

CAPITOLO I

CORRENTE ELETTRICA

INDICE

CORRENTE ELETTRICA	3
INTENSITÀ DI CORRENTE	4
<i>Carica elettrica</i>	4
LE CORRENTI CONTINUE O STAZIONARIE	5
CARICA ELETTRICA ELEMENTARE	6
TENSIONE O POTENZIALE	7
<i>Sorgente di tensione V_q (origine del potenziale)</i>	7
<i>Analogia con un circuito idraulico</i>	7
CADUTA DI TENSIONE	8
PRIMA LEGGE DI OHM: RESISTENZA ELETTRICA	9
RESISTENZA E TEMPERATURA	12
<i>Resistività nei metalli</i>	12
CAMPO ELETTRICO IN UN CONDUTTORE	13
<i>Calcolo della velocità di deriva (drift velocity)</i>	14
CLASSIFICAZIONE DEI CONDUTTORI	15
<i>Tipi di conduttori</i>	15
<i>Conduttori metallici</i>	15
<i>Conduttori elettrolitici</i>	15
<i>Conduttori gassosi</i>	15
<i>Isolanti</i>	16
<i>Semiconduttori</i>	16

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 di corrente al filo conduttore gli elettroni si muoveranno in media tutti nella stessa direzione. In effetti il generatore di corrente è costituito da 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 definisce l' **intensità di corrente**.

La corrente elettrica esercita diversi effetti :

- effetto termico
- effetto chimico
- effetto magnetico

Proprio su questo ultimo effetto si basa la definizione di **ampere (A)** che è l'unità di misura della corrente :

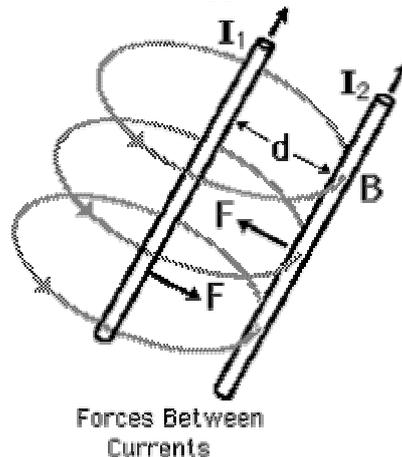
Un ampere è l'intensità di una corrente elettrica che, scorrendo su ciascuno dei due conduttori rettilinei paralleli posti ad una distanza di 1 m, provoca una forza di $2 \cdot 10^{-7}$ N per metro di conduttore.

Intensità di corrente

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

L'intensità di corrente è una grandezza scalare, l'unità di misura è l'ampere (A) e si misura con l'amperometro, uno strumento che sfrutta l'effetto magnetico delle correnti.

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.



Nel caso di due fili conduttori paralleli, percorsi dalla stessa corrente I , l'intensità della forza per unità di lunghezza di conduttore è:

- proporzionale al quadrato dell'intensità di corrente;
- inversamente proporzionale alla distanza tra i fili.

Nel Sistema Internazionale (SI) delle unità di misura si ha:

$$F = 2 \cdot 10^{-7} \frac{I_1 \cdot I_2}{d} \ell$$

F = modulo del vettore forza in N

ℓ = lunghezza del conduttore in m

$I_1 = I_2$ = intensità di corrente (la stessa per i due fili) in A

d = distanza tra i due fili in m

Fissate la distanza r tra i due conduttori e la lunghezza del conduttore ℓ , l'unico modo di modificare F è variare la sola grandezza elettrica I . Questa è la legge usata per definire quantitativamente l'intensità di corrente I :

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 per metro di conduttore.

Carica elettrica

La definizione quantitativa di unità di carica elettrica segue immediatamente da quella di Ampère.

Con carica elettrica si intende il prodotto dell'intensità di corrente I per l'intervallo di tempo Δt di osservazione. Essa si chiama anche quantità di elettricità o quantità di carica. L'unità di carica elettrica, Q , nel SI è il Coulomb (C).

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

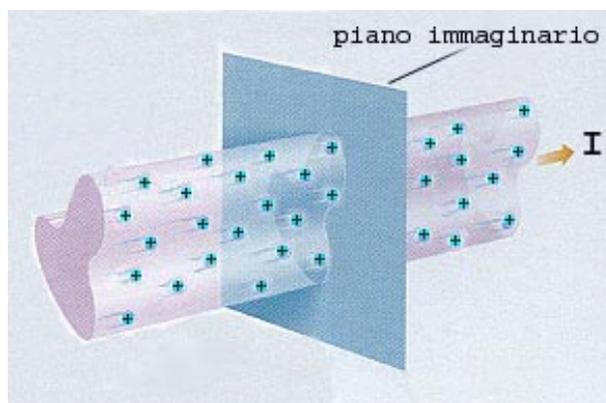
Le correnti continue o stazionarie

Se I è la corrente costante nel tempo che scorre in un conduttore, la quantità di carica che scorre attraverso la sezione trasversa di tale conduttore nel tempo Δt è:

$$Q = I \cdot \Delta t$$

Se immaginiamo di osservare il moto delle cariche in un punto qualsiasi del conduttore, la quantità di carica che transita, in ogni secondo, attraverso una sezione trasversale del conduttore, è sempre la stessa. In questo modo l'intensità I di corrente nel conduttore è costante, pertanto:

si definisce **corrente continua** (o stazionaria) una corrente che fluisce in un'unica direzione del conduttore, con intensità I costante.



Se invece la corrente varia nel tempo si ha che la carica che attraversa il conduttore fra due istanti temporali t_1 e t_2 :

$$Q = \int_{t_1}^{t_2} I dt$$

Conversione:

$$1 \text{ amperora} = 1\text{A} \cdot 1\text{h} = 3600 \text{ C}$$

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:

$$Q = n e$$

dove n è un numero intero positivo o negativo.

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; attraverso il filamento incandescente di una comune lampadina passa ogni secondo un numero di elettroni dell'ordine di 10^{18} !

Tensione o potenziale

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

Sorgente di tensione V_q (origine del potenziale)

Essa è l'origine di ogni corrente elettrica e regna fra i poli di un generatore di tensione. Questa è indicata anche come forza elettromotrice (f.e.m.).

Esempi di generatori di tensione sono una pila, una 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 minore.

Al **polo negativo** esiste un eccesso di elettroni, al **polo positivo** una mancanza di elettroni. Se si connettono i poli del generatore con un filo 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 il potenziale 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.

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 d'impiego	V (volt)
Accumulatore in acciaio (NiFe) per ciascuna cella	1.2
Accumulatore al piombo per ciascuna cella	2
Illuminazione dell'automobile	12
Rete	220, 380
Tram	550
Locomotore elettrico	fino a 15000
Linee di alta tensione	fino a 380000

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 designa 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.

$$V = \frac{L}{Q} = \frac{L \Delta t}{Q} = \frac{P}{I} \quad P \text{ in watt} \quad I \text{ in ampere} \quad Q \text{ in coulomb}$$

Unità SI della tensione V

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

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*

Prima Legge di Ohm: Resistenza elettrica

Essa determina la intensità della corrente, che fluisce sotto una differenza di potenziale data attraverso il circuito di corrente.

Con il termine resistenza R si comprende il rapporto fra la tensione fra gli estremi di un conduttore e l'intensità della corrente nel conduttore.

$$R = V / I$$

Unità SI di resistenza: *ohm* 1 ohm (Ω) = 1 V / 1 A

l'ohm è la resistenza elettrica fra due punti di un conduttore, attraverso il quale, per una differenza di potenziale di 1 volt fra gli stessi due punti, passa una corrente di 1 ampere.

Se R è la resistenza del conduttore,

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):

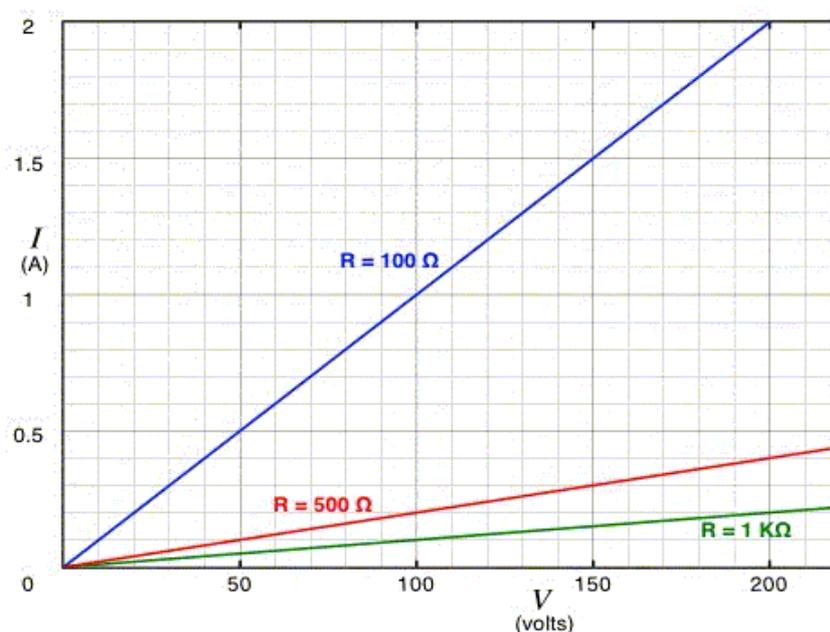
$$R = V / I \quad V = R \cdot I \quad I = V / R$$

Prima Legge di Ohm

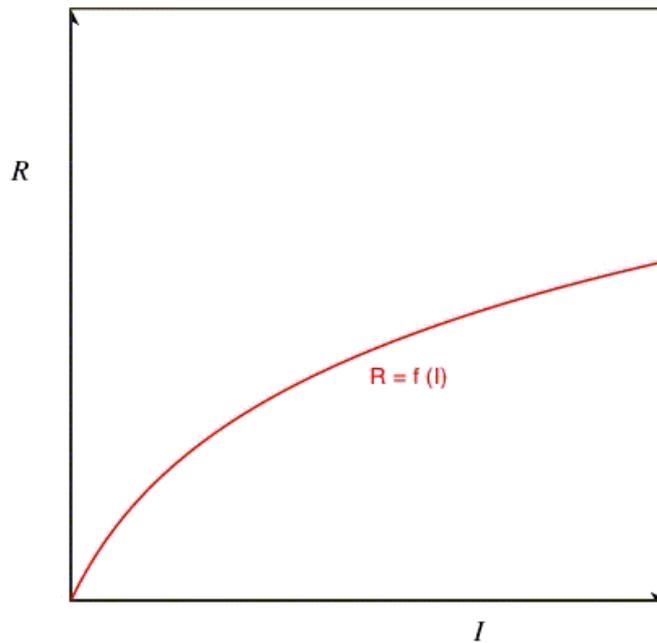
In un conduttore metallico (che segue la legge di Ohm) l'intensità di corrente è direttamente proporzionale alla tensione applicata ai suoi capi (a temperatura T costante) e inversamente proporzionale alla resistenza del conduttore.

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

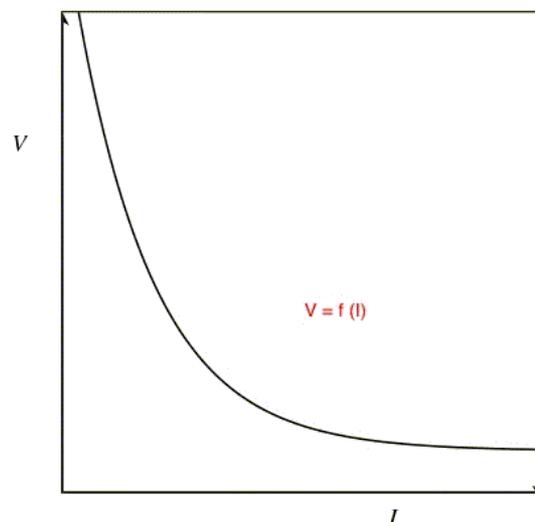


- Per i materiali non-ohmici $R=V/I$ non è costante ma dipende dalla corrente I ; infatti il grafico $R = f(I)$ non ha un andamento lineare.



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 (nel determinato dominio) la dipendenza della tensione dalla corrente è decrescente, cioè la tensione cala quando l'intensità della corrente aumenta



Seconda legge di Ohm: Resistività

A parità di ogni altra condizione, la resistenza R di un conduttore è direttamente proporzionale alla sua lunghezza e inversamente proporzionale alla sua sezione

Detti

R – resistenza elettrica del conduttore

ρ – resistenza specifica o resistività del materiale

l – lunghezza del conduttore

A – area della sezione del conduttore

Si definisce:

$$R = \rho \frac{l}{A}$$

R in Ω

l in m

A in m^2

quindi ρ in $\Omega \cdot m$

Frequentemente si preferisce: ρ in $\Omega \cdot cm = 10^{-2} \Omega \cdot m$

La **resistività** di un conduttore è la resistenza che un suo campione di lunghezza e sezione unitaria offre al passaggio della corrente.

L'inverso della resistività si chiama **conducibilità**.

Attenzione: come la resistenza anche la resistività dipende dalla temperatura.

Tabella: Resistività elettrica a temperatura ambiente (20 °C).

Sostanza	ρ (Ω m)	Sostanza	ρ (Ω m)
Metalli		Semiconduttori	
Rame	$1.72 \cdot 10^{-8}$	Carbonio	$3.57 \cdot 10^{-5}$
Argento	$1.63 \cdot 10^{-8}$	Germanio	45.04.00
Alluminio	$2.82 \cdot 10^{-8}$	Silicio	$6.25 \cdot 10^4$
Ferro	$6.54 \cdot 10^{-8}$		
Tungsteno	$5.50 \cdot 10^{-8}$		
Leghe		Isolanti	
		Vetro	$10^{10} \rightarrow 10^{14}$
Manganina	$4.40 \cdot 10^{-7}$	Mica	$10^{11} \rightarrow 10^{15}$
Costantina	$4.90 \cdot 10^{-7}$	Paraffina	$2.97 \cdot 10^{16}$
Nichel-cromo	$1 \cdot 10^{-6}$	Quarzo	$7.52 \cdot 10^{17}$

Come si vede la resistività dei materiali copre uno spettro di circa 25 ordini di grandezza.

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. La resistività, che spesso nelle tabelle è riportata a 20 °C , e di conseguenza la resistenza, può essere quindi convertita ad altre temperature nel caso dei metalli con una semplice espressione.
- La grande resistività dei *semiconduttori* decresce per riscaldamento.
- 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 → *superconduttività* (Kamerlingh Onnès, 1911). Più recentemente (1985) questo fenomeno è stato osservato anche con alcune ceramiche a temperature più elevate, fino a 170 K → superconduttività ad alta temperatura.

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

Resistività nei metalli

Nel caso dei metalli, siano

ρ_t : la resistività alla temperatura t

ρ_{20} : la resistività a 20 °C

α : il coefficiente di temperatura della resistività elettrica a 20 °C

allora, in prima approssimazione:

$$\rho_t = \rho_{20} [1 + \alpha(t - 20^\circ\text{C}) + \dots]$$

I ... indicano correzioni con potenze della temperatura superiori alla prima.

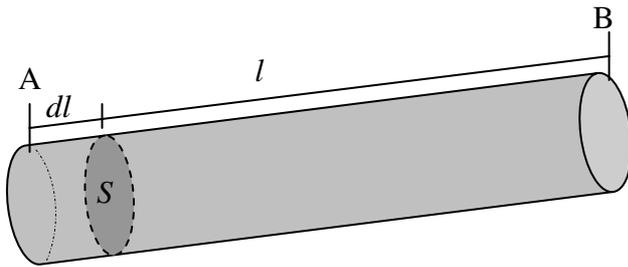
Il coefficiente di temperatura della resistività elettrica è quindi il rapporto fra la variazione relativa della resistività (o della resistenza) sulla variazione di temperatura

$$\alpha = \frac{\frac{\Delta\rho}{\rho}}{\Delta t} = \frac{\Delta\rho}{\rho \Delta t}$$

Attenzione

- per essere precisi bisognerebbe prendere in considerazione il fatto che il coefficiente di temperatura è egli stesso dipendente dalla temperatura (i ... nella relazione precedente)

Campo elettrico in un conduttore



Consideriamo un conduttore cilindrico di sezione S e lunghezza l , d'estremi A e B, percorso dalla corrente I .

$$V_A - V_B = \Delta V = RI$$

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

$$\Delta V = \rho \frac{l}{S} I$$

Supposto un conduttore omogeneo, possiamo considerare il campo elettrico E uniforme; dunque se $\Delta V = E \cdot l$, abbiamo:

$$E \cdot l = \rho \frac{l}{S} I$$

$$E = \frac{\rho}{S} I$$

$$\frac{1}{\rho} E = \frac{I}{S}$$

Definendo la *densità di corrente* $j = \frac{I}{S}$ come la corrente che passa attraverso l'unità di area del conduttore, ovvero la carica che attraversa l'unità di superficie nell'unità di tempo, si ottiene:

$$\frac{1}{\rho} E = j$$

da cui segue:

$$\rho = \frac{E}{j} \quad \text{definizione di resistività } \rho$$

talvolta al posto di resistività di un materiale, si parla di conducibilità elettrica σ ; essa è il reciproco della resistività:

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad \text{definizione di **conduttività o conducibilità**}$$

la relazione fra campo elettrico e conducibilità è:

$$j = \sigma E$$

e in generale $\vec{j} = \sigma \vec{E}$

questa relazione riassume le due leggi di Ohm e può essere assunta come definizione alternativa di conduttori ohmici.

Calcolo della velocità di deriva (drift velocity)

Detto n il numero delle cariche per unità di volume nel conduttore, la carica per unità di volume è q , con $q = -e$ per gli elettroni.

La velocità delle cariche è:

$$v = \frac{dl}{dt}$$

Il tratto di conduttore percorso nell'intervallo di tempo dt è:

$$dl = v dt$$

Attraverso la superficie S nel tempo dt passa una quantità di carica

$$dQ = nq(S \cdot dl)$$

ove $(S \cdot dl)$ rappresenta il volume del cilindro di base S ed altezza infinitesimale dl occupato dalle cariche che hanno attraversato S .

$$I = \frac{dQ}{dt} = \frac{nq S dl}{dt} = \frac{nq S v dt}{dt} = nq S v$$

se dividiamo primo e secondo membro per S , otteniamo:

$$\frac{I}{S} = nqv$$

e quindi:

$$j = nqv = \sigma E$$

In questo modo possiamo ottenere v

$$v = \frac{j}{nq} = \left(\frac{\sigma}{nq} \right) E = \text{costante} \quad \text{poichè} \quad \sigma, E, q, n = \text{costante}$$

la velocità delle cariche, detta *velocità di deriva (drift velocity)* è costante.

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 sali inorganici. 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) ed anioni (ioni negativi), dotati di energia cinetica, per agitazione termica. Sotto l'azione dinamica 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.

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.

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.