



Zeno Martini (admin)

TENSIONE E CORRENTE

1 January 2004

Articolo n° 1 su 13 del corso "[Elettrotecnica di base](#)". Vai all'[indice](#) del corso.

Paragrafi dell'articolo:

1. [Introduzione](#)
2. [Riflessioni generali sui fenomeni fisici](#)
3. [I fenomeni elettrici nella storia](#)
4. [La struttura della materia](#)
5. [Le unità di misura del S.I.](#)
6. [Corrente ed intensità](#)
7. [Potenziale elettrico e tensione](#)
8. [Potenza elettrica](#)
9. [Strumenti di misura](#)
10. [Conclusioni](#)

Introduzione

Il corso di Elettrotecnica che inizia, si prefigge di indagare e spiegare, per utilizzarle con padronanza, le leggi che regolano il funzionamento dei circuiti elettrici.

Nell' articolo d'esordio si esaminerà, con riflessioni fisiche e storiche, il percorso che ha determinato l'individuazione delle grandezze elettriche fondamentali: l'intensità di corrente e la tensione elettrica.

Una chiara coscienza del loro significato fisico, è il presupposto per capire e scegliere, senza incertezze, le strade dell'analisi e della sintesi dei circuiti elettrici.

Riflessioni generali sui fenomeni fisici

Capire i fenomeni di un qualsiasi sistema fisico significa saperne interpretare le trasformazioni, e le ragioni di esse.

Si tratta cioè di riuscire a distinguere ciò che appare *effetto* da ciò che può essere considerato *causa*, due parole che implicano una relazione, obiettivo dello studio.

Gli effetti sono ciò cui i nostri sensi (o le loro estensioni) sono immediatamente sensibili: ad esempio il calore, la luce, le variazioni di posizione e di forma dei corpi nel tempo. Le cause che li producono sono, in un certo senso nascoste, ed il compito dello studioso è individuarle ed interpretarle legandole all'effetto.

Il legame si sintetizza in formule matematiche, gli strumenti per creare modelli astratti dei sistemi fisici.

Il modello matematico consente di prevedere l'evoluzione del sistema, cioè permette di determinare, sia qualitativamente che quantitativamente, gli effetti dell'azione di cause note.

I confini tra causa ed effetto non sono però così netti: causa ed effetto si presentano sempre insieme, in un'unità inscindibile, ed il separarle è spesso una scelta, dovuta alle ragioni tecniche di un'utilizzazione pratica del fenomeno.

Si pensi al campo elettromagnetico nel vuoto: in un punto dello spazio in cui esiste un campo elettrico variabile, c'è un campo magnetico variabile che produce un campo elettrico variabile che...Un susseguirsi infinito di cause che producono effetti che diventano cause, dove non si riconosce un inizio ed una fine.

Il concetto che accomuna l'evolversi di ogni sistema fisico è l'*energia*.

Un effetto è la manifestazione di un'energia, conseguenza a sua volta di una variazione d'energia di forma diversa. L'evoluzione di un sistema, la sua vita se vogliamo, è un continuo pulsare di trasformazioni e l'energia rinnova, in chiave moderna, il mito di Proteo, il dio marino dell'antica Grecia specializzato in qualsiasi metamorfosi: animale o fiamma o vento o acqua. E' curioso come spesso capiti di trovare immagini dei nostri concetti più evoluti nelle visioni fantastiche dell'antichità.

I fenomeni elettrici nella storia

Il tema del corso è l'elettrotecnica con le sue applicazioni.

L'elettrotecnica studia ed interpreta, ai fini di una utilizzazione pratica, i fenomeni elettrici, cioè le manifestazioni energetiche associate a quella che è considerata l'intima natura della materia, cioè il suo essere composta di particelle elementari che interagiscono con forze repulsive se dello stesso tipo, attrattive in caso contrario.

E' una constatazione antica l'esistenza di questa proprietà della materia. La prima volta fu notata strofinando l'ambra, una resina fossile di colore prevalente dal giallo miele al rosso granato. In latino il nome dell'ambra, direttamente derivato dal greco, è *electrum*.

Ma per secoli il fenomeno non trovò serie e pratiche utilizzazioni.

Finché *Alessandro Volta (1745-1827)*, alla fine del XVIII secolo, costruì il primo generatore elettrico, la sua celebre pila.

Il dispositivo era in grado di creare una distribuzione non uniforme di cariche elettriche presenti in un corpo, dando origine a forze capaci di produrre un movimento di cariche in una direzione preferenziale, mantenendolo nel tempo.

Una possibilità che si dimostrò ben presto sorgente di effetti importanti che lasciavano presagire notevoli applicazioni pratiche.

Effetti legati al movimento di cariche, che si manifestarono come sviluppo di calore nei corpi materiali in cui il movimento avveniva (*effetto termico*), ma soprattutto con interazioni inaspettate con un altro fenomeno fisico noto, il magnetismo (*effetto magnetico*).

Ovviamente continuava ad essere presente il fenomeno elettrico di attrazione - repulsione tra le cariche (*effetto elettrostatico*), per il quale il fisico francese *Ch. A. Coulomb (1736-1806)* aveva già formulato la sua celebre legge, formalmente simile alla legge di gravitazione del grande *Isaac Newton (1642-1727)*, la quale stabiliva che la forza di interazione tra le cariche agiva secondo la retta congiungente il loro baricentro, era proporzionale al prodotto delle cariche ed inversamente proporzionale al quadrato della distanza dei baricentri.

Immediatamente iniziarono indagini sperimentali e costruzione di modelli teorici di interpretazione.

Nel 1826 il fisico tedesco *G.S. Ohm (1787-1854)* enunciò la sua celebre legge per i conduttori, e già nel 1820 il fisico danese *H.C. Oersted (1777-1851)* studiava l'influenza del movimento di cariche sull'ago magnetico. Il fisico francese *A.M. Ampere (1775-1836)* elaborò in quegli anni una consistente teoria dell'effetto magnetico, che *W.E. Weber (1804-1891)* completò con un'impostazione newtoniana, mentre il grande fisico inglese *M. Faraday (1791-1867)* scopriva il modo di produrre un movimento di cariche per mezzo di un campo magnetico, inseguendo l'idea che se un movimento di cariche dava luogo a forze magnetiche, in un qualche modo le forze magnetiche avrebbero dovuto produrre un movimento di cariche. La sua celebre e fondamentale legge è del 1831. Infine sempre Faraday, con una sensibilità che la sua abilità di sperimentatore rendeva sempre più immaginifica ed acuta, distaccandosi dall'impostazione di Weber, cominciò a concepire il campo di forze come una realtà fisica concreta capace di trasmettere a distanza le interazioni tra i corpi. A partire da quest'idea poderosa, il fisico teorico scozzese *J.C. Maxwell (1831-1879)* riuscì ad elaborare, nel 1873, la sua teoria dinamica del campo elettromagnetico, mostrando che non solo un movimento di cariche materiali era in grado di produrre un campo magnetico, che non solo un campo magnetico variabile produceva un campo elettrico variabile, ma che anche un campo elettrico variabile dava origine ad un campo magnetico variabile.

L'indagine conoscitiva dei fenomeni elettrici non si concluse, come ben sappiamo, con le intuizioni e le elaborazioni teoriche di Maxwell. Si può anzi affermare che da allora iniziò un vertiginoso sviluppo delle applicazioni, che è prepotentemente ancora davanti ai nostri occhi con tutte le implicazioni positive e gli inevitabili problemi.

La struttura della materia

Iniziamo allora l'indagine e la definizione delle grandezze descrittive dei fenomeni elettrici, dei modi grafici e letterali utilizzati per la loro rappresentazione matematica, delle relazioni che tra di esse intercorrono, con l'attenzione sempre rivolta alla loro matrice energetica.

Le cariche elettriche costituenti la materia sono convenzionalmente distinte in positive e negative. La più piccola carica esistente è detta carica elementare.

Le particelle che ne sono naturalmente dotate sono l'*elettrone* ed il *protone*. Le chiamiamo particelle per comodità, ma il senso che noi attribuiamo alla parola particella, non rispecchia la loro intima natura, come ormai ha dimostrato la meccanica quantistica, evidenziandone un'intrinseca ambiguità, in cui l'elettrone è un vero maestro: il dualismo onda-particella.

Le unità di misura del S.I.

Ogni grandezza fisica ha un'unità di misura, cioè esiste una grandezza dello stesso tipo cui si è attribuito convenzionalmente il valore unitario. Il valore della grandezza non è altro che il numero che esprime quante unità occorrono per costruirla. L'insieme, universalmente adottato, delle grandezze assunte come unità di misura, è il sistema internazionale (SI). Le unità di misura indipendenti tra loro e la cui scelta è sostanzialmente arbitraria, sono dette fondamentali. Quelle che si ricavano dalle fondamentali, mediante le relazioni matematiche che descrivono i fenomeni fisici in cui le grandezze intervengono, si dicono derivate. Fondamentali sono il metro [m], il chilogrammo [kg], il secondo [s], l'ampere [A], il grado Kelvin [K], la mole [mol], la candela [cd].

Tra le derivate ricordiamo l'unità di misura della forza, il newton [N] *prodotto di chilogrammo massa per metro diviso secondo al quadrato* $[N]=[kg][m][s]^{-2}$ e dell'energia, il joule [J] che è il prodotto di *newton per metro*: $[J]=[N][m]$.

L'unità di misura della carica elettrica nel SI è il Coulomb [C], una grandezza concettualmente fondamentale, ma che nel sistema SI è derivata dall'ampere, nel modo che fra poco vedremo.

La carica elementare dell'elettrone, convenzionalmente negativa, uguale in valore assoluto a quella del protone, convenzionalmente positiva, è pari a $1,602 \cdot 10^{-19}$ C.

Protoni ed elettroni formano l'atomo, i protoni la parte centrale (il nucleo), gli elettroni, in numero uguale ai protoni, la periferia. Possiamo raffigurarci gli elettroni come particelle che ruotano intorno al nucleo, i più esterni ad enormi distanze se rapportate al diametro del nucleo (decine di migliaia di volte maggiore), ma probabilmente, se li potessimo vedere, ci apparirebbero come una nebbia leggerissima che avvolge, in forme simmetriche e curiose (gli orbitali), il massiccio nucleo puntiforme. La massa del protone è $1,67 \cdot 10^{-27}$ kg, la massa dell'elettrone 1836 più piccola. Gli elettroni, pur avendo a disposizione praticamente la totalità dello spazio occupato dall'atomo, hanno una massa che è, in generale, molto meno di un duemillesimo della massa totale, se si tiene conto che nel nucleo, oltre ai protoni, ci sono i neutroni, che hanno carica elettrica nulla e massa praticamente uguale a quella dei protoni.

Eppure, questa specie di nulla, è il protagonista indiscusso dei fenomeni elettrici, e non solo di quelli.

Gli atomi si possono aggregare in molecole, e l'aggregazione di atomi o di molecole dello stesso tipo è una sostanza. La struttura è un reticolo in cui gli atomi occupano i vertici ed i cui lati sono, in un certo senso, la materializzazione delle forze che li tengono uniti, poste in essere dalle interazioni elettroniche.

Corrente ed intensità

In alcune sostanze (gli isolanti) nessun elettrone si sposta dal volume controllato dal nucleo; in altre invece gli elettroni che ne sono più distanti (*elettroni di valenza*, responsabili primari della formazione dei composti chimici) riescono a liberarsi dal vincolo che li lega ad esso, diffondendosi nel reticolo. Ciò avviene in quanto la configurazione energetica tracciata nello spazio dal reticolo atomico forma un avvallamento dove gli elettroni scivolano trovandovi libertà di movimento (la banda di valenza). L'insieme di questi elettroni liberi è come un gas. Il loro vagare attraverso il reticolo nella valle loro riservata, è rapidissimo e casuale, determinato dalla temperatura.

La fig. 1.1 mostra come potrebbe apparire il reticolo di un conduttore (le "palline" sfumate sono gli elettroni liberi, i "palloncini" colorati gli orbitali degli elettroni che avvolgono il nucleo invisibile).

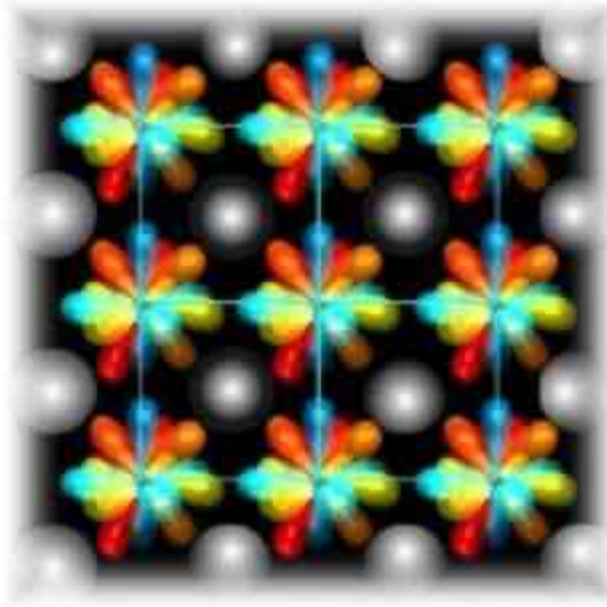


fig. 1.1

Questa specie di gas può essere messa in movimento in una direzione preferenziale, come il fluido in una tubazione. E' quel che riesce a fare il generatore elettrico, il quale non genera alcuna carica elettrica, ma crea un campo di forze che le sollecita conferendo loro l'energia potenziale che potrà trasformarsi in cinetica. Il generatore è paragonabile ad una pompa che mette in movimento le particelle di un fluido, senza crearle, come ben sappiamo. La posizione delle particelle di fluido nel campo gravitazionale determina la loro energia potenziale che potrà divenire cinetica. Il ripristino dell'energia cinetica, trasformata ad esempio in calore e lavoro, è compito della pompa nel caso del fluido, del generatore per le cariche elettriche, i quali possono rifornirsi all'esterno dei rispettivi campi che fungono, come dire, da organi di trasmissione dell'energia.

Le sostanze che dispongono di elettroni liberi sono i metalli ed è il movimento del loro insieme in una direzione determinata che chiamiamo corrente elettrica. Per questa possibilità i metalli sono detti conduttori. La corrente elettrica come cariche in movimento fu una deduzione antecedente alla scoperta dell'elettrone, avvenuta nel 1897 con gli esperimenti di J.J. Thomson (1856-1940) sui raggi catodici. Si era già ipotizzato che fossero le cariche positive a spostarsi, e si assunse allora come verso della corrente quello del loro moto d'insieme. Gli elettroni però si muovono in senso opposto, ma il verso della corrente è stato mantenuto ed è stato chiamato *verso convenzionale*.

In alcune situazioni, quelle, tra l'altro, che hanno permesso la costruzione del primo generatore, ci sono cariche positive e negative che si muovono in senso opposto dando origine ad una corrente elettrica. Succede nelle soluzioni, dove la molecola di

un sale (ad esempio il cloruro di sodio, NaCl) si scompone in *ioni positivi* (Na+) e *ioni negativi* (Cl-). Gli ioni sono atomi (o gruppi di atomi) che hanno una carenza di elettroni (ioni positivi) od un eccesso di elettroni (ioni negativi). Essi hanno perciò sempre una carica elettrica uguale o multipla della carica elementare ma, com'è facile intuire, una massa molto più grande.

Il movimento di un insieme di particelle qualsiasi, lo chiamiamo flusso e può efficacemente essere descritto dal numero di particelle che attraversano una sezione di controllo. Si impone allora l'esigenza di definirne l'intensità, una grandezza dipendente dal numero di particelle transitanti e dalla loro velocità. E' così che prende forma il primo fondamentale concetto dell'elettrotecnica, quello di intensità di corrente.

In questo caso interessa il numero di particelle cariche, meglio ancora la *quantità di elettricità* da esse trasportata. Quantità di elettricità contiene una sottile distinzione rispetto a quantità di carica, sottolineando che i fenomeni elettrici che si osservano all'esterno di un volume occupato da cariche di segno opposto, sono dovuti alla somma algebrica dei loro valori.

L'intensità di corrente è allora definita come *la quantità di elettricità che attraversa la sezione di controllo del flusso di cariche in un corpo nell'unità di tempo*, cioè:

$$I=Q/t \qquad 1.1$$

avendo indicato con t l'intervallo di tempo in cui la quantità di elettricità Q, è transitata attraverso la sezione.

Nel caso in cui, come succede nelle soluzioni elettrolitiche, transitino attraverso la sezione cariche di segno opposto in senso opposto, occorre fare la somma aritmetica dei loro valori assoluti. La somma algebrica andrebbe eseguita per cariche di segno opposto che si muovono nello stesso senso.

L'intensità di corrente è espressa da un numero relativo. Il valore assoluto è la sua misura in *ampere* che, come deducibile dalla precedente definizione, corrisponde a *coulomb diviso secondo*: $[A]=[C][s]^{-1}$. Il segno è riferito al verso convenzionale scelto preventivamente ed arbitrariamente per la corrente nel corpo in esame. Se positivo, significa che le cariche positive si muovono proprio secondo il verso prefissato o, ciò che è lo stesso, le cariche negative si muovono in senso opposto. Il contrario se il segno dell'intensità è negativo.

Occorre ora ricordare che il campione di unità di misura assunto per le grandezze elettriche nel SI, è proprio l'ampere. Le ragioni risiedono nel fenomeno fisico di riferimento che è facilmente riproducibile in ogni attrezzato laboratorio. Si chiama **ampere assoluto** ed è definito come *l'intensità di quella corrente che attraversando due fili paralleli di sezione trascurabile, di lunghezza teoricamente infinita, posti alla distanza di un metro nel vuoto, determina in essi una forza trasversale di attrazione*

(correnti equiverse) o di repulsione (correnti controverse) che, per ogni metro di lunghezza dei fili vale $2 \cdot 10^{-7}$ newton.

Si capisce allora perché il coulomb sia una grandezza derivata, chiamata ampere*secondo. Non sarà inutile ricordare che proprio un multiplo di questa grandezza è usato per definire la carica di una batteria per autoveicoli. Si parla in questo caso di ampere*ora che corrispondono a 3600 ampere*secondi cioè 3600 coulomb.

E' importante considerare anche l'intensità di corrente specifica detta densità di corrente. Essa è definita dal rapporto tra l'intensità di corrente e l'area della sezione di controllo perpendicolare al movimento delle cariche:

$$\mathbf{J}=\mathbf{I}/\mathbf{A}.$$

E' la grandezza che meglio ci informa sul grado di sollecitazione subito dal conduttore per il movimento di cariche. E' proporzionale al numero di elettroni liberi per unità di volume, alla loro comune velocità di spostamento (che è molto piccola: ordine di grandezza, dmm/s !), nonché alla carica dell'elettrone, e. Si ha

$$\mathbf{J}=\mathbf{n}*\mathbf{e}*\mathbf{v}.$$

Per il rame $n=8,5 \cdot 10^{28}$ elettroni liberi ogni metro cubo, quindi se in un conduttore la densità è di 10 A/mm^2 , si ha $v=J/(ne)=10 \cdot 10^6 / (8,5 \cdot 10^{28} * 1,602 \cdot 10^{-19})=0,7 \text{ mm/s}$.

Quanto descritto finora con parole che dovrebbero aiutare a comprendere il fenomeno visualizzandolo, come dire, agli occhi della mente, trova una sintesi matematica e grafica nella figura 1.2

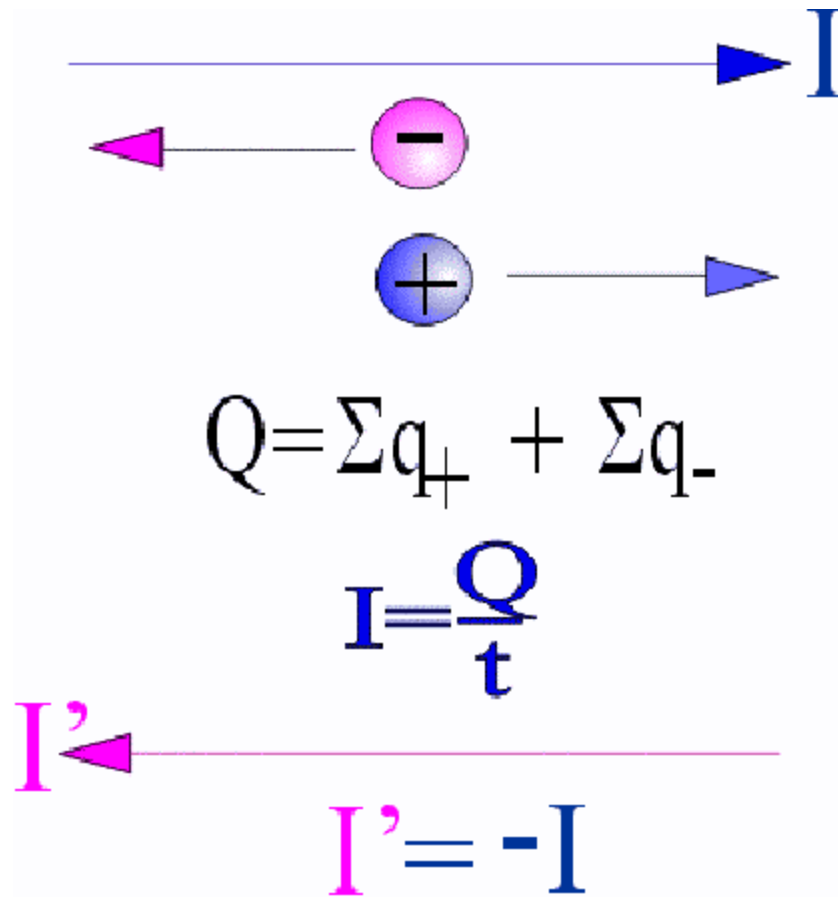


fig. 1.2

Potenziale elettrico e tensione

La causa del possibile movimento di cariche è lo stato energetico da esse assunto nei diversi punti del corpo per l'azione del generatore.

Si definisce *potenziale elettrico di un punto* l'energia che l'unità di carica positiva possiede quando si trova in quel punto. L'unità di misura del potenziale è allora il *joule diviso coulomb* e si chiama *volt*, in onore dell'inventore del primo generatore: $[V] = [J][C]^{-1}$

Il potenziale di un punto P si indica con V_P .

Ciò che conta all'interno del corpo, non è il valore assoluto dell'energia posseduta dall'unità di carica ma il suo valore relativo rispetto ad un punto del corpo, chiamato *massa*, cui convenzionalmente si attribuisce il *potenziale zero*. Il potenziale di un punto è quindi definito a meno di una costante arbitraria, che è il valore di potenziale che si può attribuire alla massa.

Gli effetti elettrici, quindi l'intensità di corrente dove sono presenti cariche libere, sono determinate dalle *differenze di potenziale* tra i punti.

Per questo la differenza di potenziale tra due punti A e B (d.d.p) è detta *tensione elettrica*; indicata con U_{AB} , è definita dalla differenza tra il potenziale del punto A meno il potenziale del punto B,

$$U_{AB} = V_A - V_B \quad 1.2$$

E' evidente che il volt è l'unità di misura anche della tensione elettrica. Il potenziale di un punto non è altro allora che la tensione tra quel punto e massa e le tensioni tra i vari punti del corpo non cambiano modificando il potenziale assoluto della massa.

Il potenziale nei diversi punti di un corpo è da attribuire all'azione del generatore.

Si definisce *forza elettromotrice (f.e.m.) di un generatore la totale quantità di energia da esso fornita all'unità di carica positiva che transita attraverso di esso*. Il simbolo comunemente usato è E . Si misura, ovviamente ancora in volt, per cui il nome di forza non deve trarre in inganno. La f.e.m. non è una forza fisica (che si misura in *newton*) ma una energia specifica. Essa crea un campo di forze che può essere considerato il serbatoio dell' energia elettrica allo stato potenziale.

La fig. 1.3 sintetizza graficamente le considerazioni esposte..

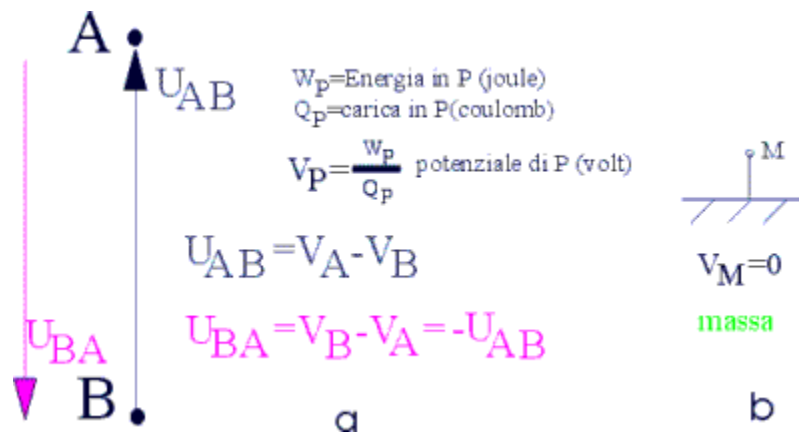


figura 1.3

La tensione è rappresentata con un segmento tra i due punti, orientato verso il potenziale minuendo dell'espressione della d.d.p. Il suo valore è un numero relativo il cui valore assoluto corrisponde alla misura in volt della tensione, cioè del lavoro che compete all'unità di carica positiva che si sposta tra i due punti. E' positivo se il potenziale di partenza è maggiore di quello d'arrivo, il che indica che le cariche positive stanno perdendo energia, quindi stanno facendo un lavoro, negativo in caso contrario, quando la carica positiva acquista energia.

Potenza elettrica

La potenza di un sistema è l'energia che esso trasforma nell'unità di tempo. Molte macchine possono fare lo stesso lavoro, ma la macchina che lo fa in meno tempo è più potente. La potenza serve quindi a caratterizzare una macchina. Il lavoro corrisponde alla variazione di energia del sistema.

E' abbastanza agevole trovare l'espressione della potenza elettrica, che non è un nuovo tipo di potenza, ma la potenza nella sua accezione generale espressa in termini di grandezze elettriche.

Quando una carica Q positiva si sposta tra due punti, se indichiamo con U la tensione tra di essi, il lavoro fatto dalla carica è, per definizione di tensione, $L=Q*U$. Se il lavoro è eseguito *nell'intervallo di tempo t* , la potenza, per definizione, è data da $P=L/t$ cioè $P=U*Q/t$. Ma Q/t è l'intensità di corrente, quindi l'espressione della potenza diventa:

$$P=U*I \qquad 1.3$$

E' stato detto che sia U che I sono grandezze algebriche e che il loro segno va riferito alla convenzione adottata per la loro rappresentazione. Anche la potenza ha dunque un segno che va riferito ad un verso che indica il flusso di energia. Il verso di riferimento del flusso di energia è quello che ha l'intensità di corrente nel punto a potenziale più alto.

La sua unità di misura è il *watt* [W] che corrisponde a *joule diviso secondo*: $[W]=[J][s]^{-1}$.

Il chilowattora [kWh] è un'unità di energia (non di potenza!, come a volte si sente dire nei media di massa) in pratica molto usata: esso corrisponde all'energia di una macchina della potenza di un kW che funziona per un'ora.

La figura 1.4 sintetizza il concetto esposto. La freccia rossa indica il verso positivo del flusso di potenza.

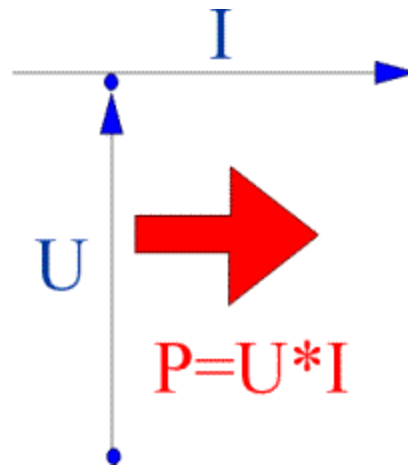


fig. 1.4

Strumenti di misura

L'intensità di corrente si misura con l'*amperometro*, uno strumento con due terminali che deve essere attraversato dalla intensità il cui verso convenzionale deve entrare dal morsetto contrassegnato per fornire una indicazione positiva. L'amperometro ideale ha una tensione nulla tra i suoi terminali ($U_A=0$). (fig. 1.5. a)

La tensione si misura con il *voltmetro* uno strumento con due terminali che devono essere collegati ai punti di cui si vuol sapere la d.d.p. Per dare una indicazione positiva il punto a potenziale più alto deve corrispondere al morsetto contrassegnato. Il voltmetro ideale non è attraversato da corrente ($I_V=0$). (fig. 1.5. b)

La potenza si misura con il *wattmetro* un quadripolo composto da un bipolo amperometrico ed uno voltmetrico. E' ideale se amperometrica e volumetrica sono ideali. (fig. 1.5. c)

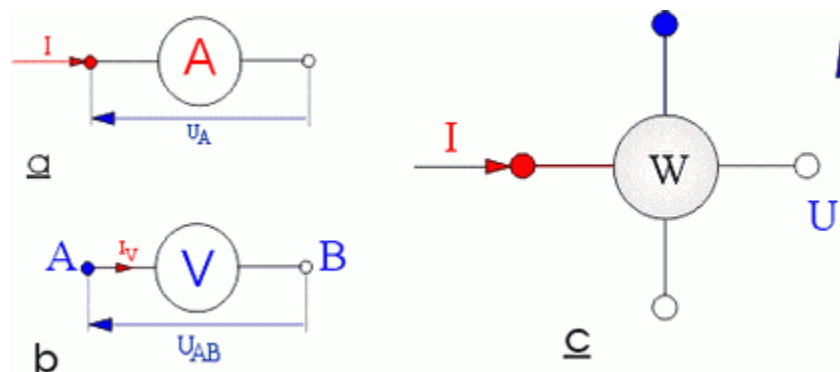


figura 1. 5

Conclusioni

All'interno di ogni sistema elettrico esiste un equilibrio dinamico tra l'energia di posizione delle cariche (potenziale, tensione) e l'energia di movimento (cinetica, corrente) mentre esso scambia energia con l'esterno (generatori ed utilizzatori con l'inevitabile produzione di energia termica).

L'Elettrotecnica studia come produrre scambi energetici nella forma desiderata stabilendo gli equilibri interni al sistema. Per farlo è necessario conoscere il comportamento elettrico di ogni componente del sistema. Ciò significa trovare il legame tra l'intensità di corrente che fluisce tra due punti per l'azione della tensione tra di essi e la tensione stessa

In pratica esplicitare la funzione

$$I=f(U)$$

per ogni di componente, che, proprio perché la tensione coinvolge due punti (poli), si chiama bipolo.

Quanto sopra sarà oggetto degli articoli che seguiranno nei prossimi numeri