

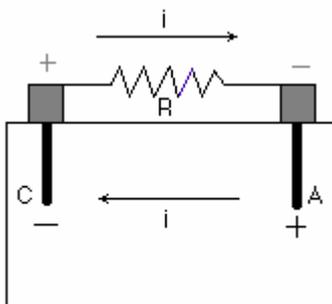
GENERATORI DI TENSIONE E FORZA ELETTRICITÀ

di Ezio Fornero

Processi fisici interni a un generatore di tensione

La corrente elettrica continua che percorre un circuito è solitamente prodotta da un generatore di tensione, che mantiene una differenza di potenziale permanente tra due elementi metallici, detti *elettrodi*. Di solito, con questo termine si indica una batteria (o una pila), vale a dire una soluzione elettrolitica nella quale sono parzialmente immersi i due elettrodi (detti anche *poli* o *morsetti*) contenuta in un recipiente isolante. Volendo essere precisi, questa è la struttura di una singola “cella” elettrolitica. La batteria (o pila) è una serie di celle elettrolitiche, e la tensione che essa fornisce è la somma delle tensioni fornite dalle singole celle. La differenza di potenziale tra gli elettrodi è creata dai processi elettrochimici (reazioni di ossido-riduzione) interni alla batteria.

La corrente elettrica non è limitata alla sola parte esterna del circuito, ma prosegue all'interno della soluzione elettrolitica; se così non fosse, il passaggio della corrente elettrica neutralizzerebbe in breve tempo le cariche dei morsetti annullando la differenza di potenziale. In effetti, lo stesso termine “circuito elettrico” sta a indicare che il percorso delle cariche elettriche è una traiettoria chiusa, con ritorno al punto di partenza. Questo pone un problema; affinché le cariche ritornino all'elettrodo positivo, è necessario che all'interno della batteria il verso della corrente sia opposto a quello esterno (dal meno al più). Ciò significa che la polarità dei due elettrodi, considerata all'interno, deve essere opposta a quella esterna (di solito, il segno dei poli riportato nello schema dei circuiti è quello esterno). Si parla quindi di *inversione di polarità*. Ci si può chiedere come sia possibile che uno stesso elettrodo possa essere positivo esternamente e negativo internamente, o viceversa.



C = catodo (elemento negativo all'interno della soluzione); A = anodo (elemento positivo all'interno).

Per chiarire questo punto, è necessario esaminare il funzionamento del generatore. La soluzione elettrolitica (p.es. H_2SO_4 in H_2O , con dissociazione in H^+ e HSO_4^- e ancora di HSO_4^- in H^+ e SO_4^{2-}) è un insieme di ioni positivi e negativi che indichiamo rispettivamente con X^+ e Y^- i quali si muovono attraverso un solvente neutro e poco dissociato, come p.es. l'acqua. Perciò la corrente interna al generatore è una *corrente ionica* e non elettronica e ad essa contribuiscono anche cariche di segno positivo. Gli ioni X^+ si muovono verso l'elettrodo detto *catodo* e gli Y^- verso l'*anodo*. Quindi, l'anodo è positivo rispetto alla soluzione, e il catodo è negativo. All'esterno, la polarità è opposta, e quindi la corrente elettronica va dal catodo all'anodo e quella ionica dall'anodo al catodo. L'inversione di polarità significa solo che la corrente è circolare con ritorno al punto di partenza. I due elettrodi hanno composizione chimica diversa; perciò sono diverse le reazioni chimiche tra ciascuno di essi e l'acido in soluzione, il cui effetto è di caricarli in modo opposto. Se i due elettrodi sono collegati da un conduttore esterno, le cariche negative depositate sull'anodo

Ezio Fornero – *Generatori di tensione e Forza elettromotrice* – 1/4

<http://www.superzeko.net> – Per espressa volontà dell'autore, questo testo è liberamente utilizzabile per fini personali o didattici.

Qualora tuttavia dovesse essere riprodotto su un sito web o in una pubblicazione, si prega di citare la fonte.

vengono trasferite, sotto forma di elettroni, al catodo, che le cede agli ioni X^+ , neutralizzandoli. Allo stesso modo, si neutralizzano gli ioni Y^- . Perciò, il generatore funziona finché la soluzione elettrolitica contiene ioni positivi e negativi, e infatti la durata delle pile è di solito limitata nel tempo. (Perché funzioni per un tempo indefinito, bisogna *ricaricare* la batteria, cioè ristabilire la tensione tra i due elettrodi, il che è possibile nel caso degli *accumulatori* come quelli delle automobili).

Forza elettromotrice e differenza di potenziale

Per definizione, la forza elettromotrice di un generatore di tensione (simbolo: f.e.m. o semplicemente f) è la *differenza di potenziale tra i suoi elettrodi misurata a circuito aperto* (cioè, quando i morsetti non sono collegati da un conduttore. Quindi, non passa corrente e la resistenza è infinita. Un circuito si dice invece *chiuso* se gli elettrodi sono collegati e passa corrente). La f si misura in Volt come tutte le tensioni elettriche e non è in realtà una forza nel senso della Dinamica, nonostante il nome.

La forza elettromotrice è una caratteristica del generatore, perché dipende dalle reazioni elettrochimiche che avvengono al suo interno, e che tendono a mantenerla costante nel tempo, almeno finché vi sono ioni nella soluzione elettrolitica; perciò, il suo valore *non dipende* dal fatto che i morsetti siano collegati esternamente.

Se invece i due morsetti sono collegati, si nota che la loro differenza di potenziale V è *sempre minore della f.e.m.*; cioè, *la tensione fornita dal generatore a circuito chiuso è minore di quella fornita a circuito aperto*. Si può esprimere questa differenza (che generalmente è molto piccola) mediante la disuguaglianza

$$f \geq V$$

L'uguaglianza vale solo nel caso limite del circuito aperto.

Si può interpretare la forza elettromotrice in base alla 1^a legge di Ohm.

Se includiamo anche il passaggio della corrente all'interno del generatore, dobbiamo considerare non solo la resistenza "esterna" R al generatore, ma anche quella "interna" r (di solito, r è molto minore di R ; in un normale generatore, deve essere inferiore a 1Ω).

Infatti, gli ioni in moto nella soluzione elettrolitica sono ostacolati dalle molecole del solvente, che ne limitano la mobilità, e ciò costituisce l'origine della resistenza interna.

Dato che R e r sono in serie, la resistenza totale del circuito sarà $R_{TOT} = R + r$. In pratica, R è di solito molto maggiore di r e quindi quest'ultima viene spesso ignorata. Applicando la legge di Ohm e includendo la resistenza interna, la tensione totale del generatore deve essere data dal prodotto della resistenza totale per la corrente

$$R_{TOT} \cdot i = R i + r i$$

La tensione totale è proprio la forza elettromotrice, mentre il termine $R i$ è la tensione effettivamente fornita dal generatore, cioè la componente associata alla corrente nel circuito esterno, mentre $r i$ corrisponde alla corrente all'interno del generatore. Il prodotto $R i$ è detto semplicemente *differenza di potenziale* (d.d.p.) e quindi si ottiene l'equazione

$$f = V + r \cdot i$$

dalla quale si deduce che è sempre $f \geq V$, a meno che la corrente non sia nulla (circuito aperto), coerentemente con la definizione di forza elettromotrice, nel qual caso f coincide con V .

Bisogna tener presente che la vera caratteristica del generatore è f , mentre $V = f - r i$ evidentemente dipende dall'intensità della corrente i ; però, come abbiamo visto di solito r è trascurabile rispetto alla resistenza esterna R , e quindi anche facendo variare la corrente non si nota una diminuzione della differenza di potenziale. E' comunque possibile collegare i due morsetti con un filo a resistenza bassissima, minore anche della resistenza interna del generatore; un collegamento a resistenza (quasi) nulla è detto *cortocircuito*. In tal caso, la d.d.p. tende a zero e la corrente è data da

$$i = \frac{f}{r}$$

essendo anche r molto piccola, la *corrente di cortocircuito* (cioè la corrente massima che la batteria potrebbe fornire, limitata solo dalla sua resistenza interna) è estremamente elevata (una normale batteria d'auto può fornire correnti di cortocircuito superiori a 100 A).

Quando si considera la resistenza interna, la legge di Ohm viene scritta anche come

$$i = \frac{f}{R+r}$$

Forza elettromotrice e lavoro

Esiste una seconda interpretazione della forza elettromotrice, derivata dal lavoro delle forze elettriche.

Per spostare le cariche elettriche lungo tutto il circuito (interno compreso), si deve fare un lavoro *ciclico*, cioè calcolato su tutto il percorso chiuso della carica elettrica. Questo lavoro serve per superare le resistenze incontrate dalle particelle (elettroni all'esterno, ioni all'interno) che trasportano la carica. Indichiamo con L_C il lavoro ciclico compiuto su una certa quantità di carica (questo lavoro non è prodotto dal campo elettrico, che è conservativo; l'energia trasmessa alle cariche deriva dai processi interni al generatore, che non sono conservativi). L_C è la somma di un lavoro fatto sugli elettroni di conduzione nella parte esterna del circuito (lavoro "*esterno*" = L_E) e di uno fatto sugli ioni della soluzione elettrolitica (lavoro "*interno*" = L_I), quindi

$$L_C = L_E + L_I$$

Se si divide un lavoro per una carica elettrica, si ottiene una tensione elettrica; quindi, dividendo tutti i lavori per la stessa quantità di carica, si ottiene una equazione tra tensioni elettriche. Si può identificare il rapporto tra L_C e q con la forza elettromotrice f , e quello tra L_E e q con la differenza di potenziale V . L'ultimo termine si può scrivere come $r \cdot i$ (per la legge di Ohm, una resistenza per una corrente equivale a una tensione).

In questo modo si ottiene di nuovo la relazione

$$f = V + r i$$

definita come *legge di Ohm generalizzata*.

Questo procedimento evidenzia la vera differenza tra *forza elettromotrice* e *differenza di potenziale*. In linea di principio, si parla di differenza di potenziale in presenza di campo elettrico *conservativo*, quale effettivamente è quello all'interno del conduttore che unisce i due elettrodi. Per definizione, una forza è detta *conservativa* se il lavoro da essa compiuto non dipende dalla traiettoria dell'oggetto (in questo caso, la carica elettrica) su cui agisce, ma solo dalla posizione iniziale e da quella finale, per cui *il lavoro di una forza conservativa su un percorso chiuso è sempre nullo*.

Perciò un campo elettrico conservativo non può – per definizione – generare un lavoro ciclico positivo, che deve essere compiuto da forze non conservative: e infatti l'energia elettrica è prodotta

dalle reazioni di ossido-riduzione tra gli elettrodi e la soluzione elettrolitica. Questi processi elettrochimici mantengono costante la forza elettromotrice tra gli elettrodi; il campo elettrico che genera la corrente elettronica nel circuito esterno è una conseguenza della tensione tra gli elettrodi prodotta da forze non conservative. L'uso del termine "forza elettromotrice" evidenzia proprio questo carattere di non conservatività delle forze operanti all'interno del generatore che sono all'origine della corrente elettrica.