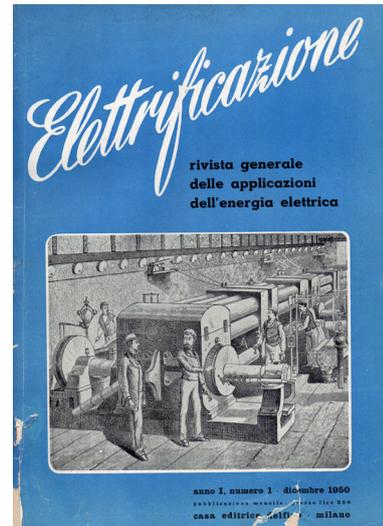


# RIPASSIAMO LE BASI DELL'ELETTROTECNICA

L'articolo offre un quadro completo ed aggiornato delle leggi che regolano l'elettrotecnica, leggi che anche un tecnico pratico, quale può essere un installatore, non può esimersi dal conoscere per svolgere razionalmente il proprio lavoro. Parte settima: pile e accumulatori.



## 7.1 - Forza elettromotrice di contatto

*Due corpi metallici di natura diversa posti a contatto tra loro danno origine ad una forza elettromotrice di contatto (effetto Volta).  
Il valore di questa f. e. m. può variare tra 0,1 e 2,5 V circa, a seconda della natura dei metalli.*

Quando due corpi metallici di natura diversa vengono posti a contatto tra loro danno origine ad una forza elettromotrice costituendo così un particolare tipo di generatore.

Questo fenomeno, detto effetto Volta (1745-1827) in onore del suo scopritore, dipende unicamente dalle caratteristiche atomiche dei metalli e dal modo in cui sono distribuiti al loro interno gli elettroni, mentre il valore della f.e.m. dipende dal potenziale voltaico dei due metalli a contatto.

La f.e.m. che si manifesta tra due metalli qualsiasi è data dalla differenza tra i loro potenziali voltaici così come illustrato in figura 7.1.

La figura 7.2 riporta i potenziali voltaici di alcuni metalli rispetto al rame per il quale si è assunto convenzionalmente il potenziale zero.

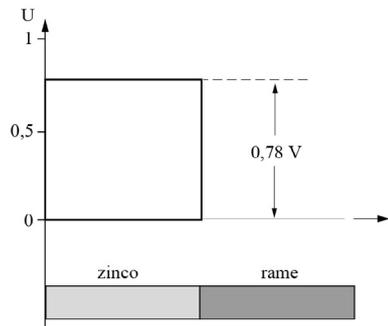


Figura 7.1 - Rappresentazione dell'effetto Volta tra due metalli.

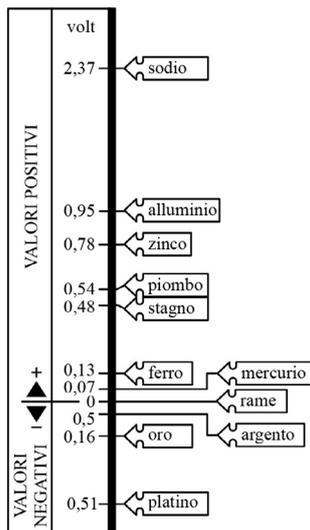


Figura 7.2 - Potenziale, rispetto al rame.

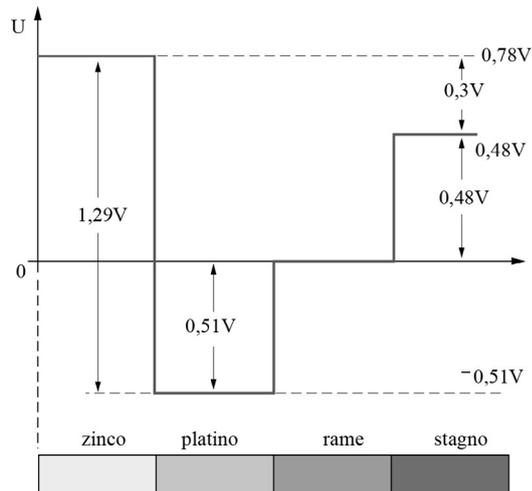


Figura 7.3 - Andamento dell'effetto Volta tra catene di metalli, di alcuni metalli.

Se invece di due metalli se ne collegano in serie parecchi, l'andamento del grafico dei potenziali può subire ampie variazioni, ma tra il primo e l'ultimo metallo la f.e.m. risultarne sarà sempre quella che si avrebbe se detti metalli fossero in contatto diretto (Figura 7.3); ne consegue, quindi, che se i due metalli posti all'estremità di una catena sono uguali, la f.e.m. risultante è sempre nulla.

## 7.2 - Pile voltaiche

*La pila voltaica è una sorgente di forza elettromotrice che sfrutta l'effetto Volta ottenibile da una successione di piastre di rame zinco rame con l'interposizione, in una giunzione, di una soluzione elettrolitica.*

*La f.e.m. disponibile tra le due piastre di rame è di 1,08 V.*

Per poter sfruttare la f.e.m. di contatto, occorre disporre di un elemento che consenta di collegare due metalli fra loro senza che si verifichi l'effetto Volta, in modo che la f.e.m. globale che si genera non rimanga annullata: ciò può essere ottenuto interponendo, in una giunzione, una soluzione elettrolitica la quale ha la proprietà di avere un potenziale piccolo rispetto a qualsiasi metallo.

Inserendo la soluzione elettrolitica tra rame e zinco si può rilevare che non si manifesta più la differenza di potenziale di 0,78 V, anzi vi è il potenziale di -0,3 V dovuto alla soluzione elettrolitica stessa.

Se al di là dello zinco si pone ancora del rame, si ha l'effetto Volta, quindi 0,78 V: ne risulta quindi che fra le due estremità di rame (ossia dello stesso metallo) esiste una f.e.m. di 1,08 V.

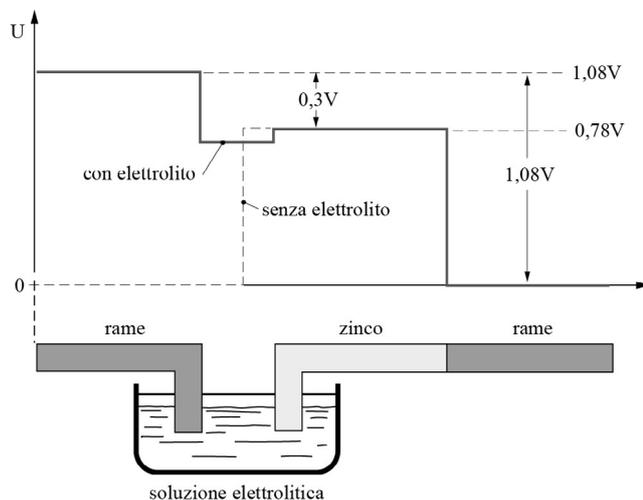


Figura 7.4 - Andamento dell'effetto Volta in presenza di una soluzione elettrolitica.

L'apparecchio descritto si comporta come un generatore elettrico e su un circuito esterno chiuso si ha passaggio di corrente.

Dato il basso valore delle f.e.m. che si possono ottenere, di norma si effettua il collegamento in serie di più elementi voltaici.

Si è visto come una pila sia realizzata in modo del tutto analogo al voltmetro descritto al paragrafo 6.2. Se ne può quindi dedurre che, anche nel caso delle pile, si verificherà il fenomeno della polarizzazione del quale si è parlato al paragrafo 6.5, fenomeno che tende a ridurre se non ad eliminare la f.e.m. di contatto prodotta dalla pila, impedendone il funzionamento come generatore.

Per evitare questo inconveniente, che renderebbe brevissimo il periodo di funzionamento, in ogni pila vengono immerse delle sostanze depolarizzanti le quali tendono ad eliminare il velo di idrogeno che si forma attorno all'anodo. In genere si tratta di composti chimici che producono ossigeno il quale, reagendo con l'idrogeno, produce acqua che rimane assieme a quella già esistente nella soluzione.

I diversi tipi di pila realizzati si differenziano principalmente per il depolarizzante usato e per il modo con il quale esso è posto a contatto con l'anodo. Di uso più frequente sono il solfato di rame, l'acido cromatico, il biossido di manganese, il bicromato di potassio e altri composti ricchi di ossigeno. Essi vengono posti attorno all'anodo in un sacchetto di tela in modo che non si possano disperdere entro la soluzione elettrolitica.

Nonostante questi accorgimenti, la pila ha però sempre una vita limitata e deve essere sostituita quando la d.d.p. ai suoi morsetti tende a ridursi bruscamente.

Particolarmente diffuse sono le piccole pile a secco, usate per radioricevitori a transistori, lampade portatili, giocattoli ecc.. Queste pile, che più propriamente si dovrebbero chiamare pile a liquido immobilizzato, sono derivate dalla pila Leclanché.

In particolare, nella pila di tipo piatto la disposizione dei vari elementi può essere quella schematizzata nella figura 7.5. I due elettrodi sono costituiti da due piastrine di cui una in carbone (catodo) e l'altra di zinco (anodo) tra le quali sono interposti il separatore e l'elettrolita (soluzione di cloruro d'ammonio immobilizzata su carta

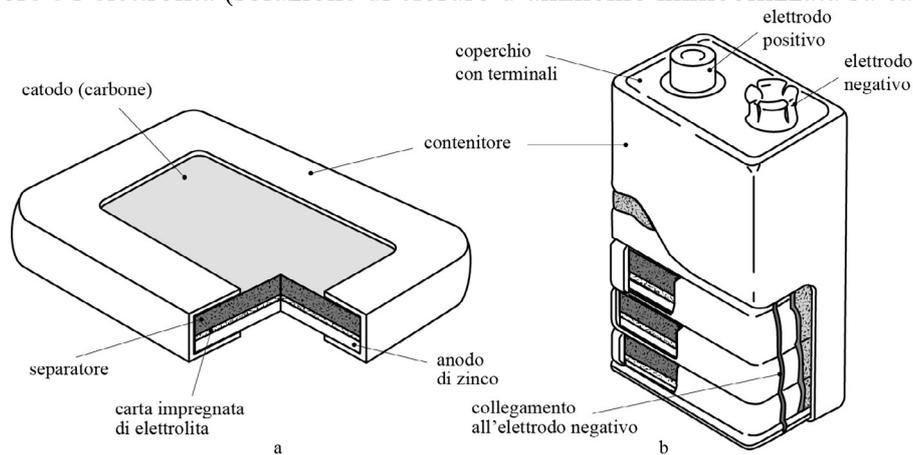


Figura 7.5 - Pila a secco da 9 V costituita da 6 celle piatte tipo Leclanché collegate in serie:  
a - sezione di una cella elementare;  
b - sezione della pila.

speciale); il contenitore che avvolge la parte attiva è in plastica. La pila viene poi racchiusa in un contenitore ermetico per evitare che l'elettrolita possa evaporare.

Su questo principio si basano anche le pile a secco di forma e dimensioni diverse.

Le pile a secco tipo Leclanché hanno una f.e.m. di  $1,5 \div 1,6$  V, quando sono nuove e  $1,4 \div 1,5$  V quando sono prossime alla scarica completa; l'energia si aggira tra  $0,1 \div 0,2$  Wh per centimetro cubo di cella.

### 7.3 - Pile termoelettriche

*La pila termoelettrica è una sorgente di forza elettromotrice formata da due metalli (o leghe metalliche) diversi sotto forma di fili aventi una giunzione calda e una fredda.*

I potenziali di contatto fra metalli dei quali si è parlato nel paragrafo 7.1 variano leggermente se si modifica la temperatura del loro punto di congiunzione: si tratta di pochi millivolt per alcune centinaia di gradi centigradi. Se perciò si realizza un circuito chiuso formato da due fili di metallo saldati fra loro e si varia la temperatura di una delle estremità, si può osservare una circolazione di corrente che indica come nel circuito stesso si generi una forza elettromotrice: il complesso così realizzato si chiama pila o coppia termoelettrica. La f.e.m. termoelettrica può essere sfruttata per realizzare un termometro a coppia, costituito da due conduttori diversi saldati ad una estremità (giunzione calda) e con l'altra estremità mantenuta a temperatura costante (ad esempio, quella del ghiaccio fondente) (Figura 7.6).

La f.e.m. che si genera è circa proporzionale alla differenza di temperatura esistente fra i due punti.

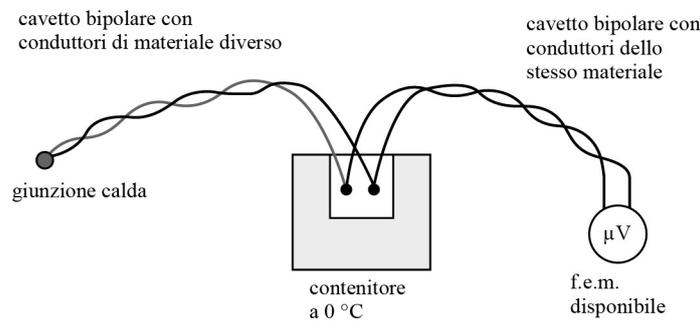


Figura 7.6 - Coppia termoelettrica costituita da due conduttori diversi con le due estremità in due punti a temperatura diversa.

## 7.4 - Accumulatori elettrici

*L'accumulatore elettrico è un voltmetro nel quale il passaggio di corrente provoca una polarizzazione degli elettrodi tale da poter essere successivamente utilizzata per ottenere una corrente di scarica.*

*Nel funzionamento di un accumulatore si distinguono due fasi: una di carica, durante la quale si fornisce energia elettrica per la polarizzazione degli elettrodi (trasformazione di energia elettrica in energia chimica) e una di scarica, durante la quale l'energia chimica raccolta sugli elettrodi viene restituita sotto forma di energia elettrica.*

Come si è visto al paragrafo 6.5, in un voltmetro è presente una f.c.e.m, la cui esistenza può essere accertata chiudendo in corto circuito gli elettrodi fra di loro, dopo averli separati dal circuito che li alimenta. Si può allora constatare che si verifica una corrente di scarica che si annulla non appena la polarizzazione scompare, ossia appena è scomparso il velo di bollicine formatosi intorno all'anodo e al catodo.

Se il fenomeno della polarizzazione viene reso più profondo e duraturo, si realizza un apparecchio che rappresenta una sorgente di f.e.m. e quindi di energia elettrica a spese dell'energia chimica.

Affinché il fenomeno sia industrialmente utilizzabile occorre, però che esso possa dar luogo ad una corrente di una certa intensità e durata che si può ottenere solo se l'azione prodotta sugli elettrodi nella fase di polarizzazione avviene su una superficie molto ampia.

Questo è in sintesi ciò che si verifica negli accumulatori elettrici, apparecchi che forniscono energia elettrica a spese di energia chimica accumulata sugli elettrodi dal passaggio di una corrente elettrica di carica.

Le grandezze che caratterizzano un accumulatore sono molteplici, tra quelle elettriche si possono evidenziare:

- *tensione nominale*, è la tensione disponibile, a circuito aperto, tra i morsetti di un accumulatore;
- *tensione di fine carica*, è la tensione che si misura tra i morsetti, a circuito chiuso, al termine della carica dell'accumulatore;
- *tensione di fine scarica*, è la tensione che si misura tra i morsetti, a circuito chiuso, al

termine della scarica dell'accumulatore;

- *capacità*, è la quantità di elettricità che si può ottenere da un accumulatore in fase di scarica dopo averlo caricato a fondo. Normalmente essa viene indicata in amperora, tuttavia questo dato da solo non è sufficiente a definire le caratteristiche di un accumulatore poiché la capacità varia con l'intensità della corrente di scarica e quindi con la durata necessaria per giungere ad una scarica completa. Il valore che viene normalmente fornito dai costruttori è quello della capacità nominale, riferita ad una scarica in 10 ore;
- *rendimento di energia*, è dato dal rapporto tra l'energia erogata durante la scarica e quella necessaria per la ricarica dell'accumulatore.

Gli accumulatori elettrici possono essere di diversi tipi; è comunque possibile attuare una suddivisione in due grandi categorie: quelli acidi o al piombo e quelli alcalini.

## 7.5 - Accumulatori al piombo

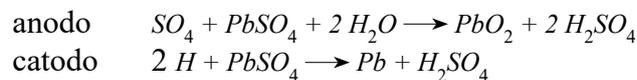
*L'accumulatore acido al piombo è un voltmetro costituito da un recipiente isolante contenente una soluzione di acido solforico nella quale sono immerse due piastre di piombo.*

*La f.e.m. disponibile è di circa 2 V.*

Gli accumulatori al piombo sono costituiti essenzialmente da una cella elettrolitica contenente una soluzione di acqua e di acido solforico nella quale sono immersi due elettrodi di piombo.

La presenza dell'acido, che reagisce con il piombo, provoca la formazione su entrambi gli elettrodi di un leggero strato di solfato di piombo ( $PbSO_4$ ), mentre il resto dell'acido si dissocia in  $H^+$  ed  $SO_4^{--}$ .

Se si collegano gli elettrodi ad un generatore di corrente continua, l'accumulatore si comporta come un normale voltmetro (Figura 7.7a): con il circolare della corrente gli anioni  $SO_4^{--}$  si dirigono verso l'anodo ed i cationi  $H^+$  verso il catodo dove reagiscono con il solfato di piombo dando luogo a biossido di piombo ( $PbO_2$ ) di colore rossiccio all'anodo e piombo metallico spugnoso al catodo, secondo le due reazioni chimiche seguenti (gli ioni non recano il segno delle cariche poiché le reazioni segnate avvengono dopo che l'elettrodo ha raccolto le cariche elettriche):



Il fenomeno descritto avviene durante la cosiddetta fase di carica dell'accumulatore e continua sino a quando gli ioni non trovano più solfato di rame con cui combinarsi. Da questo momento in poi ogni ulteriore apporto di energia elettrica provocherebbe, oltre al riscaldamento della cella per effetto Joule, solo l'elettrolisi dell'acqua contenuta nella soluzione elettrolitica con conseguente sviluppo di bollicine di idrogeno e di ossigeno.

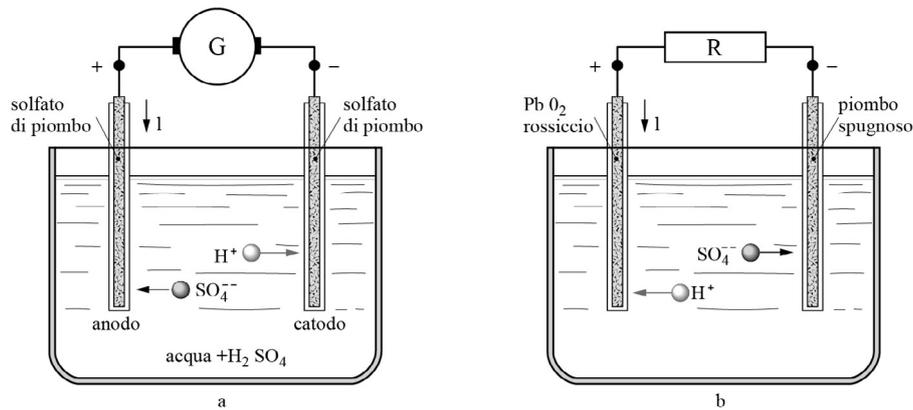
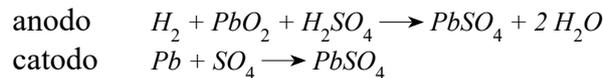


Figura 7.7 - Processo di carica e di scarica di un accumulatore elettrico al piombo:  
a - carica;  
b - scarica.

Si osservi che, durante la carica, sia all'anodo che al catodo si produce dell'acido solforico che, aggiungendosi a quello già esistente nel voltmetro, ha l'effetto di aumentare la densità della soluzione.

A carica ultimata, se si collegano gli elettrodi ad un circuito esterno (Figura 7.7 b), l'accumulatore è in grado di fornire energia elettrica. La corrente fluisce in senso opposto a quello della fase di carica mentre si verifica un processo chimico inverso a quello precedentemente descritto: gli ioni H<sup>+</sup> andranno verso l'elettrodo positivo di ossido e gli ioni SO<sub>4</sub><sup>-</sup> verso quello negativo di piombo, provocando le seguenti reazioni di scarica:



A scarica ultimata le piastre risultano nuovamente formate da solfato di piombo e la soluzione si è diluita come all'inizio.

Teoricamente, un accumulatore, una volta che è stato posto in servizio, potrebbe essere caricato e scaricato in continuazione senza apporto di nuovo materiale: in pratica c'è invece bisogno di una certa manutenzione per mantenere la densità dell'elettrolita al valore ottimale a causa del fenomeno di evaporazione dell'acqua.

Da quanto detto appare evidente che un accumulatore è in grado di fornire, durante la scarica, tanta più energia quanto maggiore è la superficie degli elettrodi che è stata intaccata dall'acido con formazione di solfato di piombo.

### Caratteristiche costruttive

Gli accumulatori sono generalmente formati da un contenitore isolante (plastica o vetro) entro il quale si pongono le piastre di piombo (Figure 7.8 e 7.9). Per ottenere una maggiore capacità si usano più elettrodi positivi e negativi inseriti alternativamente in modo che essi abbiano entrambe le superfici affacciate (Figura 7.10). Nella parte superiore le piastre positive sono collegate tra loro in parallelo così come quelle negative (Figure 7.10 e 7.11).

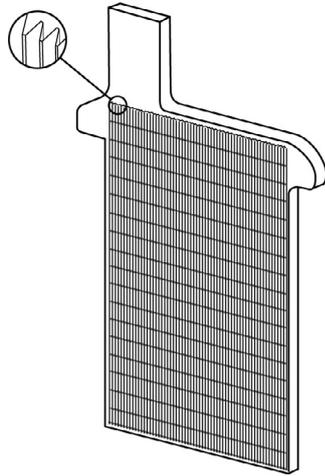


Figura 7.8 - Piastra tipo Planté per accumulatori al piombo.

Per ridurre il valore della resistenza interna dell'accumulatore è opportuno che le piastre siano molto vicine tra loro (qualche millimetro) ed è quindi necessario evitare che avvengano contatti accidentali che porterebbero al corto circuito con distruzione dell'accumulatore. A questo scopo si inseriscono fra le piastre dei separatori di materiale isolante (fogli di materiale plastico poroso ecc.). Inoltre, dato che la piastra positiva è soggetta a reazioni chimiche che potrebbero incurvarla se avvenissero in misura diversa sulle due facce, ogni gruppo termina sempre con una piastra negativa per cui queste ultime sono di una unità in più di quelle positive (Figura 7.10).

### Tensioni a vuoto e a carico

Un accumulatore al piombo fornisce una f.e.m. di circa 2 V che, nella maggior parte dei casi, risulta insufficiente per le varie applicazioni: per questo motivo si effettua il collegamento in serie di più elementi, ottenendo quella che si chiama comunemente una batteria.

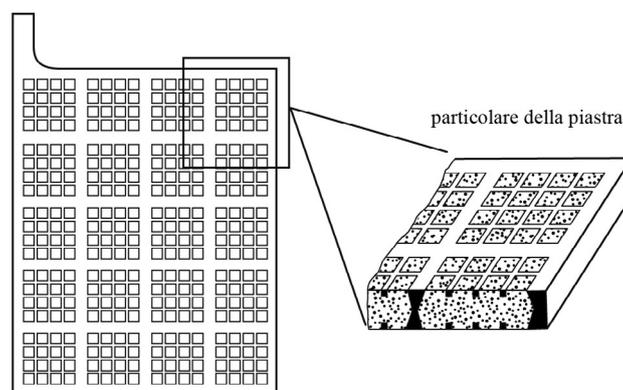


Figura 7.9 - Piastra negativa tipo Faure per accumulatori al piombo.

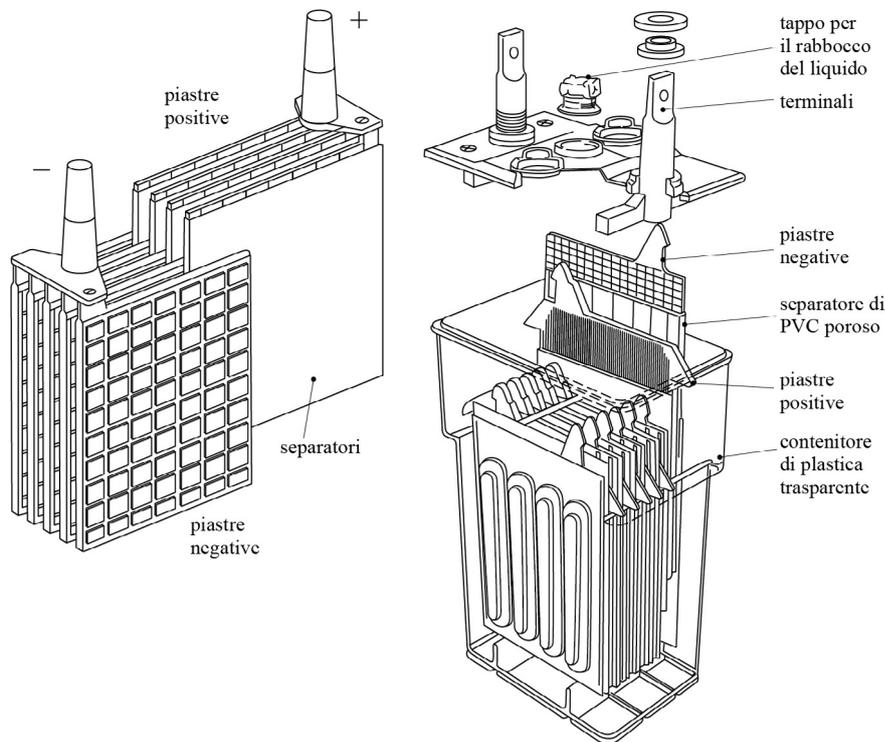


Figura 7.10 - Disposizione delle piastre all'interno di un accumulatore al piombo.

Figura 7.11 - Vista in sezione di un accumulatore al piombo.

Il valore di 2 V è quello che si misura a circuito aperto indipendentemente dalle condizioni di carica dell'accumulatore, per cui l'impiego di un voltmetro, quando non c'è erogazione di corrente, non può dare una indicazione sullo stato di carica. Se invece vi è erogazione o assorbimento di corrente, la f.e.m. ai morsetti varia notevolmente, come si può vedere dai grafici di carica e di scarica della figura 7.12. Durante la scarica si ha per l'80% della capacità, una f.e.m. di 1,95 V circa che, verso la fine, diminuisce: quando si giunge a 1,8 V la scarica risulta praticamente completata. Prolungare ulteriormente la scarica potrebbe danneggiare irreparabilmente l'accumulatore poiché la formazione di solfato avviene in forma cristallina, che non è più in condizioni di reagire nuovamente rendendo quindi impossibile l'ulteriore ricarica.

Durante la carica la tensione necessaria è inizialmente di 2,2 V mentre deve assumere un valore di circa 2,7 V a fine carica. Ciò avviene se il tempo di carica è di  $5 \div 10$  ore.

Come si è detto in precedenza, la densità dell'elettrolito varia con la carica, per cui questo dato costituisce l'elemento più significativo per individuare lo stato di carica di un accumulatore: la densità varia fra 1,1 (elemento scarico) ed 1,25 (elemento carico), a seconda del tipo di accumulatore.

Per evitare che questi valori di densità vengano modificati, con pregiudizio per un buon funzionamento, se il livello dell'elettrolita è troppo basso e tale da non ricoprire le piastre, occorre aggiungere alla soluzione solo acqua distillata, ossia acqua pura priva di qualsiasi sale che potrebbe dar luogo a reazioni secondarie dannose.

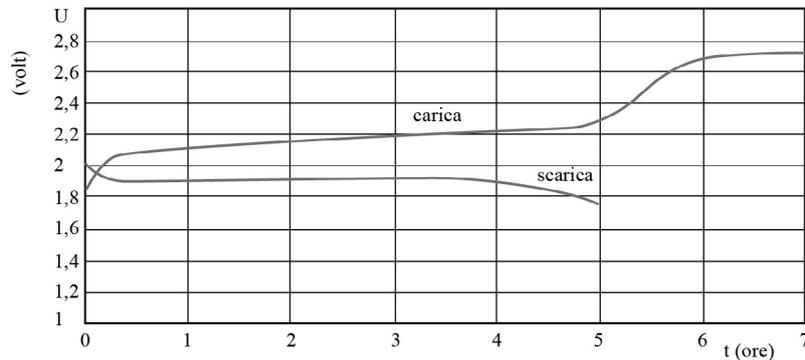


Figura 7.12 - Andamento delle tensioni di carica e di scarica in funzione del tempo di un accumulatore al piombo.

## 7.6 - Accumulatori alcalini

*L'accumulatore alcalino è un voltmetro costituito da un recipiente isolante contenente una soluzione di idrossido di potassio nel quale è immersa una coppia di elettrodi che possono essere al ferronichel, ai nichel-cadmio, allo zinco-nichel e all'argento-zinco.*

Rientrano nella categoria degli accumulatori alcalini quelli al ferro-nichel, al nichel-cadmio, allo zinco-nichel e all'argento-zinco. Elemento comune ai quattro tipi di accumulatori è la soluzione elettrolitica di tipo alcalino.

Questi accumulatori, pur essendo più costosi e meno diffusi dei tipi ai piombo, presentano rispetto ad essi, alcune caratteristiche che li fanno preferire in alcune applicazioni: sono più leggeri, più robusti, richiedono una manutenzione minore, reggono bene qualsiasi regime di scarica e alcuni di essi possono essere costruiti in forma miniaturizzata. Di seguito si forniscono alcune informazioni sui tipi al ferronichel e al nichel-cadmio in quanto, tra gli accumulatori alcalini, sono i più importanti e i più diffusi.

### Accumulatori al ferro-nichel

Sono stati ideati da Edison (1847-1931) all'inizio del secolo e sono costituiti da un recipiente di acciaio nichelato contenente una soluzione al 20% circa di idrossido di potassio ( $KOH$ ) nella quale sono immersi gli elettrodi formati da griglie di acciaio nichelato. La piastra positiva (anodo) è riempita con un impasto di ossido di ferro.

Durante la carica l'ossido si trasforma in ferro spugnoso e l'ossigeno passa all'anodo che si trasforma in perossido di nichel ( $Ni_2O_3$ ): nella scarica avviene il processo inverso.

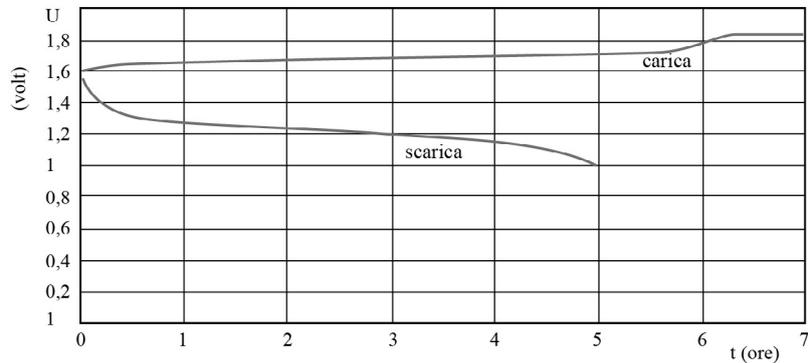
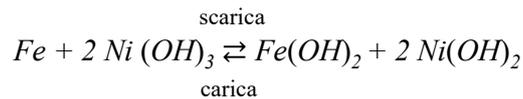


Figura 7.13 - Andamento delle tensioni di carica e di scarica in funzione del tempo di un accumulatore alcalino al ferro-nichel.

In termini semplificati le reazioni chimiche che si manifestano possono essere espresse dalla seguente equazione:



A differenza di quanto accade negli accumulatori al piombo, in questo caso l'elettrolita non interviene direttamente nella reazione, ma si limita solo a fungere da veicolo agli ioni di ossigeno per cui la sua concentrazione non cambia.

Nella figura 7.13 sono riportati gli andamenti tipici delle tensioni di carica e scarica degli accumulatori al ferro-nichel; come si può rilevare la f.e.m. media disponibile durante la scarica è intorno a 1,2 V.

La capacità specifica (per unità di peso) di questi accumulatori è sensibilmente superiore a quella dei tipi al piombo, ma essi presentano un rendimento energetico di appena il 50% a causa di una più elevata resistenza interna e della maggiore differenza tra i valori medi delle tensioni di carica e scarica.

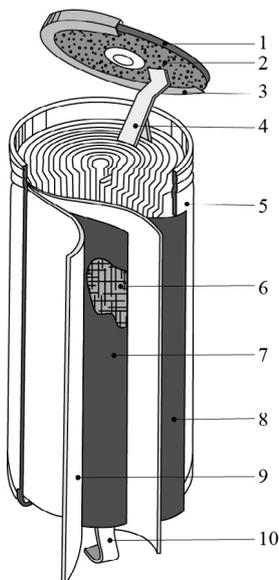


Fig. 7.14 - Vista in sezione di un accumulatore al nichel:

- 1 - coperchio in acciaio nichelato (positivo);
- 2 - valvola di sicurezza;
- 3 - guarnizione di chiusura in nylon;
- 4 - connessioni positive;
- 5 - contenitore in acciaio nichelato (negativo);
- 6 - griglia di supporto in acciaio nichelato;
- 7 - elettrodo negativo sinterizzato;
- 8 - elettrodo positivo sinterizzato;
- 9 - separatore;
- 10 - connessione negativa.

## Accumulatori al nichel-cadmio

Nel campo degli accumulatori al nichel-cadmio sono state realizzate parecchie soluzioni costruttive per soddisfare molteplici esigenze di mercato specie nel campo aerospaziale, negli strumenti portatili ecc. (Figura 7.14). Attualmente si possono suddividere in due gruppi fondamentali che si differenziano tra loro per la natura degli elettrodi.

Gli accumulatori al nichel-cadmio sono costituiti da un recipiente di acciaio nichelato contenente una soluzione di idrossido di potassio con concentrazione del  $20 \div 28^\circ$  o in peso e una densità di  $1,18 \div 1,27 \text{ kg/dm}^3$  a  $25^\circ\text{C}$ .

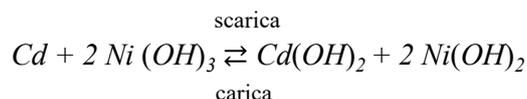
Gli elettrodi possono essere di tipo del tutto analogo a quelli già visti per gli accumulatori al ferronichel oppure di tipo sinterizzato.

Nel primo caso il materiale attivo utilizzato per l'elettrodo positivo è l'idrossido di nichel mentre per quello negativo viene impiegato invece dell'idrossido di cadmio.

Nel secondo caso si parte da un nastro forato di nichel sul quale è stata passata e successivamente fissata per sinterizzazione a  $800 \div 1\,000^\circ\text{C}$  della polvere finissima di nichel. L'elettrodo negativo si ottiene impregnando il supporto con un sale di nichel e sottoponendo poi il tutto ad un processo di formazione per ottenere, alla fine, dell'idrossido di nichel. Per l'elettrodo positivo si segue una tecnica del tutto simile usando però, come impregnante, del sale di cadmio.

Gli accumulatori al nichel-cadmio con elettrodi sinterizzati sono più costosi dei tipi con elettrodi normali, ma sono di qualità superiore (resistenza interna molto bassa, temperatura d'impiego tra  $30$  e  $80^\circ\text{C}$  ecc.).

Le reazioni chimiche che avvengono negli accumulatori al nichel-cadmio si possono esprimere, in forma semplificata, con la seguente equazione:



Nella figura 7.15 sono illustrati gli andamenti tipici delle tensioni di carica e scarica caratteristiche dei suddetti accumulatori.

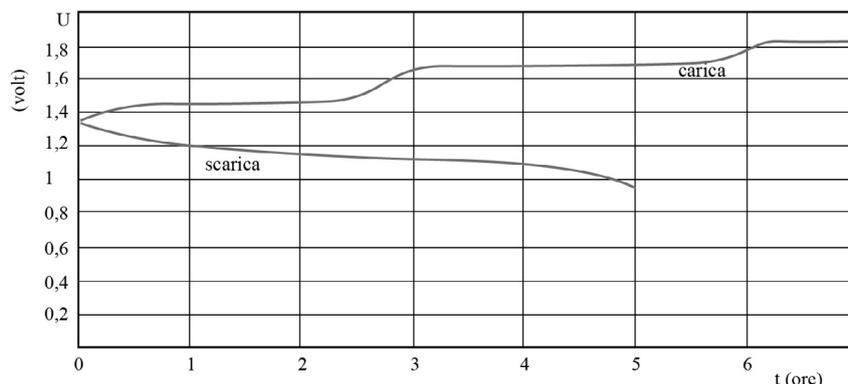


Figura 7.15 - Andamento delle tensioni di carica e di scarica in funzione del tempo di un accumulatore alcalino al nichel-cadmio.

## ESERCIZI SVOLTI

**Esercizio 1** - Un accumulatore ha una capacità nominale di 120 Ah con scarica in 10 ore. Durante la carica viene sottoposto alla corrente di 7,5 A. Ammettendo un rendimento dell'82%, si calcoli il tempo necessario per la carica completa.

*Soluzione*

Per ottenere durante la scarica la capacità nominale, si deve calcolare la quantità di elettricità da immettere:

$$Q_C = \frac{Q_n}{\eta} = \frac{120}{0,82} = 146,3 \text{ Ah}$$

Il tempo si determina con la relazione:

$$t = \frac{Q_C}{I_C} = \frac{146,3}{7,5} = 19,5 \text{ ore}$$

**Esercizio 2** - Un gruppo di 20 pile che forniscono una f.e.m. di 1,5 V ed hanno una resistenza interna di 0,2  $\Omega$  ciascuna devono essere collegate ad un carico di 6  $\Omega$ . Si chiede quale valore assumerà la corrente circolante nel caso di collegamento in serie ed in parallelo.

*Soluzione*

Nel caso di collegamento in serie la f.e.m. totale è data dalla somma delle f.e.m. relative alle singole pile; anche le resistenze interne si sommano. Si applica poi la legge di Ohm.

$$\begin{aligned} E_t &= N \cdot E = 20 \cdot 1,5 = 30 \text{ V} \\ R_t &= R + N \cdot r = 6 + 20 \cdot 0,2 = 10 \text{ } \Omega \\ I &= \frac{E_t}{R_t} = \frac{30}{10} = 3 \text{ A} \end{aligned}$$

In parallelo la f.e.m. corrisponde a quella di una sola pila, mentre la resistenza è data dalla somma di quella del carico più quella equivalente al parallelo delle resistenze interne delle pile (quasi trascurabile).

$$\begin{aligned} R_t &= R + \frac{r}{N} = 6 + \frac{0,2}{20} = 6,01 \text{ } \Omega \\ I &= \frac{E}{R_t} = \frac{1,5}{6,01} = 0,249 \text{ A} \end{aligned}$$

**Esercizio 3** - Si deve progettare una batteria a 60 V per illuminazione notturna di emergenza che deve poter fornire una potenza di 2 kW per 10 ore. Si chiede il numero di elementi da impiegare, (sapendo che verso fine scarica la f.e.m. di ogni elemento è di 1,8 V); la corrente circolante; la capacità da assegnare alla batteria.

*Soluzione*

Il numero di elementi  $N$  si ottiene dividendo la tensione da ottenere per la f.e.m. minima ammissibile. La corrente si ha dividendo la potenza richiesta per la tensione e infine la capacità risulta dal prodotto della corrente per il tempo di funzionamento richiesto.

$$N = \frac{U}{E_{\min}} = \frac{60}{1,8} = 34 \quad (\text{arrotondamento all'unità superiore})$$

$$I = \frac{P}{U} = \frac{2000}{60} = 33,33 \text{ A}$$

$$Q = I \cdot t = 33,33 \cdot 10 = 333,3 \text{ Ah}$$

**Esercizio 4** - Si chiede la durata di una pila da 1,5 V, 10 Ah, avente una resistenza interna di 0,3  $\Omega$  che alimenta un carico di 2  $\Omega$ .

*Soluzione*

Si calcola la resistenza totale del circuito (somma di quella del carico piú quella interna della pila) e con la legge di Ohm si trova la corrente; il tempo è dato dal quoziente della capacità per la corrente erogata.

$$R_t = R + r = 2 + 0,3 = 2,3 \Omega$$

$$I = \frac{E}{R_t} = \frac{1,5}{2,3} = 0,652 \text{ A}$$

$$t = \frac{Q}{I} = \frac{10}{0,652} = 15,33 \text{ h}$$

**Esercizio 5** - 20 accumulatori vengono disposti in due gruppi in serie di 10, collegati fra loro in parallelo per alimentare una resistenza da 23  $\Omega$ . Sapendo che ciascuno di essi ha una f.e.m. di 2 V, capacità di 40 Ah ed una resistenza interna di 0,4  $\Omega$ , si chiede in quanto tempo essi saranno scarichi.

*Soluzione*

La f.e.m. totale è data dalla somma delle f.e.m. di dieci elementi in serie; la resistenza interna totale degli accumulatori corrisponde alla metà (parallelo di due elementi uguali) della resistenza totale dei dieci elementi in serie; aggiungendo la resistenza del carico si ha quella totale del circuito dalla quale, mediante la legge di Ohm, si ottiene la corrente circolante. La capacità totale è doppia di quella di un elemento (si sommano le capacità degli elementi in parallelo, non varia per la serie); da questa e dalla corrente si risale al tempo di scarica.

$$E_t = N_s \cdot E = 10 \cdot 2 = 20 \text{ V}$$

$$R_i = N_s \frac{r_i}{2} = 10 \cdot \frac{0,4}{2} = 2 \Omega$$

$$R_t = R + R_i = 23 + 2 = 25 \Omega$$

$$I = \frac{E}{R_t} = \frac{20}{25} = 0,8 \text{ A}$$

$$Q_t = 2 \cdot Q = 2 \cdot 40 = 80 \text{ Ah}$$

$$t = \frac{Q_t}{I} = \frac{80}{0,8} = 100 \text{ h}$$

**Esercizi 6** - Si deve predisporre una batteria di accumulatori per fornire la tensione di 110 V con una corrente di scarica in 10 ore di 24 A. Determinare le caratteristiche degli accumulatori al piombo necessari.

*Soluzione*

Si deve innanzitutto determinare quanti elementi in serie devono essere previsti assumendo per ogni elemento la tensione di esercizio di 2 V.

$$M = \frac{U}{u} = \frac{110}{2} = 55 \text{ elementi in serie}$$

La capacità della batteria deve essere uguale a:

$$A = I \cdot t = 24 \cdot 10 = 240 \text{ Ah}$$

e quindi questo è il valore relativo anche ad ogni elemento. Se non si trovano accumulatori da 240 Ah, si può prendere un certo numero di elementi in parallelo, ad esempio, 3 elementi da 80 Ah.

### ESERCIZI DA SVOLGERE

**Es. 1** - Un accumulatore assorbe durante la carica la corrente di 11,5 A per 10 ore, mentre alla scarica fornisce la quantità di elettricità di 92 Ah. Quale è il rendimento? (Risultato:  $\eta = 0,800$ )

**Es. 2** - Un gruppo di 3 pile collegate tra loro in parallelo alimenta un carico avente resistenza di 8  $\Omega$ . Se ciascun elemento ha f.e.m. di 2,2 V e resistenza interna di 0,09  $\Omega$ , quale è il valore della d.d.p. che si manifesta ai morsetti dell'utilizzatore? (Risultato: 2,192 V)

**Es.3** - 24 elementi di accumulatore al piombo ( $E = 2,2$  V) vengono collegati in parallelo per alimentare un resistore da 0,085  $\Omega$ . Se la corrente assorbita è di 20,9 A; quale è il valore della resistenza interna di ciascun elemento? (Risultato: 0,486  $\Omega$ )

**Es. 4** - Determinare le caratteristiche equivalenti (f.e.m. e resistenza interna) di cinque elementi di accumulatori aventi ciascuno f.e.m. di 2,2 V e resistenza interna di 0,052  $\Omega$  considerando prima il collegamento in serie e poi quello in parallelo. (Risultato: collegamento in serie:  $E_{eq} = 11$  V,  $r_{eq} = 0,26$   $\Omega$ ; collegamento in parallelo:  $E_{eq} = 2,2$  V,  $r_{eq} = 0,01$   $\Omega$ )

**Es. 5** - Determinare le caratteristiche di una batteria di accumulatori al piombo che deve erogare 1,5 A per 20 ore con una tensione di 24 V. (Risultato: 12 elementi in serie da 30 Ah ciascuno)