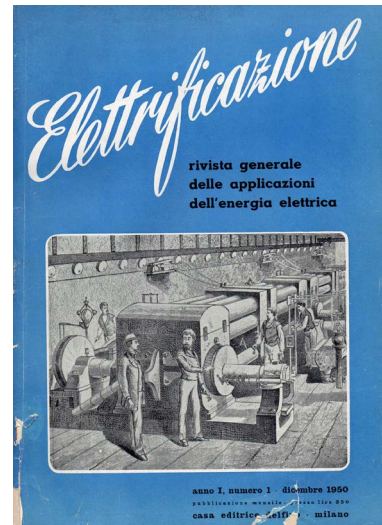


# RIPASSIAMO LE BASI DELL'ELETTROTECNICA

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. Quarta parte: effetti termici della corrente e Legge di Joule.



## 4.1 - Legge di Joule

*Il passaggio di corrente elettrica in un conduttore provoca sviluppo di calore in quantità proporzionale all'energia elettrica assorbita.*

Nel Capitolo precedente, facendo l'analisi delle varie forme di energia in gioco nei circuiti elettrici, si è parlato di energia trasmessa all'esterno, ossia di energia elettrica che si trasforma in altra forma di energia e che, come tale, si disperde al di fuori del circuito stesso; si è anche detto che essa è associata alle cadute di tensione dei vari tratti di circuito e che quindi si verifica tra ogni coppia di punti tra i quali si possa misurare una caduta di tensione.

Introducendo il concetto di resistenza, nel Capitolo 2 si era visto che essa si può immaginare come l'ostacolo che incontrano gli elettroni nel loro moto entro i conduttori. Dalla meccanica si sa che quando un corpo in movimento viene frenato da un altro corpo con il quale entra in contatto si verifica il fenomeno dell'attrito meccanico: così avviene, ad esempio, nel sistema frenante dell'autovettura. Il risultato più evidente di questo attrito è la produzione di calore: i freni si scaldano.

L'effetto della resistenza elettrica sulla corrente, cioè sul moto degli elettroni, è analogo: qualsiasi conduttore percorso da corrente elettrica si riscalda per effetto dell'attrito offerto al moto degli elettroni. Il calore che si produce non è altro che il risultato della trasformazione dell'energia elettrica trasportata dal conduttore, energia

che viene quindi dispersa nell'aria che lo circonda e che, in genere, non può essere ulteriormente utilizzata.

Questo fatto è sintetizzato dalla legge di Joule, la quale dice che il passaggio della corrente elettrica in un conduttore provoca sviluppo di calore in quantità proporzionale all'energia elettrica assorbita.

Si è pure visto che la potenza elettrica assorbita da un resistore è data da  $P = U \cdot I$ ; però, in base alla legge di Ohm, si sa che la caduta di tensione è espressa dal prodotto  $R \cdot I$  per cui la potenza dissipata sarà data da:

$$P = U \cdot I = R \cdot I^2$$

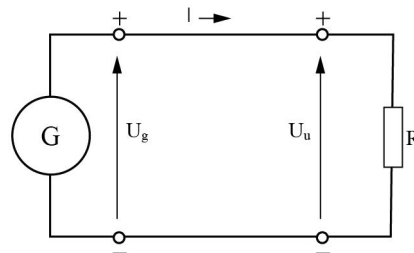


Figura 4.1 - Circuito elettrico percorso da corrente.

La legge di Joule si può quindi anche esprimere dicendo che la potenza, corrispondente all'energia dispersa in calore, è data dal prodotto della resistenza del circuito considerato per il quadrato della corrente che lo percorre (Figura 4.1).

Trasformando la formula di cui sopra è anche possibile ricavarne altre e precisamente:

$$R = \frac{P}{I^2} \quad I = \sqrt{\frac{P}{R}}$$

Gli utilizzatori formali da puri resistori possono quindi sfruttare l'energia che ricevono solamente trasformandola in calore e per tale ragione vengono chiamati elementi inerti o passivi. La quantità di calore che essi possono produrre si ottiene dal valore dell'energia elettrica che essi dissipano, corrispondente a:

$$W = R \cdot I^2 \cdot t$$

dove  $t$  rappresenta il tempo durante il quale avviene il passaggio della corrente  $I$ ; se  $t$  è in secondi l'energia risulta espressa in Joule.

Per lo studio di alcuni problemi termici può convenire esprimere la quantità di calore in grandi calorie (Cal) (<sup>1</sup>); si deve allora tenere presente che le due unità di misura (joule e grande caloria) sono legate da un coefficiente, detto equivalente termico, poiché le stesse sono di dimensioni diverse. Più precisamente si può dire che:

$$1 \text{ Cal} = 4\,184 \text{ J} \quad \text{e} \quad 1 \text{ J} = 0,00024 \text{ Cal}$$

Quindi, per esprimere la legge di Joule in grandi calorie, si deve ricorrere alla formula:

$$W (\text{Cal}) = 0,00024 \cdot R \cdot I^2 \cdot t \quad (t \text{ in secondi})$$

Poiché a volte il tempo viene espresso in ore, l'energia elettrica non risulta più misurata in joule, ma in wattora (Wh). Ricordando che 1 ora = 3 600 s, la formula

diventa:

$$W (\text{Cal}) = 0,860 \cdot R \cdot I^2 \cdot t \quad (t \text{ in ore})$$

È importante osservare che la potenza trasformata in calore dipende dal quadrato della corrente. Ad esempio, un resistore da  $5 \Omega$  percorso da  $10 \text{ A}$  assorbe una potenza di:

$$P_1 = R \cdot I^2 = 5 \cdot 10^2 = 500 \text{ W}$$

Se la corrente viene raddoppiata ( $20 \text{ A}$ ), la potenza assorbita diventa 4 volte più grande. Infatti:

$$P_2 = R \cdot I_2^2 = 5 \cdot 20^2 = 2\,000 \text{ W}$$

#### 4.2 - Altra forma della legge di Joule

A completamento di quanto già esposto, è opportuno precisare che la formula che esprime la legge di Joule  $P = R \cdot I^2$  può anche essere scritta in altro modo se si tiene presente che la tensione ai capi del resistore è data da:  $U = R \cdot I$  per cui ponendo al posto di  $I$  il valore  $U/R$  si ottiene:

$$P = R \cdot I^2 = R \frac{U^2}{R^2} = \frac{U^2}{R}$$

Questa formula e quella di cui al paragrafo precedente sono perfettamente equivalenti e si userà l'una piuttosto che l'altra a seconda che si conosca la corrente o la tensione (Figura 4.1).

Anche in questo caso si possono scrivere due altre relazioni e precisamente:

$$R = \frac{U^2}{P} \quad U = \sqrt{P \cdot R}$$

Si supponga di applicare allo stesso resistore di cui al paragrafo 4.1 la tensione di  $20 \text{ V}$ , la potenza risulta:

$$P_1 = \frac{U_1^2}{R} = \frac{20^2}{5} = 80 \text{ W}$$

Se si raddoppia la tensione portandola a  $40 \text{ V}$  si ottiene:

$$P_2 = \frac{U_2^2}{R} = \frac{40^2}{5} = 320 \text{ W}$$

e quindi una potenza 4 volte più grande in analogia con quanto verificato per la corrente.

#### 4.3 - Riscaldamento dei conduttori

Finora, parlando dell'effetto termico, ci si è soffermati soprattutto sull'aspetto energetico considerando la quantità di calore dissipata nel circuito. È però evidente che, perché il calore passi dal conduttore all'ambiente circostante, il conduttore stesso deve assumere una temperatura più elevata, temperatura che può anche raggiungere valori pericolosi per l'integrità dei materiali, particolarmente degli isolanti con i quali il conduttore è in contatto.

La temperatura di un conduttore continuerà ad aumentare fino a quando il calore prodotto sarà uguale a quello che, attraverso la sua superficie esterna, si può disperdere all'intorno (condizione di equilibrio termico). Perciò la valutazione della temperatura raggiunta deve tenere anche conto del tipo di conduttore e delle condizioni nelle quali esso si trova. Così, ad esempio, il filo nudo di una linea aerea ha più facilità a dissipare il calore perché il vento ne raffredda la superficie, inoltre il conduttore può anche raggiungere temperature abbastanza elevate perché non è in contatto con materiali isolanti che possono deteriorarsi. Condizioni meno favorevoli sono quelle dei conduttori isolati montati nelle macchine elettriche perché, oltre alla presenza dell'isolante, essi si trovano in condizioni difficili per il raffreddamento.

Si è anche visto che secondo la legge di Joule ( $P = R \cdot I^2$ ) la quantità di calore prodotta è direttamente proporzionale alla resistenza e tenendo conto della formula:

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

si può scrivere quindi:

$$P = R \cdot I^2 = \rho \frac{l}{S} I^2$$

Dalla quale si può rilevare che la potenza trasformata in calore è inversamente proporzionale alla sezione del conduttore: a parità di altre condizioni, un conduttore di sezione più grande scalda meno.

#### 4.4 - Densità di corrente

*Si chiama densità di corrente il rapporto tra la corrente e la sezione del conduttore in cui la corrente circola.*

Una grandezza molto significativa per il dimensionamento dei conduttori ed in particolare della loro sezione in relazione al tipo di applicazione, è la densità di corrente  $D$  che esprime l'intensità di corrente che attraversa l'unità di superficie (Figura 4.2):

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

quindi fornisce un'indicazione dell'addensamento degli elettroni nei conduttori.

Se la corrente è espressa in ampere e la sezione in millimetri quadrati, la densità di corrente risulta in ampere per millimetro quadrato ( $A/mm^2$ ). La densità può variare da 2 a 5  $A/mm^2$  nei conduttori delle macchine elettriche, ma può raggiungere 120  $A/mm^2$  per gli apparecchi riscaldatori.

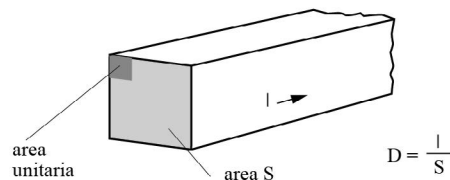


Figura 4.2 - Influenza della sezione del conduttore sulla densità di corrente.

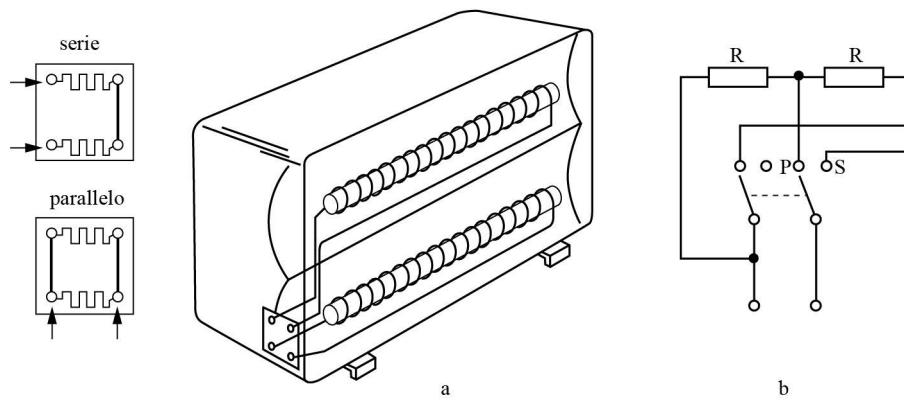


Figura 4.3 - Apparecchio riscaldante con collegamento serie - parallelo.

## 4.5 - Applicazioni dell'effetto termico

La constatazione che qualsiasi conduttore percorso da corrente genera calore porta a concludere che ogni circuito elettrico dà luogo a perdite di energia di cui si deve tener conto nella progettazione e nell'esercizio degli impianti elettrici. In altri casi la produzione di calore può invece costituire lo scopo per cui è realizzato un apparecchio elettrico.

### Apparecchi di riscaldamento

Gli apparecchi di riscaldamento hanno il circuito elettrico generalmente costituito da un filo di nichelcromo, una lega avente una resistività piuttosto elevata ed in grado di sopportare, senza venire ossidata dall'aria, alte temperature.

In alcuni casi il conduttore, a forma di spirale, viene posto su supporti di materiale isolante, come bacchette di materiale ceramico o piatti scanalati; altre volte è avvolto su supporti di mica. Secondo questi sistemi sono realizzate stufe, fornelli e pentole elettriche (Figura 4.3): in molti casi sono previsti due resistori che possono essere collegati in parallelo o in serie fra loro, in modo da ottenere, in serie, una potenza che corrisponda a un quarto di quella del collegamento in parallelo.

I ferri da stiro (Figura 4.4) sono generalmente dotati di lastre di mica fra le quali viene posta la spirale che rimane così vicina alla piastra metallica. Vi sono poi anche gli scaldabagni elettrici, il cui serbatoio è protetto da isolami termici che limitano la dispersione del calore verso l'ambiente (Figura 4.5), tostapane, termofori, saldatori elettrici ecc..

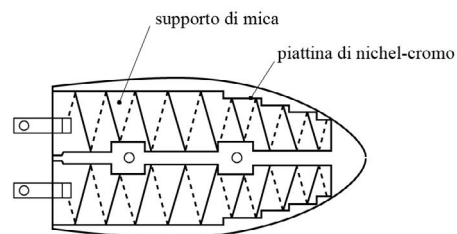


Figura 4.4 - Resistore per ferro da stiro.

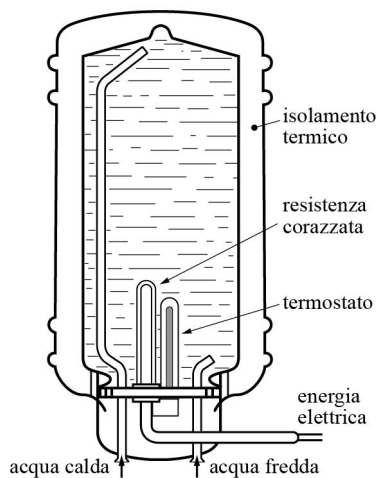


Figura 4.5 - Sezione di uno scaldabagno elettrico.

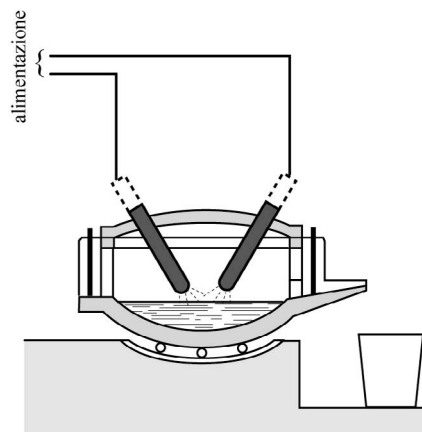


Figura 4.6 - Forno ad arco elettrico.

## Lampade

Un altro importante gruppo di apparecchi elettrici è costituito dalle lampade ad incandescenza: in questo caso non si sfrutta l'effetto termico per produrre calore, che anzi costituisce energia perduta, ma il fatto che a temperatura elevata il filo di tungsteno diventa incandescente. La temperatura raggiunta è dell'ordine dei 2 000 °C, ottenendo così una luce bianca. L'ampolla di vetro entro la quale si trova il filamento di tungsteno è sotto vuoto o, più di frequente, riempita con un gas inerte (argon o cripton) per aumentare la durata del filamento stesso.

## Forni elettrici industriali

L'uso dell'energia elettrica per il funzionamento dei forni elettrici industriali è molto diffuso. Esistono diversi tipi di forni basati sull'impiego di resistori riscaldanti, sull'arco elettrico, sui fenomeni di induzione ecc..

Il principio dei resistori riscaldanti è ovvio e non merita particolari commenti, mentre per i forni ad induzione si rimanda al volume di impianti elettrici.

Si cita qui il principio di funzionamento dei forni ad arco nei quali tra due elettrodi di grafite a potenziale diverso viene innescato, avvicinandoli, un arco elettrico (arco voltai-co). Se si è in presenza di metalli, l'elevata temperatura dell'arco (2 500 ÷ 3 000 °C) li può portare alla fusione (Figura 4.6).

Poiché durante il funzionamento gli elettrodi si consumano, occorrono dispositivi manuali o automatici che mantengano invariata la loro distanza.

## ESERCIZI SVOLTI

**Esercizio 1** - Un resistore da  $R = 120 \Omega$  è attraversato dalla corrente di 12 A. Calcolare la potenza da esso assorbita e l'energia trasformata in calore in 2 ore; determinare anche il numero di calorie prodotte.

*Soluzione*

La potenza assorbita si calcola mediante la formula:

$$P = R \cdot I^2 = 120 \cdot 12^2 = 17\,280 \text{ W}$$

L'energia assorbita in 2 ore è:

$$W_{(\text{Wh})} = P \cdot t = 17\,280 \cdot 2 = 34\,560 \text{ Wh} = 34,56 \text{ kWh}$$

La quantità di calore prodotta è calcolabile mediante l'equivalente termica del kWh:

$$W_{(\text{Cal})} = 0,860 \cdot P \cdot t = 0,860 \cdot 34\,560 = 29\,722 \text{ Cal}$$

**Esercizio 2** - Calcolare il valore da assegnare ad una resistenza in modo che, se sottoposta alta tensione di 220 V, essa produca 2 400 Cal in 150 s.

*Soluzione*

La prima operazione è quella di trasformare l'energia espressa in calorie in una unità elettrica:

$$2\,400 \text{ Cal} = 4\,184 \cdot 2\,400 = 10\,041\,600 \text{ J}$$

La potenza necessaria sarà quindi:

$$P = \frac{W}{t} = \frac{10\,041\,600}{150} = 66\,944 \text{ W}$$

Si può ora calcolare il valore della resistenza:

$$R = \frac{U^2}{P} = \frac{220^2}{66\,944} = 0,723 \Omega$$

La corrente assorbita sarà perciò:

$$I = \frac{U}{R} = \frac{220}{0,723} = 304,3 \text{ A}$$

**Esercizio 3** - Calcolare la densità di corrente in un conduttore a sezione circolare di diametro 2,5 mm, percorso dalla corrente di 18,5 A.

*Soluzione*

Si deve determinare la sezione del conduttore:

$$S = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 2,5^2}{4} = 4,91 \text{ mm}^2$$

$$D = \frac{I}{S} = \frac{18,5}{4,91} = 3,77 \text{ A/mm}^2$$

**Esercizi 4** - Determinare il diametro del conduttore da utilizzare affinché la corrente di 520 A venga trasmessa con una densità di 3,2 A/mm<sup>2</sup>.

*Soluzione*

Si determina la sezione richiesta per il conduttore:

$$S = \frac{I}{D} = \frac{520}{3,2} = 162,5 \text{ mm}^2$$

Se il conduttore è circolare il diametro risulta:

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot S}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 162,5}{3,14}} = 14,39 \text{ mm}$$

All'atto pratico, essendo difficile trovare un conduttore di questo diametro, si sceglierà quello uguale a 15 mm, normalmente disponibile in commercio.

**Esercizio 5** - Calcolare le caratteristiche del filo di nichelcromo da utilizzare per realizzare una stufetta da 500 W per 110 V, in modo tale che la densità di corrente non superi i 20 A/mm<sup>2</sup>.

*Soluzione*

Si calcola il valore della resistenza:

$$R = \frac{U^2}{P} = \frac{110^2}{500} = 24,2 \Omega$$

Si calcola la sezione minima che deve avere il filo:

$$S = \frac{I}{D} = \frac{P}{U \cdot D} = \frac{500}{110 \cdot 20} = 0,227 \text{ mm}^2$$

Conviene verificare il valore del diametro:

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot S}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,227}{3,14}} = 0,537 \text{ mm}$$

difficile da reperire in commercio. Si sceglie perciò un diametro uguale a 0,6 mm che comporta una densità di corrente un po' inferiore al valore massimo fissato. Si opera a ritroso calcolando la sezione:

$$S = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 0,6^2}{4} = 0,2826 \text{ mm}^2$$

Assumendo la resistività del nichelcromo data dalla tabella 2.2. ( $\rho = 1,09 \Omega \text{ mm}^2/\text{m}$ ) si può calcolare la lunghezza del filo necessaria:

$$l = \frac{R \cdot S}{\rho} = \frac{24,2 \cdot 0,2826}{1,09} = 6,27 \text{ m}$$



## ESERCIZI DA SVOLGERE

**Es. 1** - Si determini la quantità di calore prodotto in 12 ore da una stufetta elettrica che alimentata a 220 V assorbe la corrente di 12,5 A.

(Risultato: 28 380 Cal)

**Es. 2** - Per riscaldare un forno sono necessarie 100 000 Cal/ora. Si determini il valore della resistenza che deve essere utilizzata per ottenere questo risultato con la tensione di 120 V.

(Risultato: 0,1238  $\Omega$ )

**Es. 3** - Un resistore da 25  $\Omega$  è sottoposto per 2,5 ore alla tensione di 120 V e per altre 1,8 ore alla tensione di 240 V. Si determini la quantità di calore prodotta.

(Risultato: 4 805 Cal)

**Es. 4** - I conduttori di una linea di rame devono portare la corrente di 222 A, Se si ammette una densità di corrente di 1,8 A/mm<sup>2</sup>: quale diametro dovrebbe avere il conduttore cilindrico?

(Risultato: 12,53 mm)

**Es. 5** - In un conduttore di nichelcromo si fa circolare corrente con una densità di 8 A/mm<sup>2</sup>. Se il conduttore ha diametro uguale a 0,7 mm, quale è la potenza in gioco per ogni metro di filo?

(Risultato: 26,8 W/m)

**Es. 6** - Una piattina di rame ricotto ha dimensioni 2,5 x 15 mm ed è attraversata da una corrente di 54 A assumendo la temperatura di 75 °C. Si calcoli la potenza assorbita da ogni kilogrammo di rame sapendo che il peso specifico del materiale è di 8,9 kg/dm<sup>3</sup> e che la temperatura iniziale del conduttore è di 20 °C.

(Risultato: 4,87 W/kg)

**Es. 7** - Se il conduttore dell'esercizio precedente fosse di alluminio ricotto ( $\rho = 0,028$   $\Omega$  mm<sup>2</sup>/m, peso specifico 2,6 kg/dm<sup>3</sup>), quale sarebbe il valore della perdita specifica per effetto Joule?

(Risultato: 27,13 W/kg)

**Es. 8** - Si calcoli il diametro da assegnare ad un conduttore di nichelcromo affinché un metro di filo dissipasse la potenza di 19,7 W quando è attraversato dalla corrente di 15 A.

(Risultato: 3,98 mm).