (BAAS) introduce un insieme coerente di **unità pratiche** per l'elettromagnetismo, tra cui l'ohm, il volt e l'ampere.
- 1889 La 1a C.G.P.M. introduce i nuovi campioni in platino-iridio del metro e del chilogrammo. Insieme con il secondo, le tre unità della meccanica formano il **sistema M.K.S.**  
Il campione del metro verrà sostituito nel 1960.
- 1901 Giorgi mostra che è possibile combinare le 3 unità meccaniche del sistema M.K.S. con le unità pratiche dell'elettromagnetismo, formando un sistema coerente con 4 unità fondamentali: le tre meccaniche ed una elettromagnetica (**Sistema Giorgi**).
- 1948 La 9a C.G.P.M. definisce l' **ampere** con riferimento alla legge dell'azione elettrodinamica tra due conduttori paralleli.
- 1954 La 10a C.G.P.M. introduce il **kelvin** e la **candela**.
- 1960 Il campione artificiale del **metro** (barra in platino-iridio) viene sostituito da un campione naturale, il *metro ottico*, definito come un multiplo della lunghezza d'onda della luce emessa dall'isotopo 86 del kripton.  
Il campione verrà sostituito nel 1983.
- 1961 La 11a C.G.P.M. introduce il **Sistema Internazionale (S.I.)**
- 1967 La 13a C.G.P.M. definisce il **secondo** con riferimento alla frequenza della radiazione emessa dall'isotopo 133 del Cesio. Nasce l'orologio al Cesio.  
Viene anche ridefinito il **kelvin** come unità di misura della temperatura.
- 1971 La 14a C.G.P.M. definisce la **mole** come unità di misura della quantità di sostanza.
- 1979 La 16a C.G.P.M. ridefinisce la **candela** come unità di misura dell'intensità luminosa.
- 1983 La 17a C.G.P.M. ridefinisce il **metro** come la distanza percorsa dalla luce nel vuoto in un ben definito intervallo di tempo. La velocità della luce nel vuoto diviene una costante esatta.

### **Classificazione dei conduttori**

Si dice che un conduttore è attraversato da una corrente elettrica, quando al suo interno vi è una migrazione di particelle cariche. La dinamica delle particelle elettriche necessita di un campo di forze di natura elettrica.

### **Tipi di conduttori**

I materiali sono catalogati a seconda della maggiore o minore capacità di far passare "facilmente" elettroni al loro interno. Queste le principali categorie:

- conduttori metallici
- conduttori elettrolitici
- conduttori gassosi
- isolanti
- semiconduttori
- superconduttori

### **Conduttori metallici**

Appartengono a questa categoria tutti i metalli, come, ad esempio, rame (Cu), argento (Ag), Alluminio (Al). Sono ottimi conduttori sia di corrente che di calore e possiedono una struttura cristallina. Durante la formazione del cristallo, è fornita l'energia necessaria per liberare elettroni di valenza, uno o due per atomo. Tutti gli altri elettroni rimangono ancorati ai rispettivi nuclei, per formare complessivamente degli ioni, che oscillano attorno alla loro posizione di equilibrio con ampiezza crescente al crescere della temperatura.

Il modello elaborato per i conduttori metallici è detto ad "elettroni liberi". Ipotizza, appunto, elettroni di valenza non più legati ad un singolo atomo, ma condivisi in una nube elettronica. Il moto degli elettroni liberi può essere:

- disordinato, analogamente all'agitazione termica dei gas, quando il conduttore non è soggetto ad un campo elettrico.
- ordinato in direzione e verso, in sovrapposizione al moto disordinato, quando il conduttore è soggetto cioè all'azione dinamica di un campo di forze elettrico. Si ha così un passaggio di corrente elettrica da un capo all'altro del conduttore.

### **Conduttori elettrolitici**

Si identificano tipicamente nelle soluzioni acquose di acidi, basi o Sali. In una soluzione i legami elettrici che tengono uniti gli ioni sono indeboliti e parte delle molecole del soluto si separano in cationi (ioni positivi attirati dal catodo: elettrodo negativo) ed anioni (ioni negativi attirati dall'anodo: elettrodo positivo), dotati di energia cinetica, per agitazione termica. Sotto l'azione di un campo elettrico, il moto delle cariche, sia positive che negative, è ordinato, in sovrapposizione al moto disordinato di agitazione termica, ed è, quindi, causa di passaggio di corrente elettrica.

Esempi: soluzione acquosa di Cloruro di Sodio (Sale da cucina), soluzione acquosa di acido acetico (Aceto di Vino), soluzione acquosa di soda (idrossido di Sodio), soluzione acquosa di Acido Muratico (Acido Cloridrico diluito), soluzione acquosa di Acido solforico (contenuta nelle batterie al Piombo), soluzione acquosa di Ipcloclorito di Sodio (Candeggina).

### **Conduttori gassosi**

Gli aeriformi sono tendenzialmente isolanti, ma alcune molecole di gas, sotto particolari condizioni, possono perdere elettroni ed offrire conducibilità elettrica sia per moto di ioni negativi che positivi. Talvolta la conducibilità elettrica è notevole. Esempi di impiego sono i tubi al neon.

## Isolanti

Lo sono principalmente la maggior parte dei solidi ionici e covalenti. In un isolante non esistono elettroni di valenza liberi di muoversi e tali da evidenziare un flusso di cariche ordinate, sotto l'azione di un campo elettrico. Ovviamente, vale l'osservazione che qualunque sostanza può offrire elettroni di conduzione, se si dispone di sufficiente energia. In realtà non esistono isolanti perfetti, ma sostanze definite isolanti perché offrono una resistenza assai grande al passaggio di cariche elettriche.

## Semiconduttori

Le loro proprietà sono intermedie tra quelle dei conduttori e degli isolanti. Sono sostanze solide cristalline che offrono conducibilità crescente all'aumentare della temperatura. A temperatura ambiente manifestano proprietà di semiconduttori, ovvero, la conducibilità elettrica dipende da elettroni e "lacune" (con carica elettrica positiva). L'aggiunta di opportune impurità può esaltare la conduzione elettrica.

### La conduzione nei Conduttori, isolanti e semiconduttori

I materiali, a seconda della loro attitudine alla conduzione della corrente elettrica, possono essere suddivisi in tre categorie: *conduttori, semiconduttori e isolanti*.

Il diverso comportamento di un materiale al passaggio della corrente elettrica dipende dalla struttura atomica del materiale stesso. Secondo il modello di Bohr l'atomo è costituito da un nucleo, intorno al quale, disposti in diverse orbite circolari od ellittiche, ruotano gli elettroni, dotati di carica negativa  $-e$ . Il numero degli elettroni ruotanti è uguale a quello dei protoni, di carica positiva  $+e$ , contenuti nel nucleo quindi l'atomo, in condizioni normali, è elettricamente neutro.

Gli elettroni si distribuiscono nelle varie orbite (ciascuna delle quali è caratterizzata da un numero massimo di elettroni contenibili) a partire da quella più vicina al nucleo, in modo da completarle successivamente. Gli elettroni dell'orbita più esterna, normalmente incompleta, vengono detti di valenza. Sono questi elettroni che determinano le proprietà chimiche ed elettriche di un materiale vengono chiamati di valenza in quanto sono quelli che definiscono i legami fra gli atomi di una molecola. All'interno del materiale si distinguono principalmente due bande o livelli energetici intendendo con questo termine l'insieme delle orbite i cui elettroni posseggono una certa energia, la "banda di valenza" e la banda di conduzione".

Alla banda di valenza appartengono gli elettroni che abbiamo chiamato di valenza quella di conduzione quegli elettroni che posseggono una energia tale da sfuggire all'attrazione del nucleo e che quindi, diventano liberi di muoversi all'interno del materiale. Tra queste due bande esiste una certa differenza di energia, ossia un corto numero di livelli energetici, che gli elettroni dell'atomo non possono possedere; a questa zona viene dato il nome di banda interdotta o anche di Gap energetico.

Isolante		Gap [eV]	Semiconduttore		Gap [eV]
Diamante	<b>C</b>	5,33	Silicio	<b>Si</b>	1,14
Ossido di Zinco	<b>ZnO</b>	3,2	Germanio	<b>Ge</b>	0,67
Cloruro di Argento	<b>AgCl<sub>2</sub></b>	3,2	Tellurio	<b>Te</b>	0,33
Solfuro di Cadmio	<b>CdS</b>	2,42	Arseniuro di Gallio	<b>GaAs</b>	1,43
Solfuro di Zinco	<b>ZnS<sub>2</sub></b>	3,6			

Somministrando energia al materiale è possibile far passare gli elettroni dalla banda di valenza a quella di conduzione: ciò vuol dire che gli elettroni della banda di valenza, in queste condizioni vengono a possedere un'energia tale da superare la banda interdotta per portarsi in quella di conduzione. L'energia necessaria per far avvenire questo passaggio di elettroni da una banda all'altra può essere di tipo termico, elettrico o luminoso.

Com'è noto la corrente elettrica non altro che un moto ordinato di elettroni all'interno del materiale, risulta, quindi chiaro che l'entità di questa corrente, dipenderà, dal numero di elettroni contenuti nella banda di conduzione.

### **Conducibilità nei conduttori**

Si chiamano conduttori quei materiali che permettono il passaggio della corrente elettrica; alla luce di quanto abbiamo finora visto saranno allora conduttori quei materiali nei quali una piccola quantità di energia permette di portare la maggior parte degli elettroni di valenza nella banda di conduzione; nei conduttori tale energia è fornita dall'agitazione termica degli atomi a temperatura ambiente, in queste condizioni possiamo allora dire che, nei conduttori, banda di valenza e banda di conduzione sono praticamente sovrapposte ossia il gap tra le due bande è nullo.

Sono materiali conduttori i metalli quali l'Argento (Ag), l'Oro (Au), il Rame (Cu), il Ferro (Fe), l'Alluminio (Al) ecc. ecc. ; la migliore conducibilità è offerta dall'Argento, seguono il Rame, l'Alluminio, l'Oro.

A temperatura ambiente gli elettroni di valenza sono praticamente tutti liberi di muoversi all'interno della struttura atomica del metallo; il moto è disordinato e casuale in quanto non essendo presente alcun campo elettrico, non può dare luogo a corrente.

Sovente nei testi specializzati si sente parlare di "gas elettronico" per dare un'idea del grado di libertà di movimento degli elettroni di valenza all'interno del reticolo cristallino del metallo.

E' sufficiente applicare un piccolo campo elettrico per orientare in una determinata direzione il moto, altrimenti disordinato, di tutti gli elettroni liberi presenti; l'intensità di corrente prodotta dal movimento degli elettroni liberi è notevole e la resistenza elettrica  $R$  di questi materiali è di conseguenza molto bassa.

Al crescere della temperatura nei metalli solitamente si riscontra un aumento della resistenza elettrica  $R$ ; si dice che un metallo è un PTC (Positive Temperature Coefficient - materiale con coefficiente di temperatura positivo). Il fenomeno si spiega ricordando che l'aumento di temperatura provoca un aumento della vibrazione degli atomi che costituiscono la struttura cristallina di un metallo; aumenta la probabilità di collisione fra elettroni liberi e atomi della struttura cristallina con conseguente riduzione della carica elettrica media trasportata dagli elettroni e conseguente aumento della resistenza elettrica del materiale.

### **Conducibilità negli isolanti**

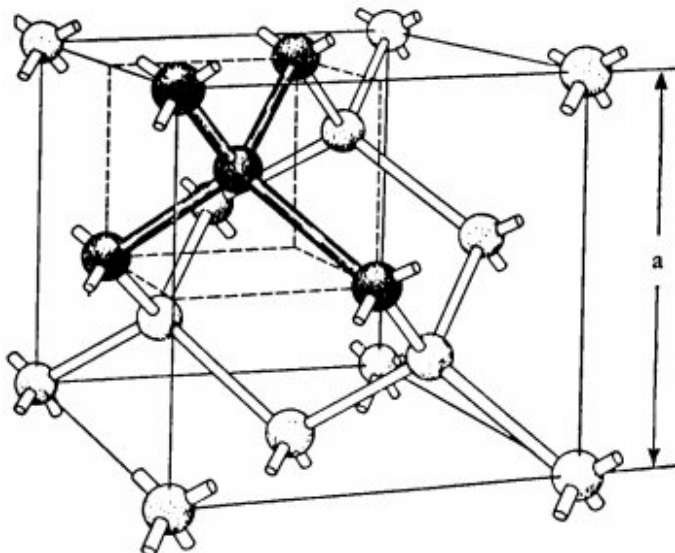
Analogamente sappiamo che si chiamano isolanti quei materiali che non permettono il passaggio della corrente elettrica. Agli isolanti appartengono allora quei materiali nei quali è necessaria una notevole energia per far passare gli elettroni dalla banda di valenza a quella di conduzione, ossia quelli in cui il gap esistente tra le due bande è molto grande. E' allora impossibile in condizioni normali, far passare elettroni dalla banda di valenza a quella di conduzione; in questo caso la banda di conduzione risulta vuota e quindi non vi può essere passaggio di corrente all'interno del materiale.

Sono materiali isolanti le sostanze quali la Gomma, la Bachelite, la Ceramica, il Vetro, il Legno (secco), la Carta, l'Olio, le Materie Plastiche in genere, l'Acqua distillata e l'Aria secca.

Per far sì che un materiale isolante conduca è necessario vincere la "rigidità dielettrica" del materiale (massima intensità di campo elettrico applicabile) vale a dire si deve letteralmente "strappare" gli elettroni di valenza dai propri atomi vincendo le forze di attrazione atomiche. Quando ciò avviene il materiale isolante solitamente si distrugge; sono esempi di questo fenomeno la carbonizzazione prodotta sulle materie plastiche da una violenta scarica elettrica; la distruzione degli isolatori ceramici o di vetro dei tralicci dell'alta tensione provocata da un fulmine (campo elettrico elevatissimo).

### Conducibilità nei semiconduttori

Un materiale che presenta proprietà intermedie a quelle degli isolanti e dei conduttori viene detto semiconduttore. In questi materiali si ha il passaggio di una debole corrente elettrica anche a temperatura ambiente, ciò vuol dire che un certo numero di elettroni di valenza può passare dalla banda di valenza alla Banda di conduzione; il gap esistente tra le due bande non è quindi molto grande. A questa categoria appartengono materiali di tipo cristallino aventi quattro elettroni nell'orbita di valenza (vedi figura). Per le loro particolari proprietà tali sostanze vengono utilizzate per la costruzione di dispositivi a semiconduttore come diodi e transistor. Le principali di tali sostanze sono il Germanio ed il Silicio.



**Fig. 1** Reticolo cristallino di un semiconduttore

### Superconduttività

La **superconduttività** o **superconduzione** è stata scoperta per la prima volta da H. K. Onnes, nel 1911, il quale notò che alcuni metalli assumevano resistenza nulla al passaggio di corrente elettrica, al di sotto di una certa temperatura. La teoria generalmente accettata come spiegazione di tale fenomeno, nota come teoria BCS, dalle iniziali delle tre persone che hanno proposto questa teoria (Bardeen, Cooper, Schrieffer), spiega il fenomeno come dovuto alle interazioni degli elettroni col reticolo cristallino,.

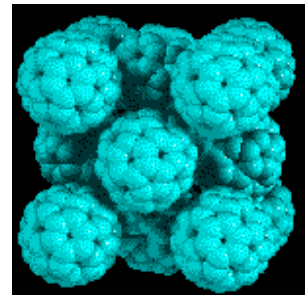
## I superconduttori si scaldano

di Philip Ball © Nature

Quando nel 1965 fu scoperta la molecola di carbonio a 60 atomi, nota come "buckminsterfullerene" o C60, un membro della Camera dei Lord del parlamento inglese fece un commento rimasto famoso: «My Lords, possiamo dire che non fa niente di particolare, e lo fa egregiamente?». Il Lord potrebbe doversi rimangiare la parola, grazie a una ricerca pubblicata su Nature. C'è una cosa che C60 sa fare, eccezionalmente bene, ed è la superconduttività, dichiarano Bertram Batlogg e i suoi colleghi dei Bell Laboratories del New Jersey.

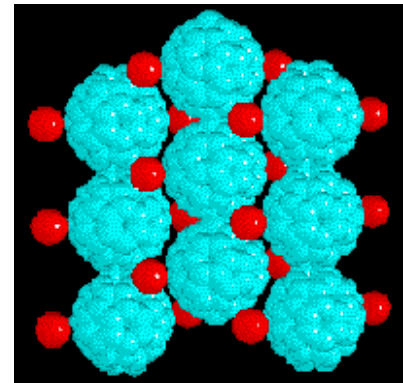
Grazie al C60, l'équipe ha frantumato il record della temperatura più elevata per la superconduttività nei materiali organici (a base di carbonio). E hanno dimostrato come le *buckyballs*, come sono confidenzialmente chiamate queste palle di carbonio, potrebbero surriscaldare ulteriormente la ricerca, suscitando speranze per la trasmissione di energia senza dispersione a temperature realistiche.

I superconduttori conducono elettricità senza opporre resistenza, e quindi senza dispersione di energia. Un anello superconduttore potrebbe, in linea di principio, trasportare in eterno una corrente che circolasse al suo interno. Ma le applicazioni pratiche sono state frenate dal fatto che i metalli devono essere raffreddati fino ad arrivare a pochi gradi dallo zero assoluto (meno 273 gradi centigradi) prima di poter diventare superconduttori. La scoperta, nel 1986, di materiali in "ceramica" contenenti rame e ossigeno, in grado di trasformarsi in superconduttori a temperature molto più elevate, aveva pertanto suscitato l'entusiasmo degli studiosi di tutto il mondo. Alcuni di questi superconduttori a ossido di rame, che funzionano a una temperatura superiore ai meno 196 gradi sono ancora oggetto di studio per le applicazioni energetiche. Meno 196 gradi è infatti la temperatura dell'azoto liquido, il che rende più economico il processo di raffreddamento.



Per parecchio tempo non vi furono altri superconduttori "ad alta temperatura" in grado di reggere il confronto. Il C60 ha cambiato le cose. Nel 1990, alcuni scienziati trovarono il modo di produrre queste molecole di carbonio a forma sferica in grandi quantità, il che stimolò una vasta gamma di esperimenti. Ci volle meno di un anno per scoprire che il C60 allo stato solido può diventare un superconduttore se viene "drogato" con il potassio.

La superconduttività apparve ad appena meno 255 gradi. Ben presto si scoprirono altri solidi di C60 "drogati", che portarono la temperatura di passaggio alla superconduttività a meno 240 gradi, dove però si bloccò. Adesso, Batlogg e i suoi colleghi hanno migliorato il risultato di quasi venti gradi. E la cosa più sorprendente, è che il risultato è stato ottenuto utilizzando il C60 puro. Il segreto, è l'uso del giusto tipo di corrente. Il C60 integrato con il potassio o con metalli simili diventa conduttore - e superconduttore - perché i metalli rilasciano elettroni "liberi", che trasportano la corrente. La conduttività elettrica può essere indotta anche rimuovendo gli elettroni. Questo procedimento lascia dei "buchi" o lacune che agiscono un po' come gli elettroni, ma con una carica elettrica positiva che scorre nella direzione opposta.



Batlogg e i suoi colleghi hanno iniettato le lacune direttamente nel C60 solido da transistor poggiati sopra ai cristalli di C60. La temperatura di passaggio alla superconduttività diventava più elevata - meno 221 gradi circa - quando aggiungevano circa tre lacune per ciascuna molecola di C60. (I ricercatori potevano stabilire se la corrente che passava dai transistor al C60 veniva trasportata dagli elettroni o dalle lacune, e in quale misura). E potrebbe non finire qui. I materiali di C60 con aggiunta di metalli diventano superconduttori ancora "più caldi" quando gli atomi aggiunti allontanano ulteriormente le molecole di C60. Se lo stesso meccanismo funziona per il C60 addizionato di lacune allora una "espansione" dei cristalli con qualche elemento additivo inerte potrebbe spingere la temperatura di trasformazione ben al di sopra di quella dell'azoto liquido.

### Corrente elettrica

In un conduttore metallico la corrente è dovuta al moto degli elettroni. Se il conduttore è isolato, gli elettroni si muovono in tutte le direzioni di moto caotico dovuto all'eccitazione termica. Se invece colleghiamo un generatore al filo conduttore, gli elettroni si muoveranno in media tutti nella stessa direzione. In effetti il generatore presenta un polo negativo dove esiste un eccesso di elettroni e un polo positivo dove abbiamo una carenza di elettroni; questa condizione è dovuta a processi interni nel generatore, tuttavia se i poli del generatore sono collegati ad un filo conduttore gli elettroni tenderanno a muoversi all'esterno del generatore dalla zona con eccesso di elettroni verso la zona a mancanza di elettroni e cioè dal polo negativo a quello positivo. Associato al moto degli elettroni abbiamo un trasporto di **carica**.

La rapidità con cui fluisce la carica elettrica in un filo conduttore esprime l' **intensità di corrente**.

### **Carica elettrica elementare**

La carica elettrica è una proprietà naturale della materia. Alla scala atomica o a quella nucleare la più piccola quantità di carica o **carica elettrica elementare** è posseduta dall'elettrone (si indica con  $e$ ) come fu dimostrato sperimentalmente da Millikan nel 1912 nel suo celebre esperimento.

Tutte le cariche esistenti in natura sono multiple di  $e$ , ovvero:

$$Q = N \cdot e$$

dove  $N$  è un numero intero.

In altre parole la carica  $e$  non può assumere un qualsiasi valore arbitrario  $Q$  ma solo valori discreti, in questo modo si parla di quanto di carica.

Il valore della carica elementare è stato misurato, a partire da Millikan, varie volte nel corso degli anni sempre con maggiore precisione e vale attualmente:

$$e = 1,6021892 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

come si vede si tratta di un valore molto piccolo.

A titolo di esempio si sappia che, attraverso il filamento incandescente di una comune lampadina passa ogni secondo un numero di elettroni dell'ordine di  $10^{18}$  !

### **Intensità di corrente**

L'intensità di corrente  $I$  è definibile come la quantità di carica elettrica  $Q$  che attraversa una sezione di un conduttore nell'unità di tempo.

$$I = \frac{Q}{t}$$

$Q$  = quantità di carica elettrica misurata in C (Coulomb)

$t$  = tempo misurato in sec.

$I$  = intensità di corrente misurata in A (Ampère)

*L'intensità di corrente è una grandezza scalare (non vettoriale), l'unità di misura è l'ampere (A) e si misura con l'amperometro. Multipli e sottomultipli più usati sono il kA (migliaia di A) il mA (millesimi di A),  $\mu\text{A}$  (millesimesimi di A) ed infine il nA (miliardesimi di A).*

*Nel 1820 Ampère osservò sperimentalmente che due circuiti percorsi da corrente elettrica esercitano tra loro forze attrattive o repulsive: **attrattive** quando le due correnti hanno lo stesso verso, **repulsive** quando le correnti hanno verso opposto.*

**Un ampere è l'intensità di una corrente elettrica, che, scorrendo in due conduttori rettilinei paralleli posti ad una distanza di 1 m, provoca una forza di  $2 \cdot 10^{-7}$  N (Newton: unità di misura della Forza nel SI) per metro di conduttore.**

### **Unità di misura pratica della carica elettrica**

In campo automobilistico ma non solo, i produttori di accumulatori o batterie o pile (ricaricabili oppure no) adotta una unità di misura diversa dal Coulomb; preferisce utilizzare l'ampère-ora (Ah). Infatti se mi ricavo  $Q$  ottengo:

$$Q = I \cdot t$$

Se esprimo  $I$  in A e  $t$  in sec. ottengo  $Q$  espressa in Ampere x sec ossia in Coulomb ma se la  $I$  la misuro in Ampère ed il tempo in ore  $Q$  risulta espressa in Ah (Ampère ora).

Esempi :

- a) pila AA (cilindrica 50 mm x 13 diam.) da 1,2V
- b) pila AAA (cilindrica 45 mm x 9 diam.) da 1,2V
- c) accumulatore auto 12V (Fiat Punto)

- Q = 2000 mAh oppure 2Ah
- Q = 750 mAh oppure 0,75 Ah
- Q = 50 Ah

### **Pile e Batterie: i generatori**

Tutti noi ci siamo serviti almeno qualche volta delle pile, le comuni pile dette anche, impropriamente, batterie; le abbiamo usate magari per far funzionare la radiolina o il walkman.



**Quattro tipi di pile, tutte con la stessa tensione di 1,5V; da sinistra a destra: ministilo, stilo, mezza torcia, torcia.**



**Batteria da 12V per auto; questa nella foto ha una capacità di 60 Ah**

Quelle cilindriche, per esempio, esistono in vari formati (ministilo, stilo, mezzatorcia, torcia), ma forniscono tutte la stessa tensione: 1,5 volt. Che differenza c'è allora tra una pila e l'altra? La risposta più intuitiva è: la quantità di energia che essa contiene. Se ad una di queste pile colleghiamo una piccola lampadina da torcia elettrica, adatta a funzionare a 1,5 volt, la lampadina si accenderà nello stesso identico modo con ciascuna pila; vedremo, però, che con una pila grande la lampadina rimarrà accesa più a lungo. Tale durata, che è tanto maggiore quanto più grande è la pila, è determinata da quella che viene definita "capacità" della pila. La capacità è una grandezza che tiene conto sia della corrente erogata, sia del tempo per cui la pila riesce ad erogare tale corrente; per questo motivo, la capacità si calcola moltiplicando la corrente per le ore, e si misura in Ah (cioè: ampere-ora). Per fare un esempio, con la stessa pila possiamo far accendere per due ore una lampadina che assorbe una corrente di 0,5 A, oppure per quattro ore una lampadina che assorbe 0,25 A (cioè metà corrente della precedente); se calcoliamo la capacità, abbiamo nel primo caso:  $0,5 \times 2 = 1$  Ah e nel secondo caso:  $0,25 \times 4 = 1$  Ah. La capacità è in ogni caso di 1Ah. Occorre comunque precisare che, a parte ciò che si è detto sulla diversa capacità, le dimensioni della pila determinano anche la massima corrente che questa può fornire: proprio a causa delle diverse caratteristiche costruttive, una pila piccola non potrà mai fornire la corrente che è in grado di erogare una pila grande, nemmeno per un istante brevissimo.

Quanto si è detto fino ad ora, vale per quegli altri generatori di energia elettrica, come gli accumulatori o le batterie che troviamo nelle nostre auto o nei telefonini cellulari. A differenza delle pile, questi sono ricaricabili, sono cioè in grado di incamerare nuovamente l'energia che hanno fornito e possono quindi essere usati per parecchio tempo. Una batteria per auto, come molti sapranno, ha una tensione caratteristica di 12 volt, mentre la capacità può variare da circa 35 Ah a 70 od 80 Ah o più. Quella raffigurata a lato ha una capacità di 60 Ah: può fornire, ad esempio, 1 A per 60 ore, oppure 5 A per 12 ore, o ancora 10 A per 6 ore. Più alta è la capacità della batteria e più forte è la corrente che essa può fornire: in certi istanti, per esempio all'avviamento del motore, la batteria eroga, sia pure per tempi brevissimi, una corrente detta di spunto che può arrivare ad alcune centinaia di ampere: è chiaro quindi che una batteria di maggiore capacità facilita l'avviamento del motore anche in condizioni sfavorevoli.

Ma esiste una grande differenza fra la tensione di una batteria (o pila o accumulatore) e quella che noi troviamo nelle prese di casa nostra.

Non parlo del diverso valore, e cioè dei 220 volt di casa o dei 12 volt della

batteria dell'auto, ma di una proprietà caratteristica che comporta tutta una serie di vantaggi e svantaggi, che cercheremo di analizzare per sommi capi. Tornando alla nostra pila, la comune pila a stilo per esempio, osserviamo che essa viene utilizzata tramite due contatti metallici, che si trovano sulle due estremità opposte. Da un lato troviamo un bottoncino metallico largo pochi millimetri che sporge al centro di una superficie di plastica; in genere in sua corrispondenza è disegnato un "+". Dall'altra parte troviamo il fondo della pila, completamente in metallo, che è quello che in genere viene a contatto con una molla, quando la pila viene inserita nell'apparecchiatura ove deve funzionare. I due punti di contatto che abbiamo visto vengono chiamati "poli". Per la precisione uno, quello dove c'è il bottoncino piccolo contrassegnato col "+", viene detto polo positivo; l'altro, il fondo metallico della pila, è il polo negativo. La corrente fornita da una pila (o da una batteria o accumulatore che dir si voglia) esce sempre dal polo positivo, attraversa l'utilizzatore (per esempio la lampadina) e rientra dal polo negativo. Finché la pila è carica ed eroga corrente, questa fluisce sempre nella stessa direzione e con un valore praticamente costante: una corrente con tali caratteristiche viene definita "corrente continua".

Esercizi :

- 1) Calcolare a quanti Coulomb equivale 1 Ah.
- 2) Calcolare il tempo necessario per caricare completamente un accumulatore 12V 30Ah (completamente scarico) utilizzando un caricabatteria (assimilabile ad un generatore di corrente) che eroga una corrente di 2A.
- 3) La pila che alimenta un orologio digitale da polso ha una durata minima garantita di 3 anni. Calcolare la Quantità di carica presente nella pila sapendo che la max. corrente assorbita dall'orologio è pari a 0,2 uA.
- 4) Una lampada 12V 60W rimane accesa per un tempo pari a 15 minuti. Quanti elettroni passano attraverso la lampada nei 15 minuti in cui rimane accesa ?

### **Tensione o differenza di potenziale**

Perché ci sia corrente elettrica, deve esistere un campo di forze, ovvero una differenza di potenziale agli estremi del conduttore sede di corrente.

### **Sorgente di tensione**

Un generatore di tensione (sorgente di tensione) si caratterizza con il valore della sua f.e.m. (forza elettro motrice) che si misura in V (Volt).

La f.e.m. E di un generatore rappresenta il rapporto fra il lavoro compiuto dalle forze di natura elettrica che si manifestano nel generatore e la carica Q che il generatore trasporta.

$$E = \frac{L}{Q} = \frac{\text{Lavoro}}{\text{Carica}}$$

Unità di misura per la f.e.m. è il Volt (V) (nome della unità di misura fu scelto per onorare lo scienziato italiano che scoprì le origini della corrente elettrica: Alessandro Volta).

Esempi di generatori di tensione sono: la pila, la dinamo di una bicicletta, ecc. Ogni generatore ha due morsetti: il polo positivo, con potenziale elettrico più elevato, ed il polo negativo con potenziale elettrico più basso.



Nei circuiti elettrici i generatori vengono rappresentati con uno dei due simboli sopra riportati; il simbolo di destra è riferito sempre ad un generatore di f.e.m. continua come una pila o una batteria.

Al **polo negativo** esiste un eccesso di elettroni, al **polo positivo** una mancanza di elettroni. Se si connettono i poli del generatore con un conduttore metallico, sono gli elettroni che scorrono *all'esterno* del generatore di tensione dalla zona con eccesso a quella con mancanza di elettroni, ossia dal polo negativo al positivo. Il passaggio di elettroni tende a livellare la differenza di potenziale (ddp) esistente tra i due poli. La differenza di potenziale iniziale è prodotta e mantenuta attraverso processi interni nel generatore di tensione. Nelle pile e nelle batterie sono processi legati a forze di natura chimica, mentre nelle dinamo sono forze di natura magnetica.

### **Osservazione:**

**Prima di conoscere il reale moto delle cariche in un conduttore, era stata già stabilita una direzione convenzionale della corrente elettrica: per convenzione la corrente scorre dal polo positivo a quello negativo ed è dovuta ad una migrazione di cariche positive.**

### Esempio di Tensioni

Accumulatore in acciaio (NiFe) per ciascuna cella	1.2V
Accumulatore al piombo per ciascuna cella	2 V
Batteria dell'automobile	12V
Rete per usi civili:	220V
Rete per usi industriali:	380V
Tram	550V
Locomotore elettrico	fino a 15kV
Linee di alta tensione	fino a 380kV

### Analogia con un circuito idraulico

Per comprendere meglio il concetto di forza elettromotrice si può ricorrere ad una analogia con la pompa di un circuito idraulico.

Supponiamo di avere due depositi di acqua A e B, con B posto ad una quota superiore ad A.

Per portare acqua da A a B, bisogna fornire la necessaria energia (pressione). Nel circuito idraulico è la pompa che apporta tale energia, mentre nel circuito elettrico è la forza elettromotrice.

Tanto maggiore è la differenza di quota fra i due serbatoi, tanto maggiore è l'energia che deve fornire la pompa; analogamente tanto maggiore è la differenza di potenziale fra i poli del generatore, tanto maggiore è la forza elettromotrice.

### Caduta di tensione

Con l'espressione "Caduta di tensione" o "Caduta di potenziale" si indica la differenza di potenziale fra due qualsiasi punti di un conduttore attraverso il quale scorre una corrente. Essa è sempre più piccola della tensione del generatore, che invece rappresenta la differenza di tensione massima che si può avere ai capi del conduttore. Ciò significa che al suo interno si trovano punti a potenziali diversi. Se così non fosse, il conduttore sarebbe in equilibrio e non vi sarebbe un flusso significativo di cariche. La somma di tutte le differenze di potenziale consecutive all'interno di un conduttore è uguale alla differenza di potenziale ai capi del conduttore.

Con il termine **tensione**  $V$  fra due punti di un conduttore si definisce il rapporto del lavoro compiuto per unità di tempo nel trasporto (in questo tratto di conduttore) della corrente che passa attraverso il conduttore stesso.

$$V = \frac{L}{Q} = \frac{L \cdot \Delta t}{Q \cdot \Delta t} = \frac{P}{I} \quad \text{P in Watt} \quad \text{I in Ampere} \quad \text{Q in Coulomb}$$

Unità SI della tensione  $V$

$$V \text{ in volt} \quad 1V = \frac{1 \cdot W}{1 \cdot A}$$

1 *volt* è la differenza di potenziale elettrico fra due punti di un conduttore metallico, nel quale, per far scorrere una corrente costante di 1 A fra i punti dati, si deve dissipare la potenza di 1 *watt*.

### Legge di Ohm: Resistenza elettrica

La resistenza elettrica può essere definita come l'ostacolo che incontra la corrente che percorre un determinato conduttore. Con il termine resistenza  $R$  si intende il rapporto fra la tensione fra gli estremi di un conduttore e l'intensità della corrente nel conduttore.

$$R = \frac{V}{I}$$

La tensione si misura in Volt, l'intensità di corrente in Ampère, la Resistenza elettrica si misura in Ohm ( $\Omega$ ); perciò si dice che un conduttore presenta la resistenza di 1 Ohm se applicando la ddp pari ad 1V si ha la circolazione di una corrente di 1A .

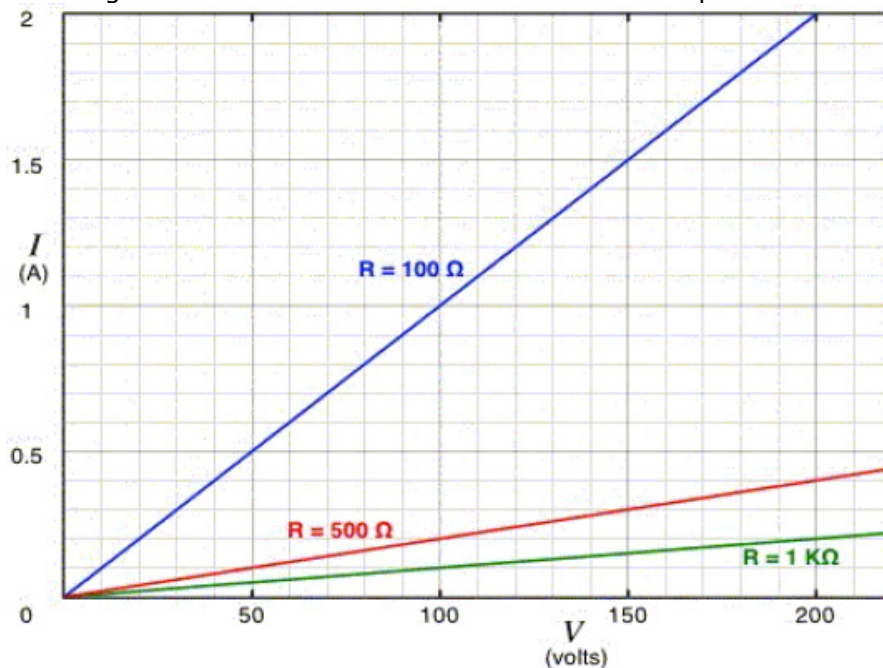
$V$  la differenza di potenziale nel circuito agli estremi della resistenza,  $I$  l'intensità di corrente, si ha la legge di Ohm (a temperatura  $T$  costante):

$$R = \frac{V}{I} \qquad V = R \cdot I \qquad I = \frac{V}{R}$$

### Legge di Ohm

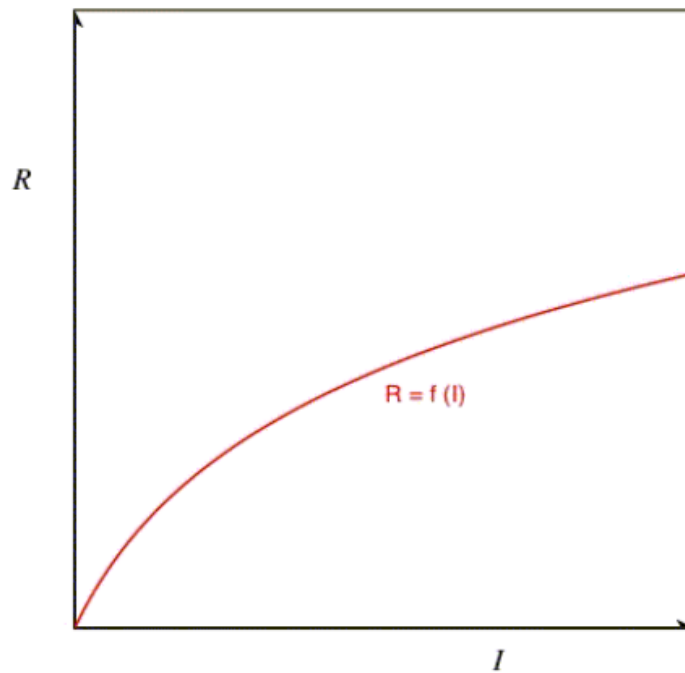
**In un conduttore metallico (che segue la legge di Ohm) l'intensità di corrente è direttamente proporzionale alla tensione applicata ai suoi capi (a temperatura  $T$  costante) e inversamente proporzionale alla resistenza del conduttore.**

Possiamo costruire un grafico mettendo in relazione la differenza di potenziale  $V$  con la corrente  $I$ :



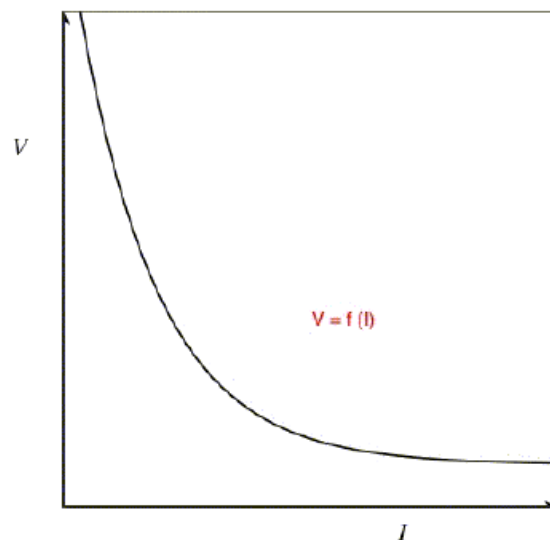
Per i materiali che seguono la legge di Ohm (conduttori ohmici) esiste una relazione lineare fra  $V$  ed  $I$ , la Resistenza non dipende dalla corrente  $I$

Per i materiali non-ohmici  $R=V/I$  non è costante ma dipende dalla corrente  $I$ ; infatti il grafico  $R=f(I)$  non ha un andamento lineare.



*Attenzione:*

- La legge di Ohm vale sia per un intero circuito metallico che per un pezzo di conduttore metallico.
- La relazione funzionale (il grafico) fra corrente e tensione è data da una retta passante per l'origine solo nel caso in cui la resistenza sia costante. Però la resistenza di un materiale dipende generalmente dalla temperatura, in particolare per un metallo essa aumenta al crescere della temperatura (vedi Resistenza e temperatura)
- Nei tubi di scarica a gas abbiamo  $V = f(I)$ . In questo caso la dipendenza della tensione dalla corrente è decrescente, cioè la tensione cala quando l'intensità della corrente aumenta



### Seconda legge di Ohm

La resistenza  $R$  di un conduttore (di forma cilindrica) dipende dalle sue dimensioni fisiche: dalla lunghezza  $l$  e dalla sezione  $S$ ; inoltre dipende dal tipo di materiale impiegato.

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

$R$  – resistenza elettrica del conduttore in  $\Omega$

$\rho$  – resistenza specifica o resistività del materiale

$l$  – lunghezza del conduttore in m

$S$  – area della sezione del conduttore in  $m^2$

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

Da un punto di vista dimensionale risulta  $[\rho] = \Omega \cdot m$  ma spesso i tecnici preferiscono esprimere

la sezione del conduttore in  $mm^2$  per cui  $[\rho] = \Omega \cdot \frac{mm^2}{m}$

Osservazioni:

- 1) La resistività di un conduttore è la resistenza che un suo campione di lunghezza e sezione unitaria offre al passaggio della corrente.
- 2) L'inverso della resistività prende il nome di conducibilità.
- 3) Attenzione: come la resistenza anche la resistività dipende dalla temperatura

$$\rho_T = \rho_0 \cdot (1 + \alpha_0 \cdot T)$$

La tabella sottostante riporta la resistività elettrica ed il coefficiente di temperatura di alcuni materiali riferiti alla temperatura di  $0$  [ $^{\circ}C$ ]

Temperatura di riferimento $0$ [ $^{\circ}C$ ]			
	Materiale	Resistività elettrica $\rho_0$ [ $\Omega \cdot mm^2/m$ ]	Coefficiente di temperatura $\alpha_0$ [ $1/^{\circ}C$ ]
Buoni conduttori	Argento	<b>0,015</b>	<b><math>4 \cdot 10^{-3}</math></b>
	Rame	<b>0,016</b>	<b><math>4,2 \cdot 10^{-3}</math></b>
	Oro	<b>0,021</b>	<b><math>3,9 \cdot 10^{-3}</math></b>
	Alluminio	<b>0,026</b>	<b><math>4,3 \cdot 10^{-3}</math></b>
Conduttori	Tungsteno (Wolframio)	<b>0,05</b>	<b><math>4,5 \cdot 10^{-3}</math></b>
	Stagno	<b>0,115</b>	<b><math>4,3 \cdot 10^{-3}</math></b>
	Ferro dolce	<b>0,13</b>	<b><math>4,8 \cdot 10^{-3}</math></b>
	Piombo	<b>0,2</b>	<b><math>4,2 \cdot 10^{-3}</math></b>
	Manganina (Cu, Mn, Ni)	<b>0,4</b>	<b><math>0,01 \cdot 10^{-3}</math></b>
	Costantana (Cu, Ni)	<b>0,5</b>	<b><math>\sim 0</math></b>
	Ferro-Nichel	<b>0,85</b>	<b><math>0,6 \cdot 10^{-3}</math></b>
	Mercurio	<b>0,951</b>	<b><math>0,9 \cdot 10^{-3}</math></b>

Semiconduttori	Carbone	<b>30</b>	<b>negativo</b>
	Germanio purissimo	<b><math>5 \cdot 10^5</math></b>	<b>negativo</b>
	Silicio purissimo	<b><math>25 \cdot 10^8</math></b>	<b>negativo</b>
Isolanti	Olio minerale	$\sim 1 \cdot 10^{17}$	
	Porcellana	$\sim 1 \cdot 10^{18}$	
	Mica	$\sim 1 \cdot 10^{20}$	
	Polistirolo	$\sim 1 \cdot 10^{22}$	

Per calcolare la resistività ed il coefficiente di temperatura ad una temperatura **T** [°C] diversa da **0** [°C], si possono utilizzare le seguenti espressioni:

$$\rho_T = \rho_0 \cdot (1 + \alpha_0 \cdot T) \quad \alpha_T = \frac{\alpha_0}{(1 + \alpha_0 \cdot T)}$$

### **Resistenza e temperatura**

La resistività di conduttori, isolanti e semiconduttori dipende dalla temperatura.

La resistività di un *conduttore metallico* è piccola e generalmente cresce linearmente con la temperatura; in questo caso si parla di PTC (Positive Temperature Coefficient) o di materiali a coefficiente di temperatura positivo.

La resistività, spesso nelle tabelle è riportata a 0 °C , e di conseguenza la resistenza, può essere quindi calcolata ad altre temperature; nel caso dei metalli con queste semplici espressioni.

$$R_T = R_0 \cdot (1 + \alpha_0 \cdot T)$$

La grande resistività dei *semiconduttori* decresce qualora si aumenti la temperatura; in questo caso si parla di NTC (Negative Temperature Coefficient) o di materiali a coefficiente di temperatura negativo.

Anche negli *isolanti* la fortissima resistività decresce con l'aumentare della temperatura.

In alcuni metalli (per esempio il mercurio) la resistività decresce fortemente in vicinanza dello zero assoluto, saltando ad un valore approssimativamente nullo *fenomeno della superconduttività* (Kamerlingh Onnès, 1911). Più recentemente (1985) questo fenomeno è stato osservato anche con alcune ceramiche a temperature più elevate, fino a 170 K.

La costantana (60% Cu, 40% Ni) e la manganina (86% Cu, 2% Ni, 12% Mg) sono leghe resistive, la cui resistività dipende poco dalla temperatura.

Esercizi :

- 1) Calcolare la resistenza di una matassa di filo di rame lunga 300 m e sezione 0,5 mm<sup>2</sup> a 25°.
- 2) Sostituendo una matassa di rame con una di Alluminio: stessa lunghezza ma sez. 1 mm<sup>2</sup> calcolare il nuovo valore di Resistenza a -25°C.
- 3) Tracciare i grafici in cui si riportano i valori di una Resistenza in funzione della lunghezza del conduttore (a T cost.) e in funzione della sezione S.

### Resistori commerciali: il Codice dei Colori

Il valore ohmico dei resistori commerciali viene rappresentato sul corpo del resistore attraverso un codice dei colori. La codifica di resistori con tolleranza di fabbricazione compresa fra 5% e il 20% viene effettuata attraverso quattro fasce colorate depositate sul corpo del resistore come rappresentato in fig. 6.



- I fascia 1° valore numerico
- II fascia 2° valore numerico
- III fascia moltiplicatore (numero zeri)
- IV fascia tolleranza %

fig. 6

Le fasce vengono progressivamente numerate I<sup>^</sup>, II<sup>^</sup>, III<sup>^</sup> e IV<sup>^</sup> partendo dalla fascia più prossima ad un reoforo (terminale elettricamente ad un circuito stampato).

La I<sup>^</sup> e la II<sup>^</sup> fascia determinano le prime due cifre del numero che esprime in ohm il valore nominale del resistore. La 3<sup>^</sup> fascia esprime il numero di zeri da aggiungere alle due cifre e la IV<sup>^</sup> fascia indica la tolleranza % . La corrispondenza fra colore e valore numerico è espressa dalla tabella a fianco riportata.

Colore	Valore	Moltiplicatore
NERO	0	
MARRONE	1	10
ROSSO	2	100
ARANCIO	3	1000
GIALLO	4	10000
VERDE	5	100000
AZZURRO	6	1000000
VIOLETTO	7	10000000
GRIGIO	8	100000000
BIANCO	9	1000000000
ROSSO	2%	
ORO	5%	
ARGENTO	10%	
(inesistente)	20%	

Esempi:

Codificare il valore 56K = 56000 10% : Verde - Azzurro - Arancio - Argento  
 Codificare il valore 6,8M 5% : Azzurro - Grigio - Azzurro - Oro

Decodificare la sequenza di colori :

Rosso - Rosso - Rosso : 2200 +/- 20% ossia 2,2K 20%

Decodificare la sequenza di colori :

Rosso - Violetto - Giallo - Oro : 2700000 +/-5% ossia 270K 5%

### Resistori commerciali e Valori Normalizzati

In commercio non esistono tutti i possibili valori di resistori ma esistono dei "valori cosiddetti normalizzati" costituenti le serie E6 (20%) E12 (10%) E24 (5%); tali serie sono costituite rispettivamente da sei, dodici e ventiquattro valori normalizzati all'interno di una decade. Prendiamo ad esempio in considerazione i valori normalizzati della serie E12 nella decade compresa fra 10 e 100 Ohm: i valori disponibili in commercio sono i seguenti: 10 Ohm, 12 Ohm, 15 Ohm, 18 Ohm, 22 Ohm, 27 Ohm, 33 Ohm, 39 Ohm, 47 Ohm, 56 Ohm, 68 Ohm, 82 Ohm; la decade successiva inizierà da 100 Ohm, 120 Ohm, e così via fino a 820 Ohm; la decade successiva inizierà da 1 k Ohm, 1,2 k Ohm, e così via fino a 8,2 k Ohm.

SERIE																								
E24	1	1,1	1,2	1,3	1,5	1,6	1,8	2	2,2	2,4	2,7	3	3,3	3,6	3,9	4,3	4,7	5,1	5,6	6,2	6,8	7,5	8,2	9,1
E12	1		1,2		1,5		1,8		2,2		2,7		3,3		3,9		4,7		5,6		6,8		8,2	
E6	1				1,5				2,2				3,3				4,7				6,8			

## Collegamenti di lampade in parallelo e in serie

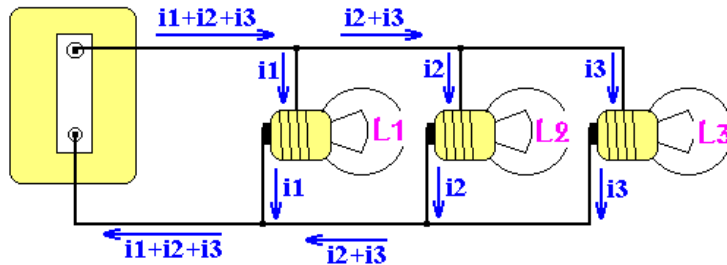


Figura 1 - Collegamento in parallelo: la tensione è la stessa per tutti gli utilizzatori; ogni utilizzatore assorbe la sua corrente

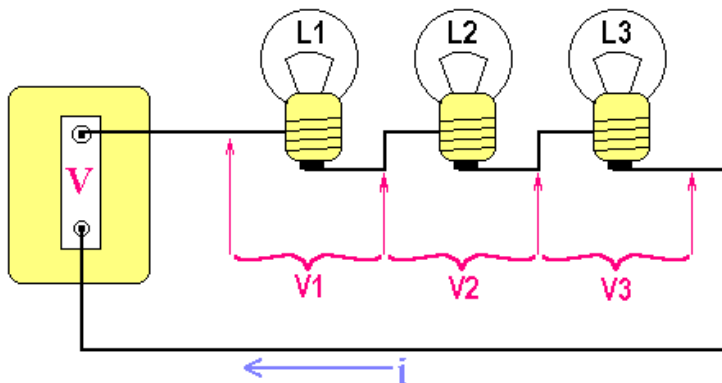


Figura 2 - Collegamento in serie: tutti gli utilizzatori sono attraversati dalla stessa corrente; la tensione si ripartisce sui vari utilizzatori

quindi per far passare corrente deve vincere la resistenza non di una sola, ma di tutte le una dopo l'altra; la resistenza che incontra è equivalente quindi alla somma di tutte le. La tensione di 220 volt si suddividerà allora tra le varie lampadine, e su ogni lampadina presente la tensione che occorre perché la corrente in circuito possa superare la di quella lampadina. Se supponiamo di collegare in fila 10 lampadine identiche, che su ogni lampada sarà presente una tensione di 22 volt. Un simile collegamento si chiama collegamento in serie. Esempio caratteristico di collegamento in serie sono le lampadine dell'albero di natale. Una serie è costituita da 10 o più lampadine colorate, tutte aventi le stesse caratteristiche elettriche. Se una di esse venisse collegata da sola alla rete a 220 volt, scoppierebbe immediatamente; insieme alle altre invece essa sopporta solo una piccola parte della tensione di rete e può funzionare senza bruciarsi.

Volendo collegare alla rete diverse lampadine, è possibile collegarle come si vede nella prima delle figure a lato; in tal modo ognuna delle lampade risulta collegata a 220 volt ed assorbe la corrente che il suo filamento lascia passare. Un simile collegamento si chiama collegamento in parallelo.

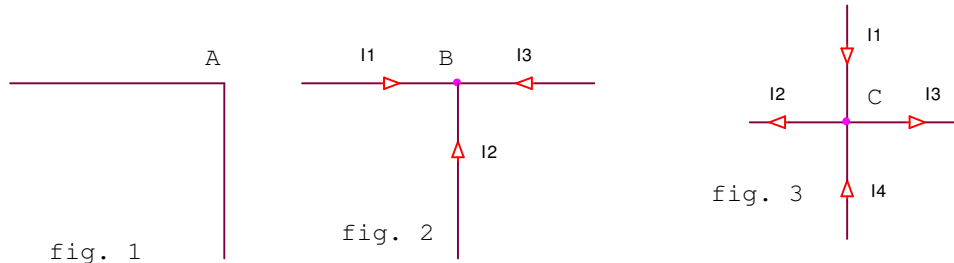
Sarebbe poi possibile fare una cosa più originale: collegare le lampade non una di fianco all'altra, ma una in fila all'altra, in modo che l'uscita di una sia collegata all'entrata di quella che segue, così come si vede nella seconda figura. Cosa succede in questo caso? La corrente che esce dalla presa attraversa una dopo l'altra tutte le lampadine; si tratta dell'unica corrente che circola, essendo solo uno il circuito possibile.



Quanta corrente passa? La tensione di 220 volt della presa risulta applicata a tutta la fila di lampadine, lampadine, resistenze. sarà resistenza troveremo

### Nodi di una rete elettrica

Si definisce nodo di una rete elettrica un punto in cui confluiscono non meno di tre conduttori



In fig. 1 è indicato un punto A che **non può essere considerato nodo** in quanto solamente 2 conduttori confluiscono in esso. In fig. 2 il punto B e in fig. 3 il punto C sono a tutti gli effetti da considerare nodi in quanto nel punto B confluiscono 3 conduttori e nel punto C confluiscono 4 conduttori.

Osserviamo che nel nodo B le intensità di corrente  $I_1$ ,  $I_2$  e  $I_3$  risultano entranti ma nessuna corrente risulta uscente; nel nodo C al contrario  $I_1$  e  $I_4$  risultano entranti mentre  $I_2$  e  $I_3$  risultano uscenti dal nodo.

### KCL legge (o Primo Principio) di Kirchhoff ai nodi

In un nodo di una rete elettrica non è possibile né creare dal nulla e nemmeno distruggere alcuna carica elettrica (principio di conservazione della carica elettrica) da ciò ne deriva che :

**La somma delle correnti entranti in un nodo deve sempre essere uguale alla somma delle correnti uscenti da quel nodo; questo enunciato viene chiamato Primo Principio di Kirchhoff o KCL (Kirchhoff's Current Law).**

La legge KCL applicata al nodo B del circuito di fig. 2 porta al seguente risultato:

$$I_1 + I_2 + I_3 = 0 \quad (\text{si noti che le correnti sono tutte entranti!!})$$

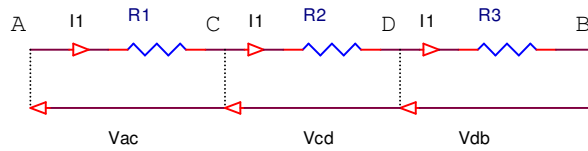
Per fare in modo che la somma delle correnti dia risultato nullo, è necessario che almeno una corrente delle tre assuma un valore negativo; poniamo che in un esempio concreto  $I_1$  e  $I_2$  siano effettivamente entranti nel nodo B (che significa che il valore di  $I_1$  e di  $I_2$  saranno entrambi positivi)  $I_3$  dovrà allora assumere il valore negativo  $I_3 = -(I_1 + I_2)$ . Il significato che assume questo risultato è il seguente:  $I_3$  negativa significa che il suo verso reale è esattamente opposto a quello prescelto ossia  $I_3$  non risulterà entrante ma uscente dal nodo B.

La legge KCL applicata al nodo C del circuito di fig. 3 porta al seguente risultato:

$$I_1 + I_4 = I_2 + I_3 \quad (\text{I1 e I4 entranti, I2 e I3 uscenti})$$

### Collegamenti di resistenze in serie

Due o più resistenze si dicono in serie o collegate in serie quando sono percorse dalla stessa corrente.



Perché possano essere considerate in serie i punti in cui le resistenze sono fra di loro connesse nel nostro caso il punto C e il punto D non devono essere nodi.

Applico la legge di Ohm alle tre resistenze:

$$V_{AC} = R_1 \cdot I_1 \quad V_{CD} = R_2 \cdot I_1 \quad V_{DB} = R_3 \cdot I_1$$

$$V_{AB} = V_{AC} + V_{CD} + V_{DB} = I_1 \cdot (R_1 + R_2 + R_3) = I_1 \cdot R_{EQ}$$

$$R_{EQ} = R_1 + R_2 + R_3$$

La Resistenza equivalente Req è quel valore di resistenza che può sostituire le tre resistenze in serie (una sola resistenza al posto di tre) senza modificare il regime elettrico del circuito ossia la corrente I1.

Nel caso in cui le resistenze in serie fossero N la formula assume l'aspetto seguente.

$$R_{EQ} = R_1 + R_2 + \dots + R_N$$

Nel caso in cui le resistenze in serie fossero solo due la formula assume l'aspetto seguente

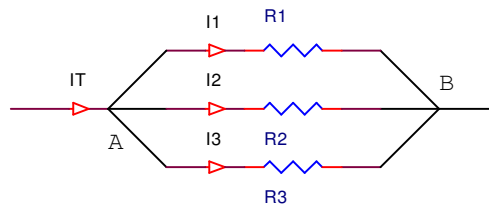
$$R_{EQ} = R_1 + R_2$$

### Osservazioni

1. Se le due resistenze in serie sono uguali  $R_1 = R_2$   $R_{EQ} = 2 \cdot R_1$
2.  $R_{EQ} > \text{Max}(R_1, R_2)$  La Req è sempre più grande della maggiore fra R1 ed R2.
3. nel caso in cui  $R_1 \gg R_2$  risulta  $R_{EQ} = R_1 + R_2 \cong R_1$  (nella somma R2 può essere trascurata rispetto ad R1). In serie predomina la resistenza di valore più elevato.

### Collegamenti di resistenze in parallelo

Due o più resistenze si dicono in parallelo o collegate in parallelo quando sono sottoposte alla stessa ddp (stessa tensione ai capi).



Perché possano essere considerate in parallelo, le resistenze devono fare capo agli stessi nodi nel nostro caso al nodo A e al nodo B.

Applico la legge di Ohm e calcolo le tre intensità di corrente I1, I2 e I3.

$$I_1 = \frac{V_{AB}}{R_1} \quad I_2 = \frac{V_{AB}}{R_2} \quad I_3 = \frac{V_{AB}}{R_3}$$

$$I_T = I_1 + I_2 + I_3 = V_{AB} \cdot \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right) = \frac{V_{AB}}{R_{EQ}}$$

$$\frac{1}{R_{EQ}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

$$R_{EQ} = \frac{1}{\left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right)}$$

Nel caso in cui le resistenze in parallelo fossero N la formula assume l'aspetto seguente.

$$\frac{1}{R_{EQ}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_N}$$

Nel caso in cui le resistenze in parallelo fossero solo due la formula assume l'aspetto seguente

$$R_{EQ} = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

La Resistenza equivalente Req è quel valore di resistenza che può sostituire le tre resistenze in parallelo (una sola resistenza al posto di tre) senza modificare il regime elettrico del circuito ossia la corrente IT.

### Osservazioni

1. Se le due resistenze in parallelo sono uguali  $R_1 = R_2$        $R_{EQ} = R_1/2$
2.  $R_{EQ} < \min(R_1, R_2)$  La Req è sempre più piccola della minore fra R1 ed R2.
3. nel caso in cui  $R_1 \gg R_2$  risulta  $R_{EQ} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} \cong \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1} = R_2$  (nella somma R2 può essere trascurata rispetto ad R1). In parallelo predomina la resistenza di valore più basso.

Esercizi :

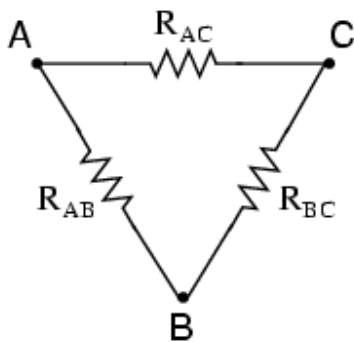
Calcolare la resistenza di una matassa di filo di rame lunga 300 m e sezione 0,5 mm<sup>2</sup> a

### Formule di Conversione $\Delta$ -Y e Y- $\Delta$

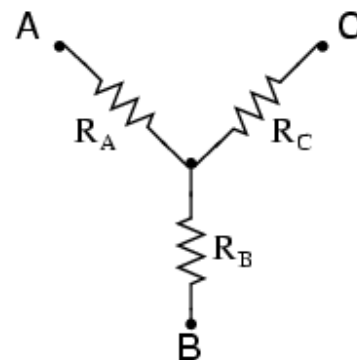
In alcune applicazioni circuitali, si incontrano tre resistenze connesse assieme in modo da dare origine ad una rete elettrica a 3 terminali. Le possibili connessioni vengono così denominate:

- Connessione a TRIANGOLO oppure connessione Delta oppure connessione a "Pi greca"  $\Pi$
- Connessione a STELLA oppure connessione Y oppure connessione a "T"

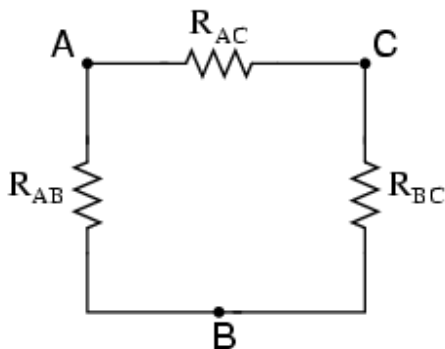
*Delta ( $\Delta$ ) network*



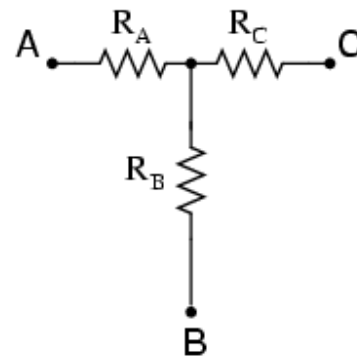
*Wye (Y) network*



*Pi ( $\pi$ ) network*



*Tee (T) network*



E' possibile trasformare una rete di resistenze connesse a triangolo in una equivalente rete a stella e viceversa.

Tre formule ci permettono di trasformare un triangolo in una "stella equivalente" ed altre tre formule ci permettono di trasformare una stella in un "triangolo equivalente".

Le formule vengono di seguito riportate senza alcuna dimostrazione.

### Conversione $\Delta$ -Y

$$R_A = \frac{R_{AB} \cdot R_{AC}}{R_{AB} + R_{AC} + R_{BC}}$$

$$R_B = \frac{R_{AB} \cdot R_{BC}}{R_{AB} + R_{AC} + R_{BC}}$$

$$R_C = \frac{R_{AC} \cdot R_{BC}}{R_{AB} + R_{AC} + R_{BC}}$$

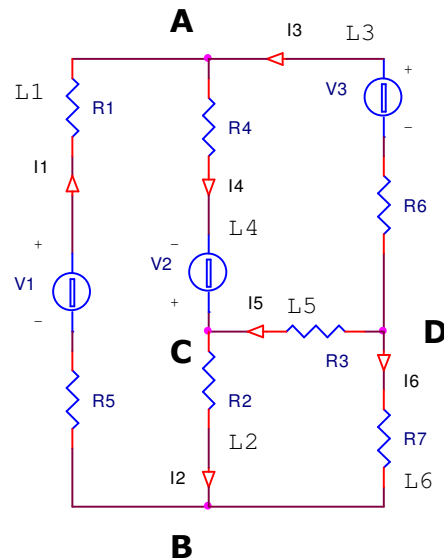
### Conversione Y- $\Delta$

$$R_{AB} = \frac{R_A \cdot R_B + R_A \cdot R_C + R_B \cdot R_C}{R_C}$$

$$R_{BC} = \frac{R_A \cdot R_B + R_A \cdot R_C + R_B \cdot R_C}{R_A}$$

$$R_{AC} = \frac{R_A \cdot R_B + R_A \cdot R_C + R_B \cdot R_C}{R_B}$$

### Nodi, lati, maglie di una rete elettrica



Nel disegno sopra è riportato un circuito elettrico; in esso notiamo la presenza di tre generatori di tensione V1, V2, V3 e ben 7 Resistenze.

A, B, C, D sono i nodi della rete elettrica ossia i punti di confluenza di almeno 3 conduttori.

**Definiamo Lato o Ramo un segmento di circuito che termina su due nodi.**

Nel circuito individuiamo i seguenti lati:

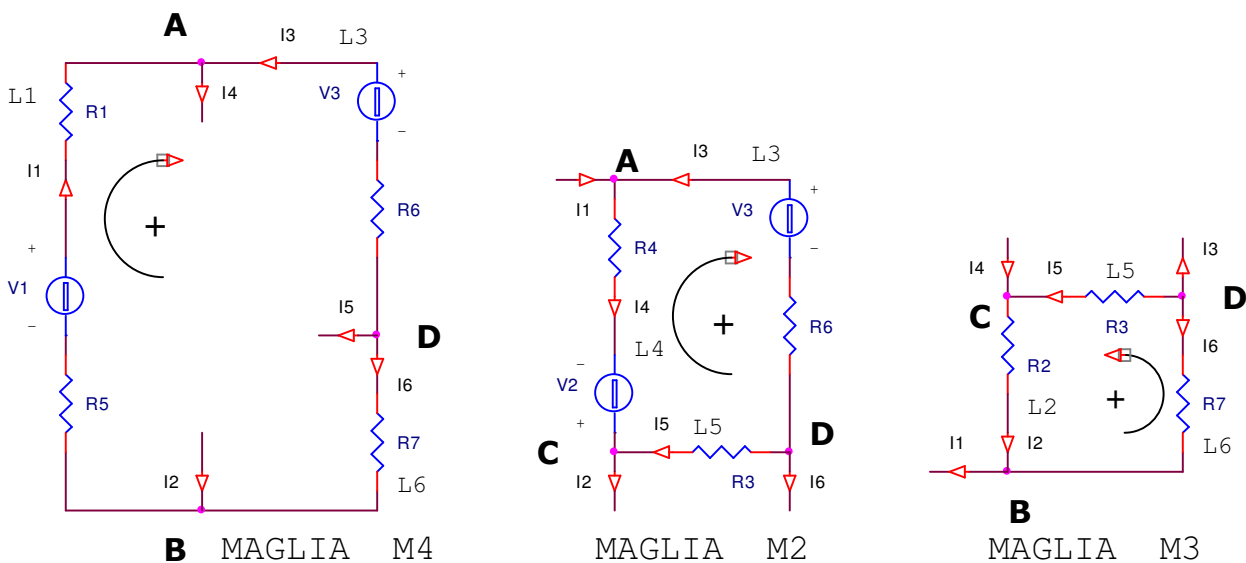
- L1 contenente V1, R5, R1 e percorso dalla corrente I1;
- L2 contenente R2 e percorso dalla corrente I2;
- L3 contenente V3, R6 e percorso dalla corrente I3;
- L4 contenente V2, R4 e percorso dalla corrente I4;
- L5 contenente R3 e percorso dalla corrente I5;
- L6 contenente R7 e percorso dalla corrente I6;

**Definiamo Maglia un insieme di lati o rami che costituiscono un percorso chiuso.**

Nel circuito individuiamo le seguenti maglie:

- M1 costituita da L1, L4, L2.
- M2 costituita da L4, L5, L3.
- M3 costituita da L5, L2, L6.
- M4 costituita da L1, L3, L6. (maglia esterna)
- M5 costituita da L3, L6, L2, L4.
- M6 costituita da L1, L3, L5, L2
- M7 costituita da L1, L4, L5, L6.

**Una maglia può essere percorsa in verso orario o anti-orario. E' molto importante fissare, a proprio piacimento, un verso di percorrenza della maglia perché solo dopo avere effettuato questa scelta sarà possibile applicare la KVL (Kirchhoff's Voltage Law) Legge (o secondo principio) di Kirchhoff alle maglie.**



Nelle figure sopra riportate, vengono presentate le 3 Maglie principali; nel caso di M1 e di M2 è stato scelto il verso di percorrenza orario, nel caso di M3 è stato scelto il verso di percorrenza anti-orario. Sia ben chiaro che potevano essere effettuate scelte diverse!!!.

### KVL legge (o Secondo Principio) di Kirchhoff alle maglie

**La somma algebrica delle f.e.m. dei generatori presenti in una maglia è sempre uguale alla somma algebrica delle c.d.t. (cadute di tensione) ai capi delle resistenze presenti nella maglia.**

*Nelle somme algebriche di cui sopra si devono assumere positive le f.e.m. dei generatori che risultano concordi con il verso di percorrenza della maglia e negative in caso contrario; vanno poi assunte positive le c.d.t. provocate da correnti concordi con il verso di percorrenza della maglia, negative in caso contrario.*

A titolo di esempio applichiamo la KVL alla maglia M1 (in cui è stato prescelto un verso di percorrenza orario). Risulta:

$$V_1 - V_3 = (R_1 + R_5) \cdot I_1 - R_6 \cdot I_3 + R_7 \cdot I_6$$

Applicando la KVL alla maglia M2 risulta:

$$-V_2 - V_3 = -R_4 \cdot I_1 - R_6 \cdot I_3 + R_3 \cdot I_5$$

Applicando la KVL alla maglia M3 risulta:

$$0 = -R_7 \cdot I_6 + R_3 \cdot I_5 + R_2 \cdot I_2$$

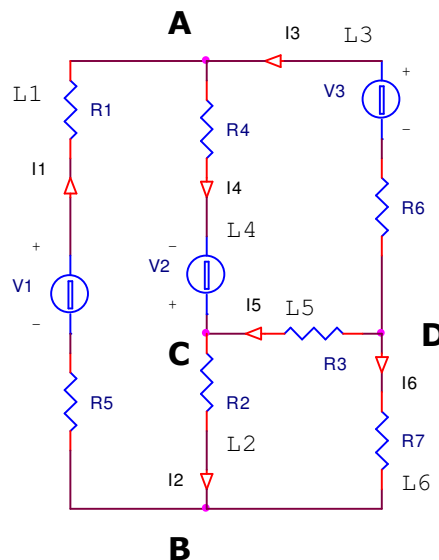
### Risoluzione dei circuiti elettrici utilizzando i due principi di Kirchhoff

Ammettiamo di dovere risolvere una rete elettrica di cui siano noti oltre alla struttura del circuito le f.e.m. dei generatori e le resistenze elettriche presenti. Supponiamo inoltre che L sia il numero dei lati ed N il numero dei nodi di quella rete. Ebbene se N sono i nodi N-1 sono le equazioni tra di loro indipendenti che possiamo scrivere utilizzando per ciascun nodo la KCL; ma L sono complessivamente le incognite in quanto in ogni lato avremo come incognita la corrente circolante per cui:

- N-1 equazioni le scriveremo ai nodi tra loro indipendenti.
- L - (N-1) equazioni le scriveremo alle maglie applicando loro la KVL

Mettendo in sistema le L equazioni in L incognite è possibile risolvere il sistema e risalire così al valore delle L incognite ossia delle correnti che circolano nei vari lati della rete elettrica.

A titolo di esempio vogliamo impostare la soluzione della rete sotto riportata:



I Nodi sono 4 quindi  $N = 4$ , nodi indipendenti = 3.

I lati della rete elettrica sono 6 quindi 6 sono complessivamente le incognite.

In conclusione tre saranno le equazioni KCL scritte ai nodi (es. nodo A, B e C) e tre saranno le equazioni KVL scritte alle Maglie.

$$\left\{ \begin{array}{l} I_1 + I_3 = I_4 \\ I_5 + I_4 = I_2 \\ 0 = I_3 + I_5 + I_6 \\ V_1 - V_3 = (R_1 + R_5) \cdot I_1 - R_6 \cdot I_3 + R_7 \cdot I_6 \\ -V_2 - V_3 = -R_4 \cdot I_1 - R_6 \cdot I_3 + R_3 \cdot I_5 \\ 0 = -R_7 \cdot I_6 + R_3 \cdot I_5 + R_2 \cdot I_2 \end{array} \right.$$

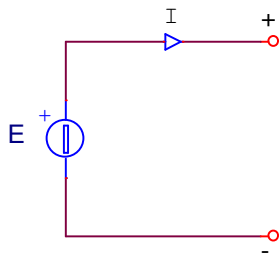
### Potenza elettrica

In un circuito elettrico la potenza si calcola tramite la formula:

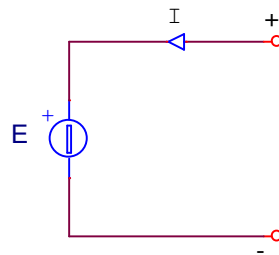
$$P = V \cdot I \quad \text{infatti} \quad P = V \cdot I = \frac{\text{Lavoro}}{Q} \cdot \frac{Q}{t} = \frac{\text{Lavoro}}{t}$$

La potenza si misura in Watt (W) quindi  $1W = 1V \times 1A$ .

### Convenzioni di segno per un generatore e per un utilizzatore



Convenzione di segno dei generatori



Convenzione di segno degli utilizzatori

Con riferimento al circuito della fig. di sinistra il prodotto  $EI$  esprime la potenza generata dal generatore di f.e.m.  $E$  mentre nel caso del circuito di destra il prodotto  $EI$  esprime la potenza assorbita dal generatore di f.e.m.  $E$ . Il caso più frequente è ovviamente quello riportato nella figura di sinistra. Un generatore è inserito in un circuito per generare potenza di tipo elettrico che serve ad alimentare il circuito a cui il generatore è connesso ma non è raro trovarsi di fronte a generatori che assorbono potenza dal circuito in cui sono inseriti. L'esempio più classico è quello dell'accumulatore di una autovettura quando viene ricaricato tramite un carica-batterie. In questo caso il carica-batterie è il vero generatore che alimenta o cede energia all'accumulatore che in questo caso funziona da carico e assorbe energia necessaria al processo di ricarica.

Nel caso di una resistenza di valore  $R$  si possono ricavare altre due formule con le quali è possibile ricavare il valore della potenza "dissipata" ossia trasformata in calore nella resistenza medesima.

$$\begin{array}{llll} P = V \cdot I & \text{ma} & V = R \cdot I & \text{quindi} & P = R \cdot I^2 \\ P = V \cdot I & \text{ma} & I = \frac{V}{R} & \text{quindi} & P = \frac{V^2}{R} \end{array}$$

In particolare, se ci riferiamo alla potenza massima dissipabile da un resistore è possibile scrivere:

$$P_{MAX} = R \cdot I_{MAX}^2$$

da cui è immediato ricavare

$$I_{MAX} = \sqrt{\frac{P_{MAX}}{R}}$$

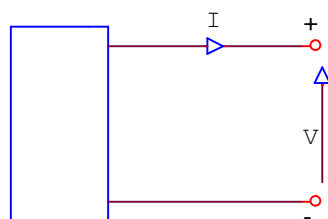
$$P_{MAX} = \frac{V_{MAX}^2}{R}$$

da cui è immediato ricavare

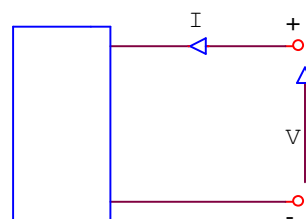
$$V_{MAX} = \sqrt{P_{MAX} \cdot R}$$

Le due formule scritte ci permettono di ricavare quanto vale la corrente massima che può circolare in una Resistore R o quanto vale la tensione massima applicabile ai capi del resistore R una volta che siano noti il valore della Resistenza in Ohm e la max. potenza dissipabile espressa in watt.

### Convenzioni di segno in un generico bipolo



Convenzione di segno dei generatori



Convenzione di segno degli utilizzatori

In un generico bipolo (rete elettrica generica terminante su due morsetti uno + ed uno -) si dice che adottato la "convenzione dei generatori" se per la corrente scelgo come positivo il verso della corrente uscente dal morsetto positivo; in tal caso il prodotto VI esprime la potenza generata dal bipolo.

In un generico bipolo si dice che adottato la "convenzione degli utilizzatori" se per la corrente scelgo come positivo il verso della corrente entrante dal morsetto positivo; in tal caso il prodotto VI esprime la potenza assorbita dal bipolo.

### Bilancio Energetico (o di Potenza) di una rete elettrica

Una rete elettrica va considerata, almeno in prima approssimazione, un "sistema isolato" in cui vale il più generale "principio di conservazione dell'energia" e quindi anche della potenza.




Si può affermare che:

In una rete elettrica, la somma o sommatoria delle potenze generate è sempre uguale alla somma di quelle assorbite più quelle dissipate.

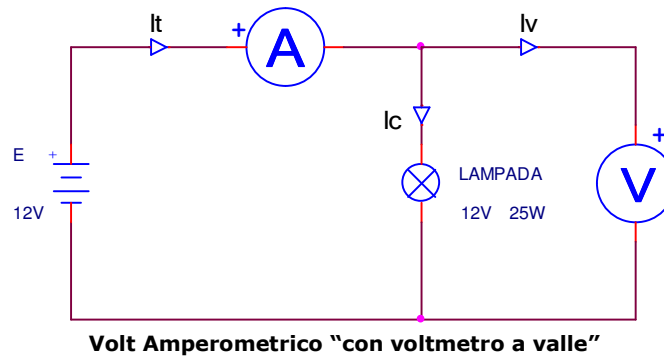
$$\sum P_G = \sum P_A + \sum P_D$$

## Strumenti di misura e loro impiego

Le grandezze elettriche presenti in un circuito possono e spesso devono essere misurate con opportuni strumenti:

1. Per misurare l'intensità di corrente elettrica si utilizza l'Amperometro. Con riferimento alla figura si noti che lo strumento dispone di due morsetti uno contrassegnato con il segno + (POSITIVO) l'altro contrassegnato con il segno - (NEGATIVO). Lo strumento è dotato di una scala a specchio graduata sulla quale si muove un indice. La posizione dell'indice sulla scala graduata ci permette di determinare il valore della grandezza sottoposta a misura. La grandezza è una corrente poiché sulla scala è riportato il simbolo A che sta per Ampère. Per effettuare una misura di corrente si deve interrompere il circuito nel punto in cui viene inserito lo strumento. Lo strumento è caratterizzato da un "fondo-scala" o portata che esprime il valore massimo della grandezza misurabile che porta l'indice a "fondo-scala" espresso, in questo caso in A. In commercio esistono Amperometri, milli-Amperometri, micro-Amperometri e Galvanometri anche a zero centrale.
2. Per misurare una tensione, differenza di potenziale, forza elettromotrice si utilizza il Voltmetro. Con riferimento alla figura si noti che lo strumento dispone di due morsetti uno contrassegnato con il segno + (POSITIVO) l'altro contrassegnato con il segno - (NEGATIVO). Lo strumento è dotato di una scala a specchio graduata sulla quale si muove un indice. La posizione dell'indice sulla scala graduata ci permette di determinare il valore della grandezza sottoposta a misura. La grandezza è una tensione poiché sulla scala è riportato il simbolo V che sta per Volt. Per effettuare una misura di tensione lo strumento va inserito in parallelo fra i due punti dove deve essere misurata la d.d.p. Anche il Voltmetro è caratterizzato da un "fondo-scala" o portata che esprime il valore massimo della grandezza misurabile che porta l'indice a "fondo-scala" espresso, in questo caso in V.
3. Per misurare una potenza si utilizza il Wattmetro. Questo strumento è dotato di 4 morsetti due per il circuito volumetrico e due per il circuito amperometrico.

## Metodo Volt-Amperometrico



Lo scopo del metodo volt-amperometrico è quello di determinare il valore della Resistenza elettrica di un utilizzatore, nel nostro caso, ad esempio, una lampada ad incandescenza 12V e 25 W, attraverso la misura della tensione applicata ai capi del carico e della corrente che percorre il carico. Note queste misure si applica la legge di "Ohm" e si determina il valore della resistenza incognita.

Le misure vengono effettuate utilizzando due strumenti: un amperometro in serie al carico ed un voltmetro posto in parallelo al carico. In figura è riportato un primo circuito detto "con voltmetro a valle (dell'amperometro)". Si può facilmente notare che il Voltmetro V misura effettivamente la ddp presente ai capi del carico mentre l'amperometro A è percorso da una corrente  $I_t$  che risulta essere la somma di  $I_c$  (corrente nel carico) e  $I_v$  (corrente assorbita dal voltmetro o consumo amperometrico del voltmetro).

Sarà opportuno qui ricordare che solamente un Voltmetro ideale assorbe corrente nulla. Un Voltmetro reale assorbe dal circuito una "piccola corrente" (piccolo consumo amperometrico) necessaria per il suo funzionamento; *si dice anche che mentre un voltmetro ideale presenta una resistenza infinita un voltmetro reale presenta una **resistenza elevata ma non infinita***.

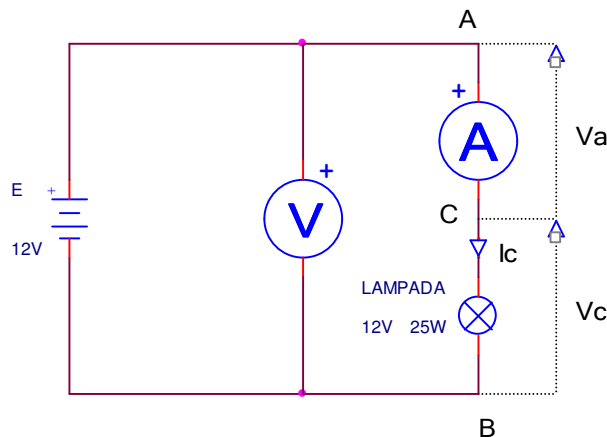
$$\frac{V}{I} = \frac{V}{I_T} = \frac{V}{I_C + I_V} = \frac{V}{I_C \cdot \left(1 + \frac{I_V}{I_C}\right)} = \frac{R_C}{\left(1 + \frac{I_V}{I_C}\right)}$$

Effettuando perciò il rapporto fra indicazione del Voltmetro V e dell'Amperometro A si ottiene un valore di resistenza errato in difetto rispetto al valore reale; la responsabilità di tale errore è da imputare al termine  $\left(1 + \frac{I_V}{I_C}\right)$  che compare a denominatore. Tanto più il termine  $\frac{I_V}{I_C}$  è trascurabile

rispetto a 1 tanto più il rapporto  $\frac{V}{I}$  sarà vicino al vero valore della resistenza di carico. Il termine

$$\frac{I_V}{I_C} = \frac{R_C}{R_V} \text{ per cui affermare che } \frac{I_V}{I_C} \ll 1 \text{ significa affermare che } \frac{R_C}{R_V} \ll 1 \text{ ossia } R_C \ll R_V.$$

Scegliendo ad esempio  $R_V = 100 \cdot R_C$  l'errore commesso è attorno all' 1% e pertanto può essere trascurato. *Il metodo volt amperometrico "con voltmetro a valle" si presta perciò ad effettuare misure su resistenze di valore "basso" (rispetto alla resistenza interna del voltmetro).*



**Volt Amperometrico "con voltmetro a monte"**

In figura è riportato un secondo circuito detto "con voltmetro a monte (dell'amperometro)". Si può facilmente notare che l'amperometro A misura effettivamente la corrente che percorre il carico mentre il Voltmetro V misura una tensione che è la somma fra la tensione presente sul carico e la caduta di tensione dell'Amperometro A (consumo voltmetrico dell'Amperometro).

Sarà opportuno qui ricordare che solamente un Amperometro ideale presenta ai suoi capi una ddp nulla. Un Amperometro presenta ai suoi capi una "piccola ddp" necessaria per il suo funzionamento (piccolo consumo voltmetrico); *si dice anche che mentre un Amperometro ideale presenta una resistenza nulla un Amperometro reale presenta una **resistenza piccola ma non nulla**.*

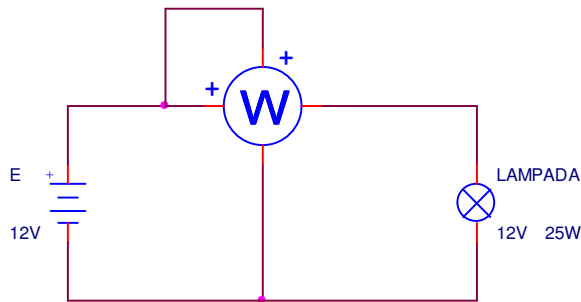
$$\frac{V}{I} = \frac{V_A + V_C}{I_C} = \frac{V_C \cdot \left(1 + \frac{V_A}{V_C}\right)}{I_C} = R_C \cdot \left(1 + \frac{V_A}{V_C}\right)$$

Effettuando perciò il rapporto fra indicazione del Voltmetro V e dell'Amperometro A si ottiene un valore di resistenza errato in eccesso rispetto al valore reale; la responsabilità di tale errore è da imputare al termine  $\left(1 + \frac{V_A}{V_C}\right)$  che compare a numeratore. Tanto più il termine  $\frac{V_A}{V_C}$  è trascurabile

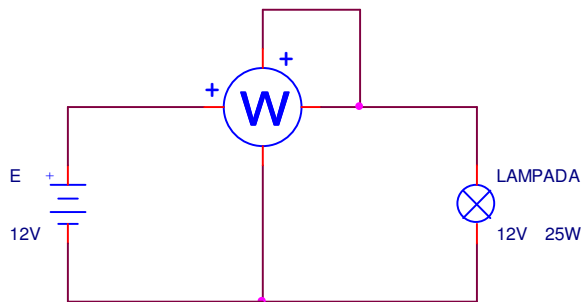
rispetto a 1 tanto più il rapporto  $\frac{V}{I}$  sarà vicino al vero valore della resistenza di carico. Il termine

$$\frac{V_A}{V_C} = \frac{R_A}{R_C} \text{ per cui affermare che } \frac{V_A}{V_C} \ll 1 \text{ significa affermare che } \frac{R_A}{R_C} \ll 1 \text{ ossia } R_C \gg R_A.$$

Scegliendo ad esempio  $R_A = \frac{R_C}{100}$  l'errore commesso è attorno all' 1% e pertanto può essere trascurato. *Il metodo volt amperometrico "con voltmetro a monte" si presta perciò ad effettuare misure su resistenze di valore "elevato" (rispetto alla resistenza interna dell'amperometro).*

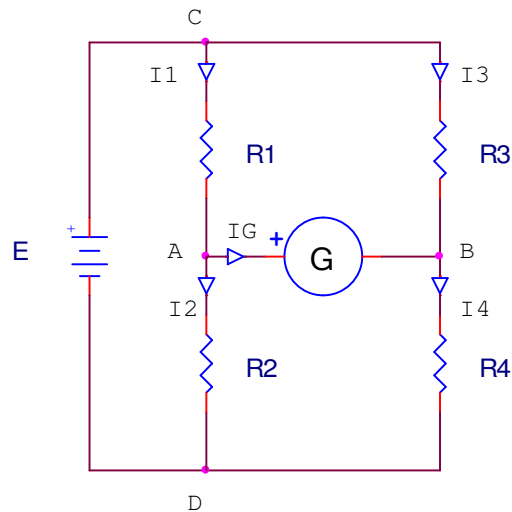


**Wattmetro inserito "con circuito voltmetrico a monte"**



**Wattmetro inserito "con circuito voltmetrico a valle"**

## Ponte di Wheatstone principio di funzionamento e suo impiego



In figura è riportato un "Circuito detto a Ponte di Wheatstone". Esso è costituito da 4 resistenze, un generatore di f.e.m. E ed un galvanometro o microamperometro "a zero centrale" molto sensibile (che va a fondo scala con un piccolissimo valore di corrente). Il ponte si dice "in equilibrio" se  $V_{AB} = 0$  ossia se  $I_G = 0$ ; in tal caso risulta  $I_1 = I_2$  e inoltre  $I_3 = I_4$ . In condizione di equilibrio risulta :

$$\begin{aligned} V_{AB} &= 0 \\ I_G &= 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_1 &= I_2 \\ I_3 &= I_4 \end{aligned}$$

$$V_{CA} = V_{CB}$$

$$V_{AD} = V_{BD}$$

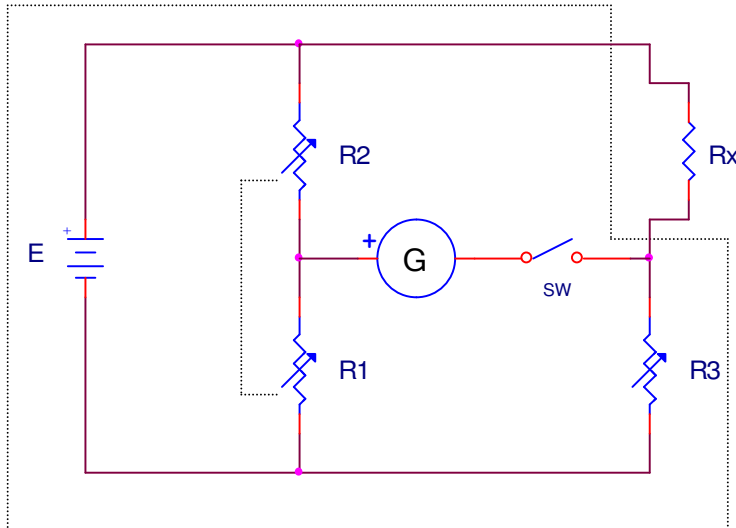
$$R_1 \cdot I_1 = R_3 \cdot I_3$$

$$R_2 \cdot I_1 = R_4 \cdot I_3$$

Dividendo membro a membro e semplificando a sinistra  $I_1$  e a destra  $I_3$  risulta:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}$$

$$R_4 = \frac{R_2}{R_1} \cdot R_3$$



Il ponte di Wheatstone viene utilizzato per effettuare la misura di una resistenza incognita (poniamo essa sia  $R_4$  indicata ora con  $R_x$ ) a partire dal valore di tre resistenze campioni note  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  una volta che si sia raggiunta la condizione di equilibrio sopra descritta.

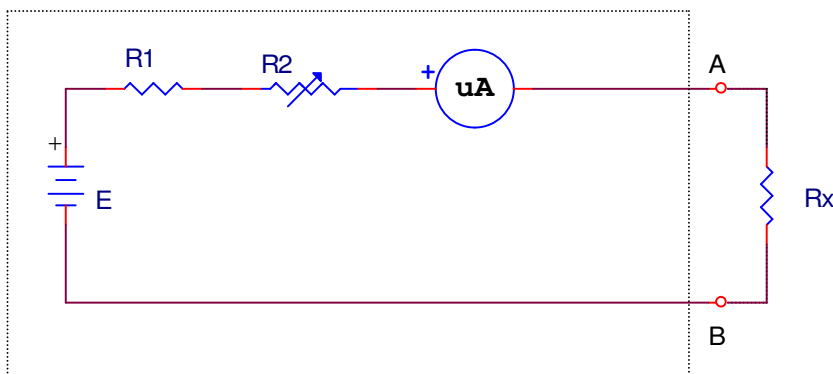
E' evidente che  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  devono essere resistenze campioni variabili. Solitamente il circuito è fatto in questo modo:

$R_2$  ed  $R_1$  variano congiuntamente in modo da fare assumere al rapporto

$$K = \frac{R_2}{R_1}$$

valori  $10^{-3}$ ,  $10^{-2}$ ,  $10^{-1}$ ,  $1$ ,  $10^1$ ,  $10^2$ ,  $10^3$ ; in tal modo viene ad essere stabilito l'ordine di grandezza della resistenza incognita  $R_x$ .  $R_3$  invece varia con continuità fra 0 ed un valore massimo  $R_{3MAX}$  che determina il valore massimo misurabile dal ponte.

### Circuito Ohmetrico di tipo serie



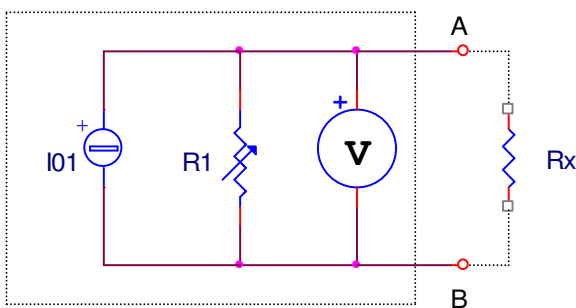
Questo circuito è utilizzato soprattutto negli strumenti universali di tipo analogico (denominati tester). In pratica da una misura di corrente si risale in modo indiretto alla misura di resistenza  $R_x$  inserita fra i morsetti A e B.

La Resistenza R2 variabile serve per effettuare la taratura dello strumento (operazione da eseguire SEMPRE prima di inserire la resistenza Rx da misurare!!!).

La "taratura" si effettua cortocircuitando i due morsetti A e B e regolando R2 in modo da portare l'indice del uAmperometro esattamente a fondo scala; quindi 0 Ohm coincidono con la posizione di "fondo-scala" della scala amperometrica. Se lascio i morsetti A e B aperti, circola corrente nulla nel circuito, l'indice della scala amperometrica è collocata ad inizio scala: quindi un valore infinito di Ohm corrisponde all'inizio della scala amperometrica 0 uA.

$$I = \frac{E}{(R_1 + R_2) + R_x}$$

### Circuito Ohmetrico di tipo parallelo



Questo circuito è utilizzato soprattutto negli strumenti universali di tipo digitale (multimetro digitale). In pratica da una misura di tensione si risale in modo indiretto alla misura di resistenza Rx inserita fra i morsetti A e B.

La Resistenza R1 variabile serve per effettuare la taratura dello strumento (operazione da eseguire SEMPRE prima di inserire la resistenza Rx da misurare!!!).

La "taratura" si effettua lasciando i due morsetti A e B aperti e regolando R1 in modo da portare l'indice del Voltmetro esattamente a fondo scala; quindi un valore infinito di Ohm coincide con la posizione di "fondo-scala" della scala volumetrica. Se pongo fra di loro in corto circuito i morsetti A e B, la tensione Vab assume valore nullo, l'indice della scala voltmetrica è collocato ad inizio scala.

$$V_{AB} = \frac{R_1 \cdot R_x}{R_1 + R_x} \cdot I_{01} = \frac{R_1 \cdot I_{01}}{1 + \frac{R_1}{R_x}}$$

## Multimetro analogico ICE 680 R

Strumento ad alta precisione conforme alle norme IEC 1010. Ampiezza di scala 100gradi. Auto azzeramento elettronico sulle portate ohmetriche. Galvanometro protetto con diodi al silicio, misure in ohm protette con fusibile e varistori. Custodia antiurto con doppiofondo per l'alloggiamento delle dotazioni e maniglietta per posizionamento dello strumento a 45 gradi.

Oltre alle normali letture funzione di prova continuità con segnalazione acustica mediante buzzer, prova diodi, transistor e LED, prova pile 1,5V e 9V prova LOW ohm da 0 a 500ohm. Alimentazione con pila da 9V, dimensioni 128x96x35mm, peso 300 grammi.



Nella confezione:

- Multimetro ICE 680R
- Coppia Puntali
- Fusibile di ricambio
- Cavallotto low ohm
- Manuale istruzioni

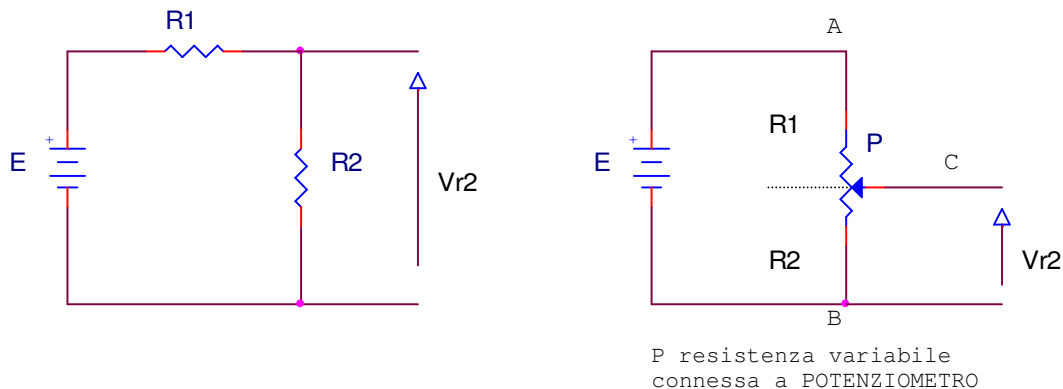
Precisione:

- Volt Amp DC +/- 1% f.s.
- Volt Amp AC +/- 1% f.s.
- Ohm +/- 2%

<http://www.elettronicazetabi.it/>

PORTATE	
Volt DC	100 mV - 2V - 10V - 50V - 200V - 500V - 1000V
Volt AC	2V - 10V - 50V - 250V - 750V
Amp DC	50uA - 500uA - 5mA - 50mA - 500mA - 5A
Amp AC	250uA - 2,5mA - 25mA - 250mA - 2,5A
OHM	x1 - x10 - x100 - x1000 range di misura da 0 a 10Mohm
Capacità	22uF - 220uF - 2200uF- 22000uF – 20mF misura a metodo balistico

## Partitore di tensione



Un Partitore di tensione (circuito sopra a sinistra) è un circuito che viene utilizzato per ridurre il valore della tensione applicata in ingresso dal generatore E. Il circuito è costituito da due o più resistenze collegate in serie; la serie fa capo al circuito di ingresso mentre l'uscita viene prelevata ai capi di una delle resistenze (nel nostro caso R2). Nel disegno di figura si può facilmente calcolare il valore di Vr2 legato ad E, a R1 e a R2 dalla seguente relazione:

$$V_{R_2} = \frac{R_2}{(R_1 + R_2)} E \quad k = \frac{R_2}{(R_1 + R_2)} \quad V_{R_2} = k \cdot E$$

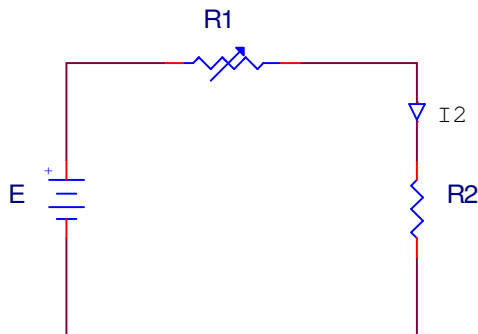
k rappresenta il rapporto partizione che assume valori compresi fra 0 e 1.  
Con R2=0 k vale 0; con R2 infinito k assume valore 1.

## Potenziometro

Nel circuito di destra è rappresentato un potenziometro (resistenza variabile a tre morsetti che si comporta nel circuito come un partitore di tensione con rapporto di partizione k variabile. Si chiama "cursore" il morsetto connesso alla parte mobile del potenziometro. Esistono potenziometri rotativi in cui la variazione della posizione del cursore viene provocata ruotando un albero centrale cui è fissata una manopola (l'angolo di rotazione è compreso fra 0 e 270°). Quando l'albero e la manopola sono ruotati completamente in senso antiorario, il cursore C assume lo stesso potenziale del punto B per cui R2 vale 0 e quindi k=0. Quando l'albero e la manopola sono ruotati completamente in senso orario, il cursore C assume lo stesso potenziale del punto A per cui R2 vale P = R1 + R2 e quindi k=1.

Oltre ai potenziometri rotativi esistono pure "potenziometri multigiri" (16 giri di un sistema "vite senza fine" portano il cursore dalla posizione 0 alla posizione massima consentendo una più elevata risoluzione nel processo di regolazione). La legge di variazione della Resistenza in un potenziometro può essere lineare (suffisso A: 100KA potenziometro da 100K a variazione lineare), logaritmica (suffisso B: 1MB potenziometro da 1M a variazione logaritmica) o logaritmica inversa (suffisso C).

## Reostato



R1 resistenza variabile  
connessa a REOSTATO



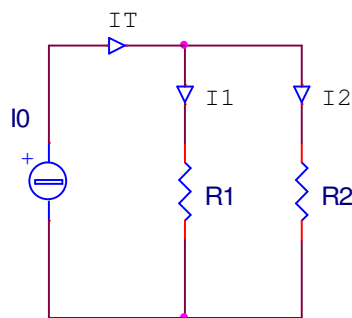
R1 resistenza variabile a 3 morsetti  
montaggio a REOSTATO

Nel circuito sopra è rappresentato un reostato (resistenza variabile a due morsetti) che va solitamente connesso in serie ad un carico (nostro caso R2) nel quale si vuole modificare la corrente circolante. Con  $R1=0$  la corrente è massima; con  $R1=MAX$  la corrente nel circuito è minima. In generale il valore è dato dalla espressione:

$$I_2 = \frac{E}{(R_1 + R_2)}$$

Si noti quale deve essere la connessione consigliata per realizzare un REOSTATO con una resistenza variabile a tre morsetti (POTENZIOMETRO); si deve cortocircuitare il cursore con una delle due estremità del potenziometro.

## Partitore di corrente



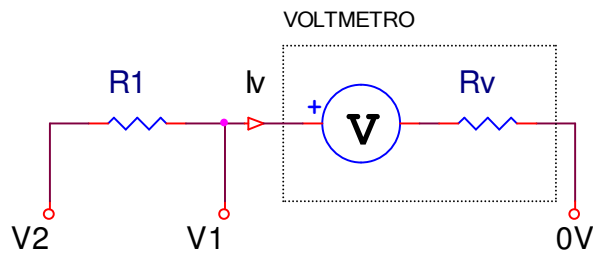
Un Partitore di corrente (circuito sopra) è un circuito che viene utilizzato per ridurre il valore della corrente I2 fornita alla Resistenza R2 (carico) dal generatore I0 posto in ingresso. Per ripartire la corrente è necessario porre in parallelo ad R2 (carico) una resistenza R1 di valore opportuno.

Nel disegno di figura si può facilmente mettere in relazione il valore di I2 (uscita) rispetto ad I0 (ingresso).

$$V_{R2} = \frac{R_1 \cdot R_2}{(R_1 + R_2)} I_0 \quad I_2 = \frac{V_{R2}}{R_2} = \frac{R_1}{(R_1 + R_2)} I_0 \quad k = \frac{R_1}{(R_1 + R_2)} \quad I_2 = k \cdot I_0$$

k rappresenta il rapporto partizione che assume valori compresi fra 0 e 1. Con  $R1=0$  k vale 0; con R1 infinito k assume valore 1.

## Estensione della portata di un Voltmetro : Resistenza Addizionale



Spesso ci si trova di fronte al problema di avere un voltmetro con fondo scala 10V (ad esempio) e di voler misurare una tensione maggiore poniamo ad esempio di valore massimo pari a 50V. La soluzione al problema (vedi figura) è rappresentata dal "Partitore di Tensione". In altri termini si tratta di calcolare il valore da attribuire alla resistenza R1 (denominata in questo contesto Resistenza Addizionale) da porre in serie al voltmetro, in modo tale che, quando applico una V2 pari a 50V il partitore costituito da R1 ed Rv produca ai capi di Rv (e quindi dello strumento) una tensione pari a 10V. La resistenza addizionale R1 deve perciò "portarsi via" una tensione pari a 40V.

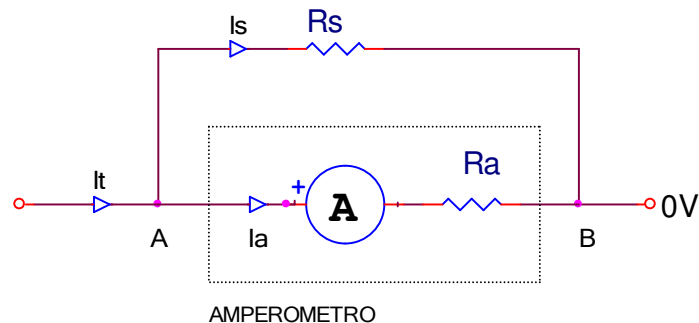
Per dimensionare R1 si può procedere o utilizzando le formule del "partitore di tensione" oppure più semplicemente si può seguire questo procedimento:

- Noto V1 (fondo scala originario dello strumento), e nota Rv si calcola il consumo amperometrico del Voltmetro (applicando la legge di Ohm).  $I_v = \frac{V_1}{R_v}$

- Nota la quantità  $V_2 - V_1$  ed il valore di  $I_v$  si può calcolare R1 con la formula

$$R_1 = \frac{V_2 - V_1}{I_v} \quad (\text{legge di Ohm applicata ad } R_1).$$

## Estensione della portata di un Amperometro : Resistenza di Shunt



Spesso ci si trova di fronte al problema di avere un amperometro con fondo scala 1A (ad esempio) e di voler misurare una corrente maggiore poniamo ad esempio di valore massimo pari a 5A. La soluzione al problema (vedi figura) è rappresentata dal "Partitore di Corrente". In altri termini si tratta di calcolare il valore da attribuire alla resistenza Rs (denominata in questo contesto Resistenza di Shunt) da porre in parallelo all'amperometro, in modo tale che, quando applico al circuito una corrente pari a 5A, il partitore di corrente costituito da Rs ed Ra faccia circolare nello strumento e quindi in Ra una corrente pari ad 1A. La resistenza di "shunt" deve perciò "portarsi via" una corrente pari a 4A.

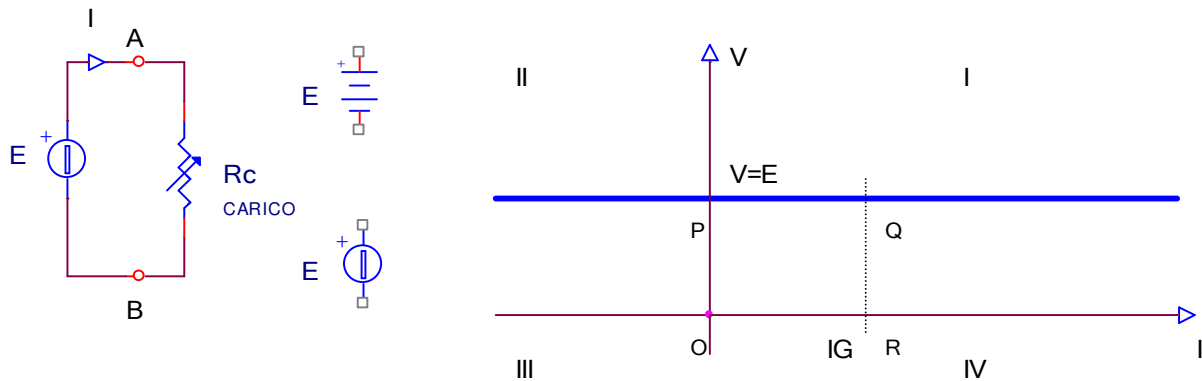
Per dimensionare Rs si può procedere o utilizzando le formule del "partitore di corrente" oppure più semplicemente si può seguire questo procedimento:

- Nota Ia (fondo scala originario dello strumento), e nota Ra si calcola il consumo voltmetrico dell'Amperometro (applicando la legge di Ohm).  $V_{AB} = R_A \cdot I_A$

- Nota la quantità  $I_T - I_A$  ed il valore di  $V_{ab}$ , si può calcolare  $R_s$  con la formula

$$R_s = \frac{V_{AB}}{I_T - I_A} = \frac{R_A \cdot I_A}{I_T - I_A} \quad (\text{legge di Ohm applicata ad } R_s).$$

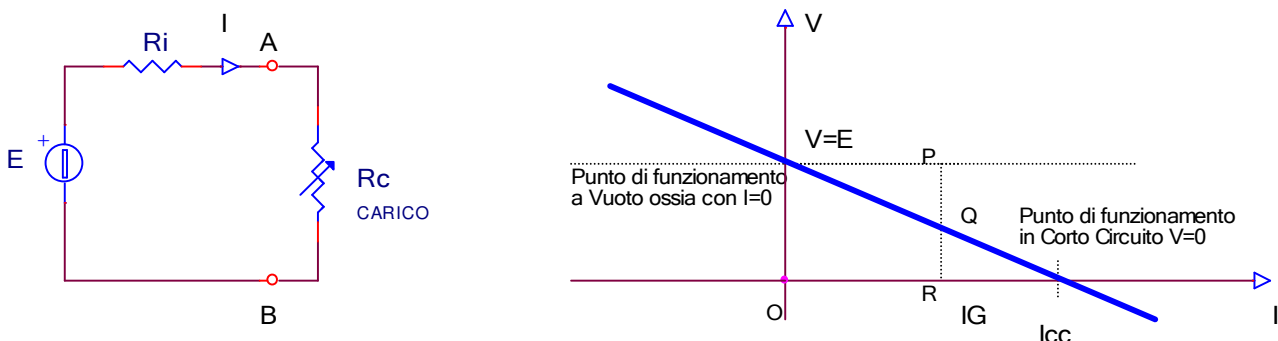
## Generatore Ideale di tensione



Nel disegno sopra riportato compaiono i simboli comunemente usati per rappresentare un Generatore Ideale di Tensione e la relativa caratteristica  $V=f(I)$ .

Un generatore ideale di tensione, eroga un f.e.m.  $E$  costante e indipendente dal valore di corrente erogata. La sua caratteristica nel piano  $V$   $I$  è rappresentata da una retta parallela all'asse delle ascisse. Se supponiamo che al generatore sia applicato un carico  $R_c$  il quale assorbe la corrente  $I_G$ , il prodotto  $E I_G$  rappresenta la potenza erogata dal generatore. L'area quindi del rettangolo  $PQRO$  rappresenta graficamente la potenza erogata dal generatore verso il proprio carico. E' chiaro che all'aumentare della corrente richiesta al generatore aumenta il prodotto  $E I_g$  e quindi aumenta la potenza erogata; al diminuire di  $I_g$  diminuisce il prodotto  $E I_g$  e quindi la potenza erogata.

Un generatore di tensione reale non ha mai un comportamento come indicato nella caratteristica  $V$   $I$  di figura ma ha un comportamento leggermente diverso; solitamente al crescere della corrente  $I$ , diminuisce la tensione  $V$  prelevabile fra i morsetti A e B e al diminuire della corrente  $I$ , cresce la tensione  $V$  prelevabile fra i morsetti A e B. La retta perciò non è parallela all'asse  $I$  ma è inclinata.



Comunemente un generatore di tensione reale quale può essere una pila, una batteria di una autovettura, ecc. è rappresentabile da un generatore ideale di fem  $E$  con in serie una resistenza  $R_i$  detta Resistenza Interna del generatore. E' proprio la resistenza  $R_i$  che, essendo percorsa dalla corrente  $I$  che giunge al carico, crea una caduta di tensione  $R_i I$  per cui la tensione ai morsetti A e B del generatore non risulta costante ma variabile secondo l'espressione:

$$V_{AB} = V = E - R_i \cdot I$$

Il legame fra  $V$  ed  $I$  è espresso da una relazione lineare; rappresentabile nel piano  $V I$  da una retta (vedi figura) "caratteristica di funzionamento del generatore reale".

Per  $I=0$  (carico  $R_c$  di valore infinito o circuito aperto) risulta che  $V=E$ ; la tensione ai morsetti è uguale alla fem del generatore essendosi annullata la cdt sulla resistenza interna  $R_i$ . In questo caso si dice che il generatore "funziona a vuoto" e tale modalità di funzionamento è rappresentata dalla intersezione fra asse  $V$  e "caratteristica di funzionamento del generatore".

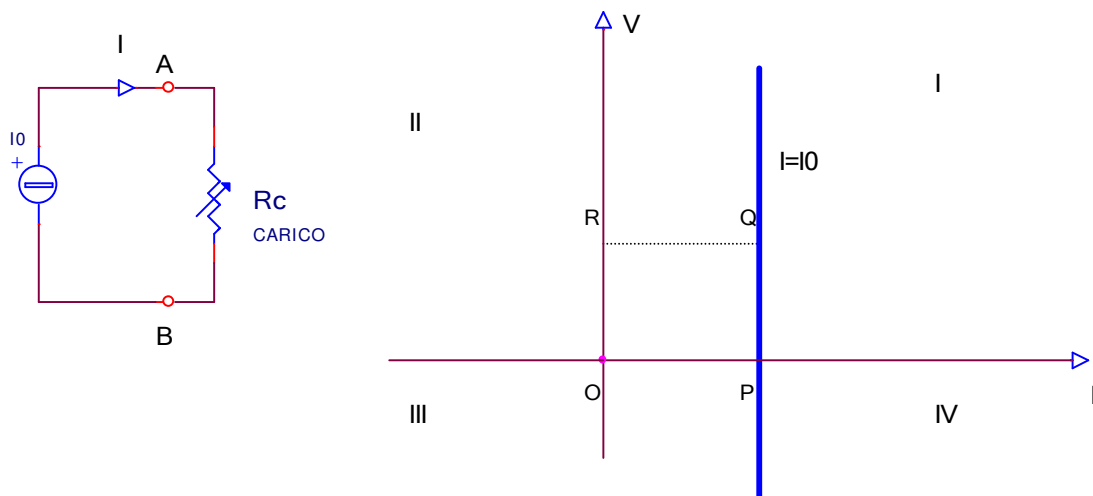
Al crescere della corrente  $I$  cresce la caduta interna  $R_i I$  e diminuisce perciò la tensione prelevabile fra i morsetti esterni  $A$  e  $B$ ; ad un certo punto, ossia quando la fem interna  $E$  è esattamente uguale alla caduta interna  $R_i I$ , la tensione ai morsetti esterni vale 0; si è raggiunto il punto di funzionamento in "corto circuito". In tale condizione risulta  $V = 0$  ed  $I = I_{cc}$  (corrente di cortocircuito):

$$I_{cc} = E/R_i$$

Osservando il grafico si nota che: il segmento  $PR$  rappresenta la fem  $E$  del generatore, il segmento  $QR$  rappresenta la tensione che si presenta ai morsetti  $AB$ ; di conseguenza il segmento  $PQ$  rappresenta la cdt sulla resistenza interna  $R_i$ .

Mano a mano che  $Q$  si sposta verso il "punto di funzionamento a vuoto" ossia la corrente richiesta al generatore  $I_g$  diminuisce,  $QR$  aumenta e  $PQ$  diminuisce. Mano a mano che  $Q$  si sposta verso il "punto di funzionamento in corto circuito" ossia la corrente richiesta al generatore  $I_g$  aumenta,  $QR$  diminuisce e  $PQ$  aumenta.

### Generatore Ideale di corrente



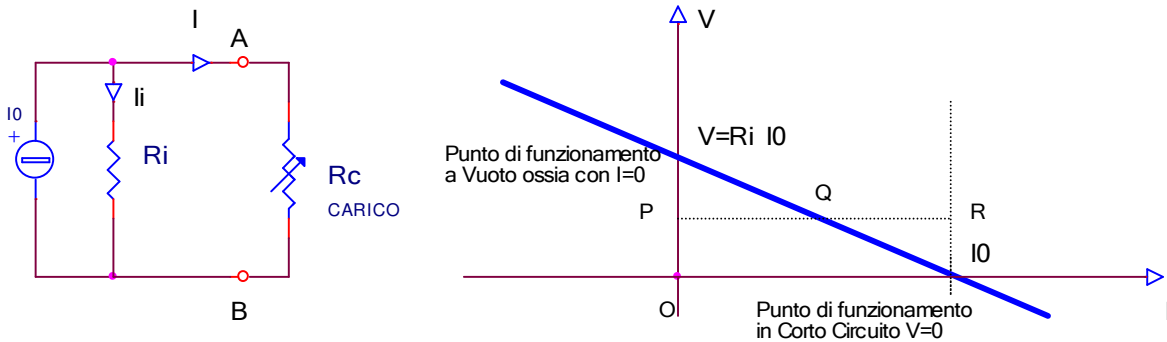
Nel disegno sopra riportato compare il simbolo comunemente usato per rappresentare un Generatore Ideale di Corrente e la relativa caratteristica  $V=f(I)$ .

Un generatore ideale di corrente, eroga una intensità di corrente  $I_0$  costante e indipendente dal valore della tensione  $V$  presente ai morsetti  $A B$ . La sua caratteristica nel piano  $V I$  è rappresentata da una retta parallela all'asse delle ordinate. Se supponiamo che al generatore sia applicato un carico  $R_c$  il quale assorbe la corrente  $I_0$ , il prodotto  $V I_0$  rappresenta la potenza erogata dal generatore. L'area quindi del rettangolo  $PQRO$  rappresenta graficamente la potenza erogata dal generatore verso il proprio carico.

E' chiaro che all'aumentare del carico, aumenta la tensione presente ai morsetti  $A B$  ed anche il prodotto  $V I_0$  e quindi la potenza erogata; al diminuire del carico diminuisce la tensione presente ai morsetti  $A B$  ed anche il prodotto  $V I_0$  e quindi la potenza erogata .

Un generatore di corrente reale non ha mai un comportamento come indicato nella caratteristica  $V I$  di figura ma ha un comportamento leggermente diverso; solitamente al crescere della corrente

$I$ , diminuisce la tensione  $V$  prelevabile fra i morsetti A e B e al diminuire della corrente  $I$ , cresce la tensione  $V$  prelevabile fra i morsetti A e B. La retta perciò non è parallela all'asse  $I$  ma è inclinata.



Comunemente un generatore di corrente reale è rappresentabile da un generatore di corrente ideale  $I_0$  con in parallelo una resistenza  $R_i$  detta Resistenza Interna del generatore. E' proprio la resistenza  $R_i$  che, essendo applicata in parallelo al generatore impedisce alla corrente erogata di mantenersi costante ma variabile secondo l'espressione:

$$I = I_0 - \frac{V}{R_i} \qquad V = R_i \cdot I_0 - R_i \cdot I$$

Il legame fra  $V$  ed  $I$  è espresso da una relazione lineare; rappresentabile nel piano  $V I$  da una retta (vedi figura) "caratteristica di funzionamento del generatore reale".

Per  $I=0$  (carico  $R_c$  di valore infinito o circuito aperto) risulta che  $V=R_i I_0$ . In questo caso si dice che il generatore "funziona a vuoto" e tale modalità di funzionamento è rappresentata dalla intersezione fra asse  $V$  e "caratteristica di funzionamento del generatore".

Al crescere della corrente  $I$  richiesta dal carico, diminuisce perciò la tensione prelevabile fra i morsetti esterni A e B; ad un certo punto, ossia quando la il carico assorbe una corrente pari ad  $I_0$  la tensione ai morsetti esterni vale 0; si è raggiunto il punto di funzionamento in "corto circuito". In tale condizione risulta  $V = 0$  ed  $I = I_0$  (corrente di cortocircuito):

$$I_{cc} = I_0$$

Osservando il grafico si nota che: il segmento PR rappresenta la corrente di corto-circuito del generatore, il segmento PQ rappresenta la corrente che percorre il carico  $R_c$ , di conseguenza il segmento QR rappresenta la corrente che si "disperde" nella resistenza interna  $R_i$ .

Mano a mano che Q si sposta verso il "punto di funzionamento a vuoto" ossia la corrente richiesta dal carico diminuisce, PQ diminuisce e QR aumenta. Mano a mano che Q si sposta verso il "punto di funzionamento in corto circuito" ossia la corrente richiesta dal carico aumenta, PQ aumenta e QR diminuisce.

## BIBLIOGRAFIA

- Mario Pezzi Elettrotecnica Generale vol. 1 Zanichelli
- prof. Renzo Fumagalli Dispense Corso di Elettronica dei Semiconduttori
- ISHTAR - Ottobre 2003
- Raffaele Ilardo L' ELETTRICITÀ Corso teorico-pratico <http://digilander.libero.it/nick47/index.htm>