

RICHIAMI DI ELETTROTECNICA

Premessa

Per comprendere gli argomenti presentati nelle pagine dell'area tematica sul rischio elettrico, è necessario conoscere il significato di alcune grandezze elettriche fondamentali (tensione, corrente, resistenza, potenza) e delle leggi fisiche che le correlano, nonché alcune delle loro principali applicazioni. Anche gli ordini di grandezza di questi parametri sono importanti e determinano in molti casi la scelta delle misure di sicurezza. Di seguito, pertanto, vengono richiamati tali elementi con un approccio il più possibile intuitivo.

Sebbene l'energia elettrica impiegata per usi civili sia normalmente distribuita in corrente alternata, la trattazione sarà effettuata in maniera semplificata, riferendosi alla corrente continua. I concetti fondamentali relativi al rischio elettrico, così illustrati, mantengono la loro validità anche in corrente alternata.

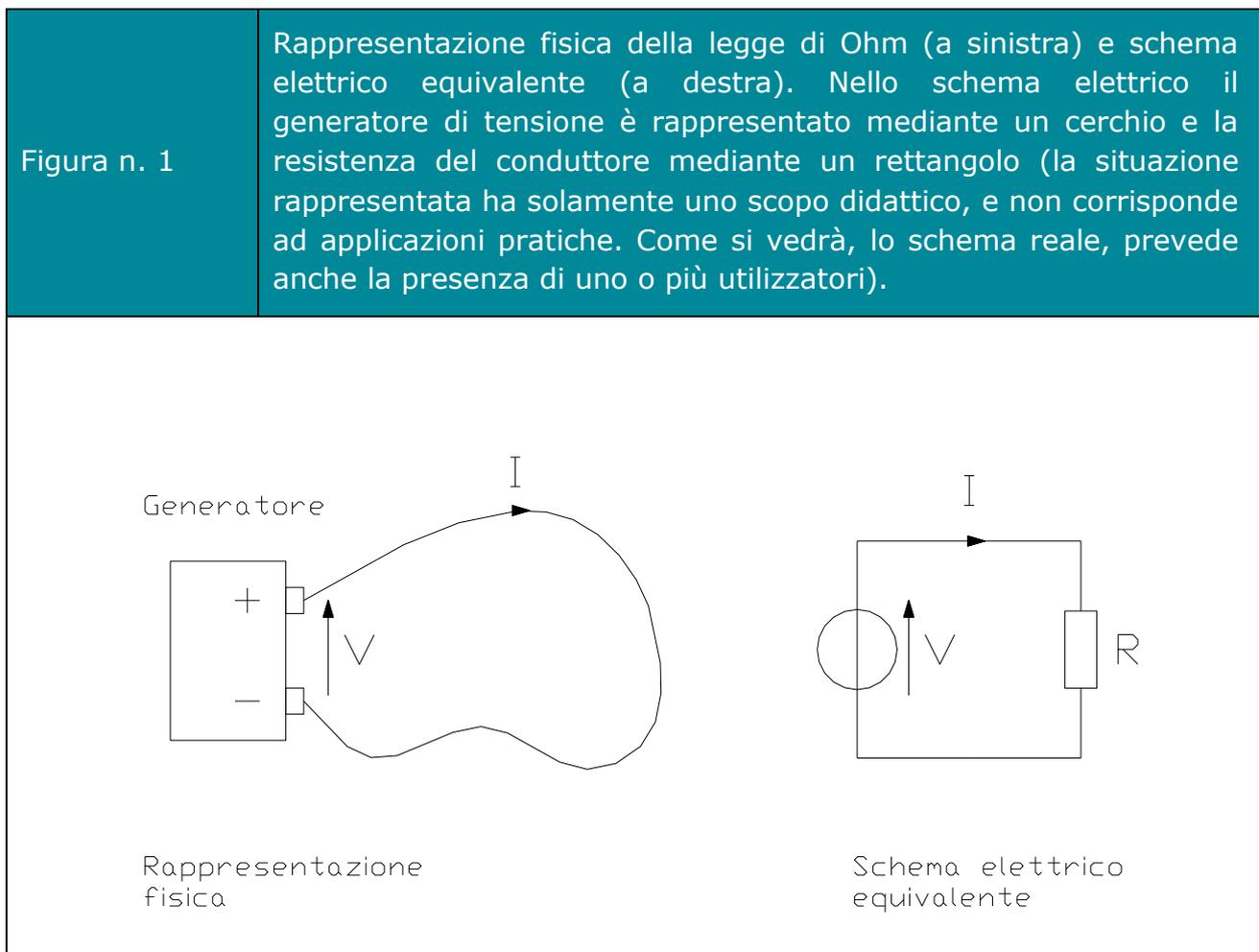
1. La legge di Ohm

La prima relazione che si deve conoscere per comprendere i fenomeni elettrici è la "legge di Ohm", che si può esprimere come segue:

*se ai capi di un conduttore avente **resistenza** elettrica definita, di valore pari a R , si applica una **tensione** di valore V , mediante un generatore, nel conduttore passa una **corrente** elettrica (fig. 1). Il valore della corrente I è dato dal rapporto tra il valore della tensione applicata V ed il valore della resistenza del conduttore R ", come rappresentato dalla formula:*

$$I = V/R$$

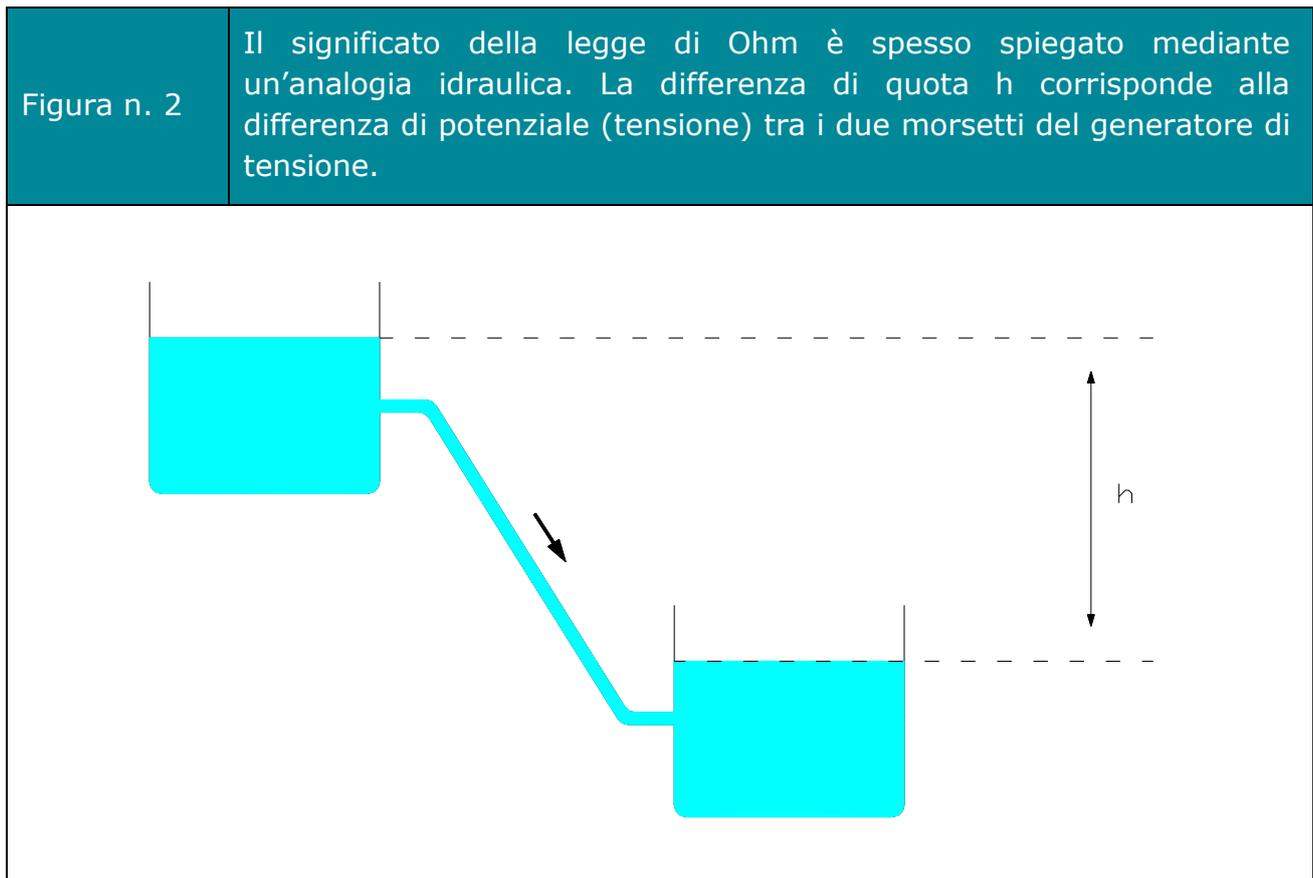
Per la definizione fisico-matematica delle grandezze introdotte, si rimanda alla bibliografia. Ci si limita qui a dire che la corrente consiste in un flusso di cariche elettriche (elettroni o ioni).



Per descrivere intuitivamente il significato delle stesse grandezze, si può ricorrere ad una analogia idraulica. Si pensi ad esempio a due serbatoi d'acqua (fig. 2); se questi vengono posti a quota differente, l'acqua contenuta nei due serbatoi viene a trovarsi in condizioni di energia differenti (è maggiore quella del serbatoio posto più in alto). Se i due serbatoi vengono collegati mediante una tubazione, la differenza di energia tra i due serbatoi dà luogo ad un flusso di acqua nella condotta, la cui portata è tanto maggiore quanto minore è la resistenza idraulica della stessa.

Si può pensare quindi:

- ad una corrispondenza tra la differenza di quota dei due serbatoi e la tensione (chiamata anche **differenza di potenziale**, o **d.d.p.**) presente tra i due morsetti di una batteria, o tra i due poli di una presa a spina;
- ad una corrispondenza tra la portata d'acqua nel tubo e la corrente elettrica nel conduttore collegato tra i due morsetti o i due poli;
- ad una corrispondenza, infine, tra la resistenza idraulica opposta dalla tubazione al passaggio dell'acqua e la resistenza elettrica del conduttore.



La tensione V si misura in volt (simbolo V). Ad es. tra i morsetti di una batteria per autoveicoli è presente una tensione di 12 V (fig. 3). Tra i due poli di una presa a spina ad uso domestico (fase e neutro) vi è una tensione di 230 V (alternata).



La corrente I si misura in ampere (simbolo A). Correnti tipiche di apparecchiature elettriche di uso comune, quali elettrodomestici, lampade, ecc. vanno dai decimi di ampere a qualche ampere. Apparecchiature per uso industriale possono assorbire correnti di decine o anche centinaia di ampere. In caso di "elettrouzione", il passaggio di correnti dell'ordine di alcune decine di milliampere attraverso il corpo umano (mille volte più piccole di quelle tipicamente assorbite da apparecchiature industriali) è sufficiente ad innescare la fibrillazione ventricolare.

La resistenza elettrica R si misura in ohm (simbolo Ω). È un parametro caratteristico del dispositivo a cui viene applicata la tensione e dipende dal materiale da cui è costituito, dalla sua forma e dalle dimensioni. Ad esempio, nei cavi elettrici la resistenza è direttamente proporzionale alla lunghezza e inversamente proporzionale alla sezione dei conduttori.

2. Conduttori e isolanti

Da un punto di vista elettrico i materiali possono essere suddivisi in conduttori o isolanti, a seconda della loro tendenza ad opporsi al passaggio di corrente quando ad essi è applicata una tensione. Come si è visto, questa tendenza viene descritta mediante un parametro chiamato resistenza elettrica, che dipende dalle caratteristiche del materiale, oltre che dalla forma e dimensioni dello stesso.

A parità di forma e dimensioni, materiali definiti conduttori hanno resistenza fino a 1020 volte più piccola degli isolanti. Per questo motivo, a parità di tensione applicata, le correnti negli isolanti sono fino a 1020 volte più piccole di quelle nei conduttori e sono per questo considerate praticamente nulle.

Conduttori sono tutti i metalli che, in virtù della loro struttura chimico-fisica, possono condurre corrente mediante gli elettroni liberi del loro reticolo cristallino. Si usano principalmente il rame, l'alluminio e alcune loro leghe, per la loro elevata attitudine a condurre corrente e per alcune caratteristiche meccaniche che li rendono facilmente lavorabili e particolarmente idonei a realizzare circuiti e connessioni.

Tra i principali isolanti solidi vi sono la gomma, le materie plastiche, la ceramica, il vetro, la carta; tra i liquidi, gli oli minerali; tra i gassosi, i gas inerti come l'azoto e alcuni gas appositamente prodotti, quale ad esempio l'esafluoruro di zolfo. Anche l'aria è un isolante, ampiamente utilizzato nelle applicazioni elettriche, sebbene le sue caratteristiche dipendano molto dalle condizioni ambientali (umidità, inquinamento, temperatura, ecc.).

È facile comprendere l'importanza sia dei conduttori che degli isolanti ai fini dello sfruttamento dell'energia elettrica. I primi, connessi tra loro alle estremità, consentono di ottenere i circuiti desiderati per la circolazione di corrente. I secondi sono utilizzati per impedire il passaggio indesiderato di corrente su percorsi diversi. A tal fine, i conduttori che costituiscono i circuiti sono rivestiti da isolanti solidi, come nei cavi elettrici (fig.4) o sono comunque separati tra loro mediante interposizione di isolanti solidi, liquidi o gassosi (fig.5).

Figura n. 4 I più comuni cavi elettrici sono costituiti da conduttori rivestiti da isolanti solidi quali gomma o materie plastiche (ad es. PVC). Nell'immagine a destra è stato reso ben visibile il conduttore all'interno del rivestimento isolante.

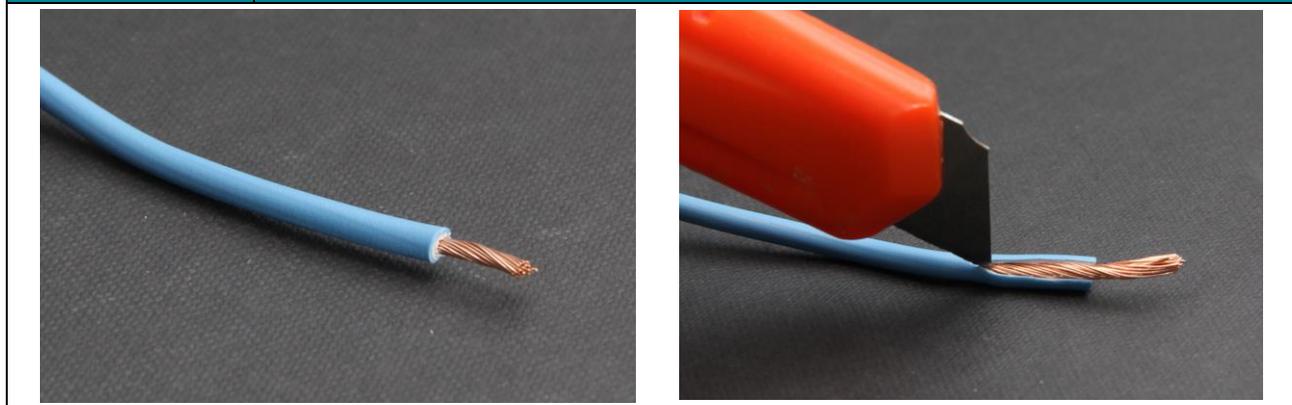
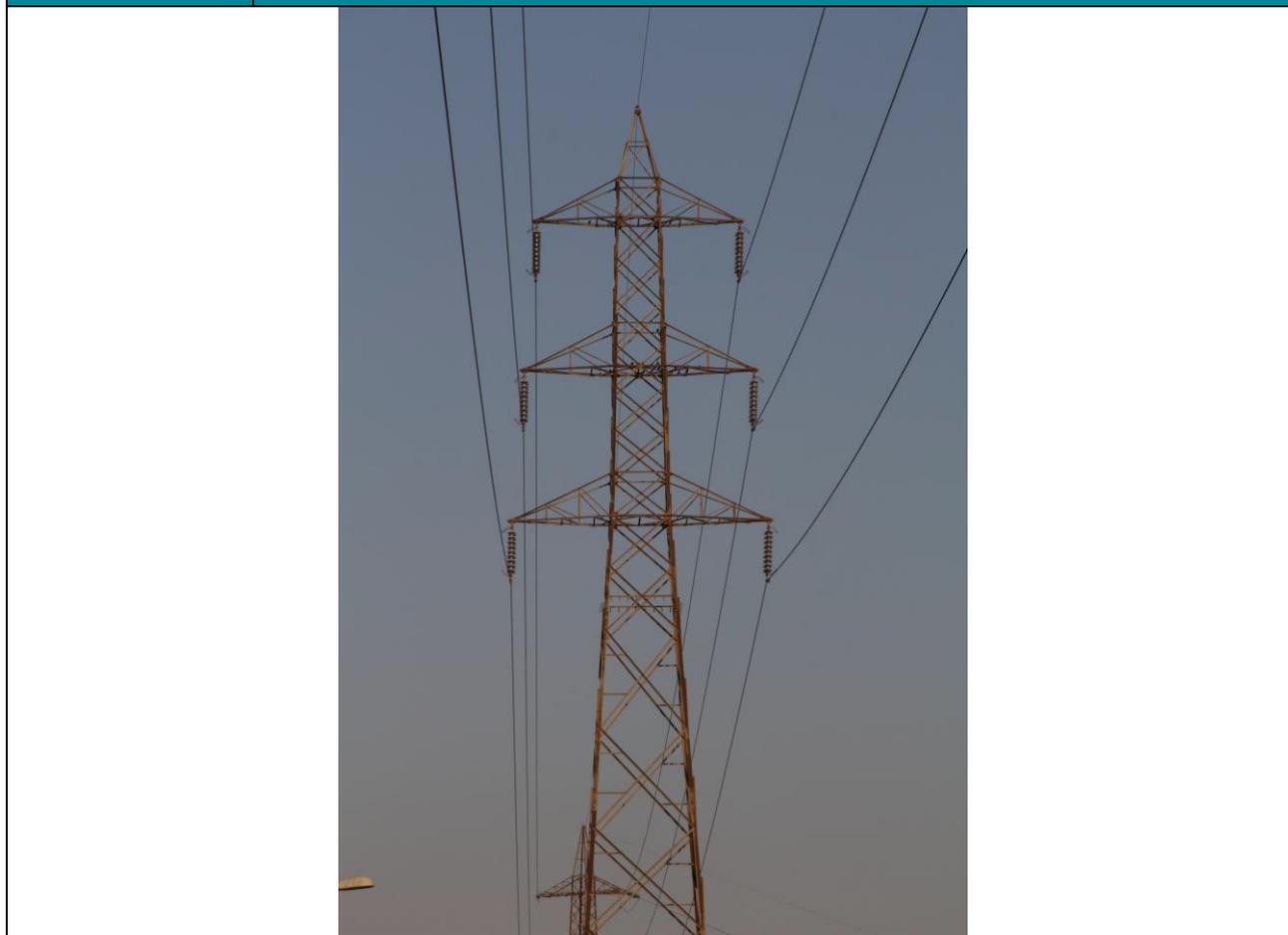


Figura n. 5 L'aria è un isolante elettrico ampiamente utilizzato.



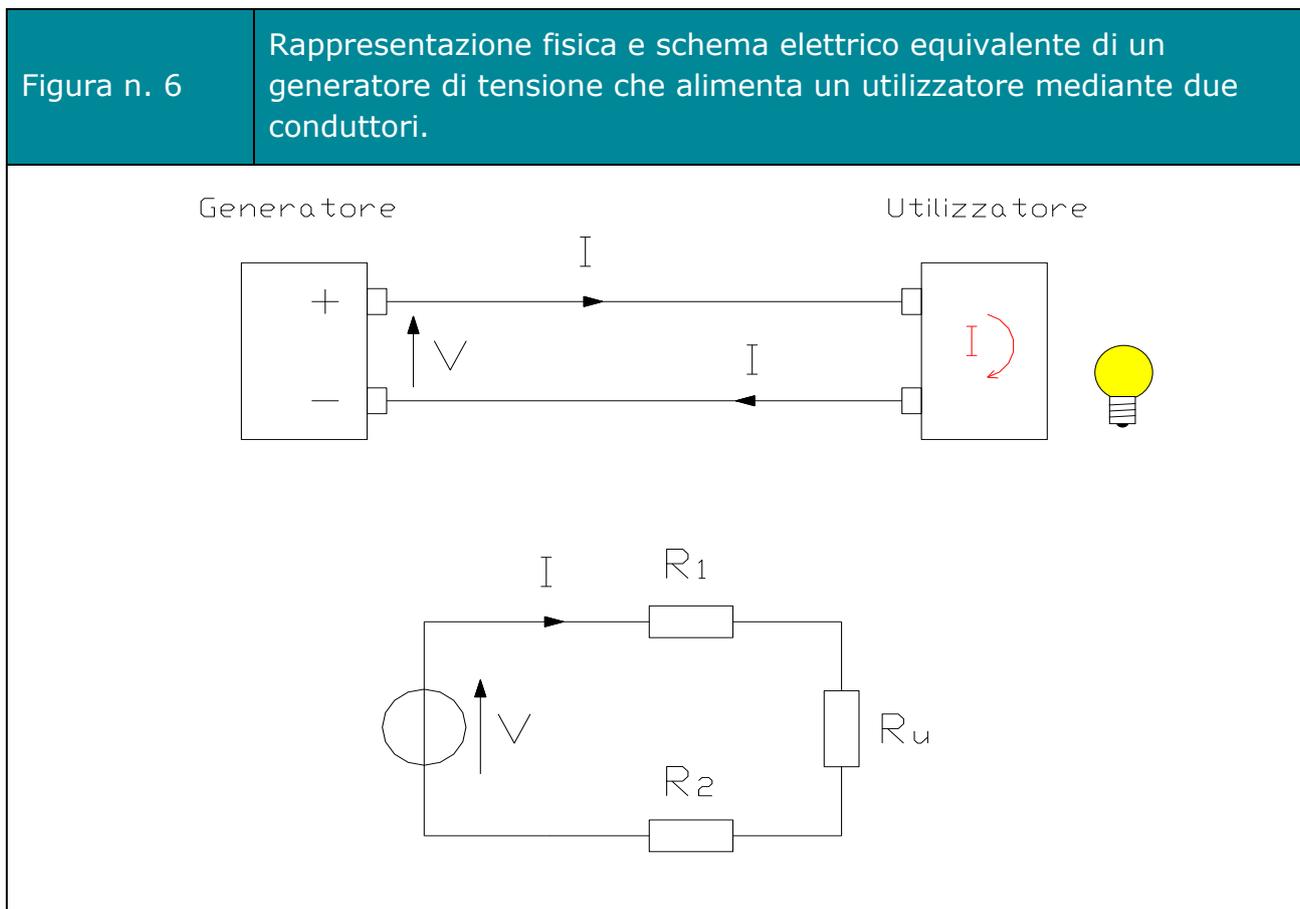
È necessario osservare che i materiali isolanti mantengono la loro capacità di opporsi al passaggio di corrente solo fino a certi valori di tensione.

Per ciascun isolante, definite le caratteristiche geometriche e dimensionali del manufatto realizzato, tenendo conto anche del grado di omogeneità dello stesso (negli isolanti solidi o liquidi) o delle condizioni ambientali (negli isolanti gassosi), esiste un valore massimo di tensione applicabile (corrispondente alla "rigidità dielettrica" del materiale). Superato questo valore, si può verificare l'innesco di una scarica elettrica, detta anche "arco elettrico", che perfora l'isolante con possibili effetti dannosi per la funzionalità e la sicurezza.

3. Gli apparecchi utilizzatori

Gli "apparecchi elettrici utilizzatori" per poter funzionare devono assorbire corrente. Per far questo sono collegati a sistemi in grado di mantenere ai loro morsetti un certo valore di tensione, i "generatori" (batterie di accumulatori, gruppi elettrogeni, rete elettrica).

Indipendentemente dal loro funzionamento e tipologia costruttiva, si può pensare, in maniera semplificata, che gli utilizzatori presentino un certo valore di resistenza nei confronti della tensione applicata. Il valore della corrente assorbita risulta pertanto determinato mediante la legge di Ohm.



Aumentando il livello di dettaglio della rappresentazione, si possono considerare anche i due conduttori di collegamento tra generatore e utilizzatore, descrivendo una situazione più simile a quella reale (fig. 6).

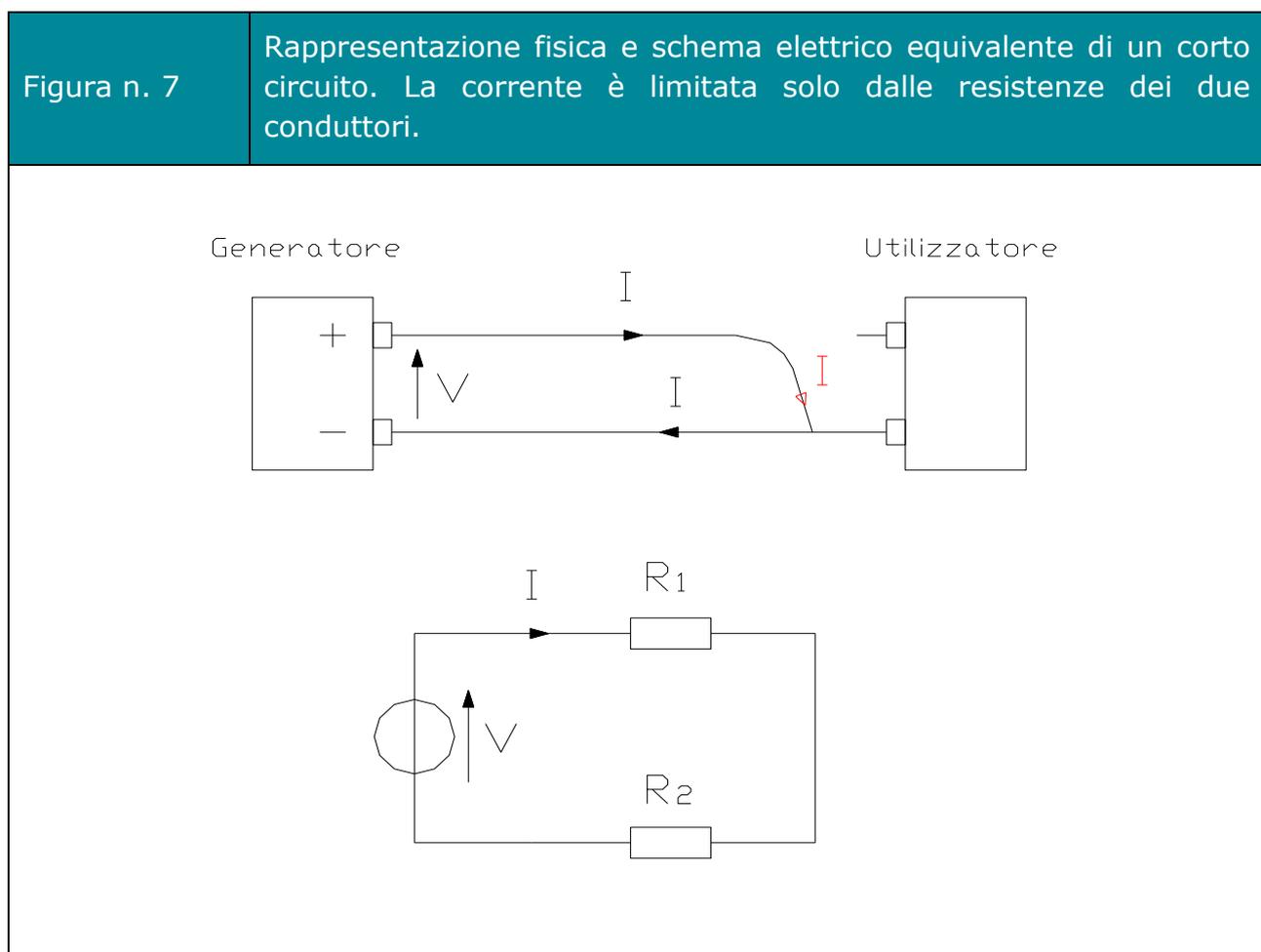
La legge di Ohm è ancora valida, ma la resistenza da considerare è quella totale del circuito R_{tot} , somma della resistenza R_u dell'utilizzatore (detto anche "carico") e di quelle dei due conduttori, R_1 e R_2 .

$$I = V/R_{tot}$$

Normalmente la resistenza dei collegamenti è trascurabile rispetto a quella dell'apparecchio utilizzatore. La resistenza di quest'ultimo, pertanto, è quella che determina il valore della corrente:

$$I = V/R_u$$

Ad esempio, valori tipici di resistenza¹ per gli elettrodomestici vanno da diverse decine fino ad alcune centinaia di ohm, mentre i cavi di un impianto elettrico ad uso domestico, hanno resistenza totale, dall'origine al punto più distante, dell'ordine di qualche decimo di ohm o inferiore.



¹ Nel caso reale, in corrente alternata, al posto della resistenza, si considera l'IMPEDENZA, come sarà accennato più avanti, nel paragrafo 5.

La figura 7 consente di comprendere bene l'importanza degli isolanti per il funzionamento degli impianti e delle apparecchiature elettriche.

Come già detto, sia per esigenze funzionali sia per quelle di sicurezza, è necessario che i conduttori che costituiscono i circuiti siano isolati rispetto all'esterno e tra di loro. Infatti, se non lo fossero, potrebbero entrare in contatto in alcuni punti realizzando circuiti nei quali la corrente sarebbe limitata solo dalla bassissima resistenza dei conduttori (e non dal carico). È il caso del cosiddetto "cortocircuito", nel quale gli effetti dell'elevata corrente che ne consegue possono risultare disastrosi.

4. La potenza elettrica

La seconda relazione semplificata che si vuole richiamare definisce operativamente la potenza elettrica.

*La **potenza** assorbita da un componente elettrico (circuito, apparecchio utilizzatore, ecc.) ai capi del quale è applicata una tensione V , percorso da una corrente I , è calcolabile mediante la seguente formula:*

$$P = V \times I$$

La potenza P si misura in watt (simbolo W). Nell'uso corrente si utilizza spesso un multiplo del watt, il kilowatt (kW).

Proviamo ora a fornire i valori di massima comunemente in gioco per potenze e correnti in impianti e apparecchi elettrici reali. Per far questo, dimentichiamo per un attimo il fatto che il loro funzionamento avviene in corrente alternata, e facciamo riferimento alla tensione di rete a 230 V , valore in "bassa tensione" monofase con cui è distribuita l'energia elettrica nelle abitazioni. Per comodità di calcolo approssimiamo tale valore a 200 V^2 .

Il più comune contratto di fornitura dell'energia elettrica per le abitazioni è di 3 kW . Con le ipotesi fatte, utilizzando la formula sopra descritta, si vede che a tale potenza contrattuale corrisponde una corrente di 15 A . Non è un caso, infatti, che l'interruttore generale dei quadri elettrici di appartamento abbia normalmente corrente nominale pari a 16 A . Questo è il valore massimo di corrente che approssimativamente può circolare in tali impianti.

Un valore tipico della potenza elettrica assorbita da un termoventilatore (fig. 8, a sinistra) è 2 kW . Utilizzando la formula, a tale potenza corrisponde un valore di corrente pari a 10 A . Consideriamo, inoltre, una delle vecchie lampadine ad incandescenza da 100 W (fig. 8, a destra), ormai non più commerciabili per motivi

² Con tale approssimazione, tra l'altro, si ricavano valori più vicini a quelli del caso reale in corrente alternata, nel quale si deve tener conto anche dello sfasamento tra tensione e corrente.

connessi all'elevato consumo energetico, ma un tempo largamente in uso. Dalla formula, si ricava per essa un assorbimento di corrente pari a 0,5 A.

Figura n. 8

Un comune termoventilatore ed una lampadina ad incandescenza.



Per un ambiente industriale, un valore tipico per un tornio di media potenza può essere quello di 30 kW, in relazione al quale si calcola una corrente di 150 A³.

Dai valori di corrente sopra riportati si possono ricavare due considerazioni:

- la prima è che risultano confermati gli ordini di grandezza delle correnti indicati nel primo paragrafo;
- la seconda è che, con le approssimazioni fatte, in bassa tensione monofase, ad ogni kW di potenza corrispondono circa 5 A di corrente.

La formula della potenza può anche essere applicata ai generatori con il significato che segue:

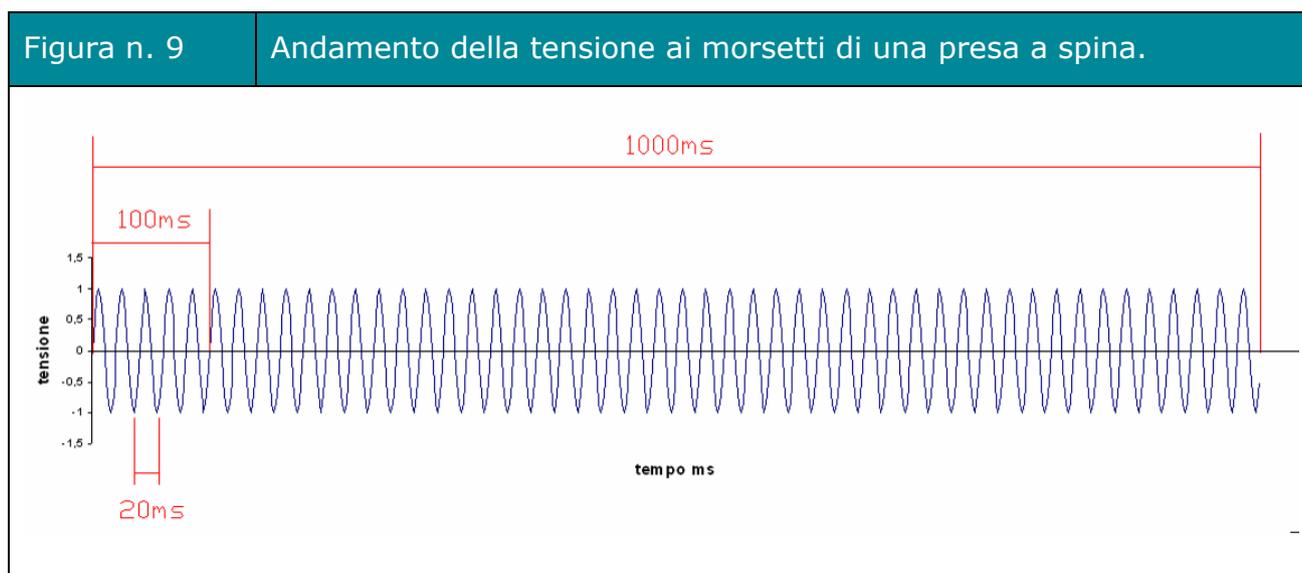
la potenza fornita da un generatore elettrico ai morsetti del quale è presente una tensione V è data dal prodotto della tensione V per la corrente I erogata agli stessi morsetti.

³ In realtà, per potenze così elevate si utilizzano normalmente sistemi trifase. In tal caso, si può dimostrare che, a parità di potenza, il valore di corrente risulta pari ad un terzo di quello richiesto nei sistemi monofase, come illustrato nel paragrafo 5.

5. Cenni sui fenomeni in corrente alternata

In realtà, l'energia elettrica viene normalmente prodotta, trasmessa e distribuita in corrente alternata sinusoidale, con frequenza pari a 50 Hz (frequenza industriale).

Questo significa che, collegando uno strumento in grado di visualizzare il valore della tensione in funzione del tempo (oscilloscopio) ai morsetti di una presa a spina in un comune appartamento, il tracciato che ne risulterebbe sarebbe simile a quello della figura 9, in cui la tensione oscilla da valori negativi a valori positivi cinquanta volte in un secondo, con andamento sinusoidale.



Collegando un utilizzatore alla presa a spina e visualizzando il valore della corrente, si potrebbe registrare per la stessa un andamento analogo, con un ritardo o un anticipo (sfasamento) più o meno grande rispetto alla tensione, in funzione delle caratteristiche del carico.

In queste condizioni, la legge di Ohm rimane formalmente valida, anche se al posto della resistenza si deve considerare un altro parametro, l'**impedenza**, per tener conto dei fenomeni elettromagnetici che in corrente alternata vengono provocati da induttanze e capacità. Tali fenomeni non saranno qui descritti.

In corrente alternata, la potenza assorbita dal carico (detta **potenza attiva**) ha un'espressione formalmente simile a quella in corrente continua, a meno di un fattore legato allo sfasamento tra corrente e tensione (angolo di sfasamento φ):

$$P = V \times I \times \cos\varphi$$

Poiché negli impianti e negli apparecchi, per motivi funzionali, si cerca di mantenere tale fattore a valori non inferiori a 0,9, torna applicabile la formula valida per la

corrente continua, a patto di utilizzare per la tensione un valore di 200 V, invece che 230 V⁴.

In questo modo, vista la sostanziale confrontabilità tra i valori delle grandezze in corrente continua e in alternata monofase, nella trattazione dei fenomeni relativi al rischio elettrico, si continueranno ad applicare, anche per i circuiti in corrente alternata, le formule per la corrente continua.

Per completezza, è opportuno richiamare il fatto che, per le potenze maggiori, vengono utilizzati impianti e apparecchi **trifase**. È possibile dimostrare che, in questi sistemi, il valore della potenza è calcolabile mediante la formula:

$$P = 3 \times V_{\text{fase}} \times I \times \cos\phi$$

dove V_{fase} , detta anche **tensione di fase**, è la tensione applicata a ciascuna delle tre fasi del circuito⁵, pari sempre a 230 V.

Si vede che, a parità di potenza, la corrente risulta essere un terzo di quella richiesta nei sistemi monofase. Questo aspetto è uno dei principali motivi per i quali al di sopra di certe potenze si impiegano i sistemi trifase, che consentono un miglior dimensionamento di impianti e apparecchiature.

Ad esempio, un gruppo frigorifero per il condizionamento di un edificio adibito ad uffici di media grandezza può assorbire una potenza elettrica di circa 300 kW, che richiederebbe una corrente di 1500 A se venisse alimentato da un sistema monofase. In realtà, utilizzando l'alimentazione trifase, la corrente assorbita risulta pari a 500 A, solo un terzo di quella che si avrebbe in un sistema monofase.

6. La legge di Joule

Come terza relazione fondamentale, si richiama infine la "Legge di Joule", secondo la quale in un conduttore di resistenza R , percorso da una corrente di intensità I , si sviluppa una **potenza termica** pari al prodotto:

$$P_J = R \times I^2$$

⁴ Con $\cos\phi = 0,9$, risulta, infatti: $P = 230 \times I \times 0,9 \approx 200 \times I$.

⁵ Nei sistemi trifase, l'energia elettrica è distribuita mediante tre conduttori (chiamati **conduttori di fase**) oppure quattro conduttori (tre conduttori di fase ed un **conduttore di neutro**). La tensione tra i conduttori di fase è detta **tensione concatenata**, quella tra i conduttori di fase ed il conduttore di neutro **tensione di fase**. Tale tensione è anche la tensione di ogni sistema monofase alimentato tra una fase ed il neutro del sistema trifase. In Italia, i più comuni impianti di distribuzione trifase in bassa tensione hanno tensione concatenata pari a 400 V (una volta 380 V) e una tensione di fase pari a 230 V (una volta 220 V).

Tale relazione è particolarmente importante nel campo della sicurezza elettrica perché mostra che al passaggio di corrente in un qualunque conduttore elettrico è sempre associato uno sviluppo di calore. La potenza termica dissipata è proporzionale alla resistenza e al quadrato della corrente; l'effetto di un aumento di corrente è perciò molto forte sull'aumento della dissipazione: se la corrente raddoppia, la potenza termica sviluppata quadruplica.

Si vedrà che tale fenomeno, qualora non controllato e contenuto entro certi limiti, costituisce uno dei principali pericoli della corrente elettrica.

7. I livelli di tensione

Si è parlato di distribuzione in bassa tensione, monofase a 230 V e trifase a 400 V (tensione concatenata).

In realtà la rete elettrica nazionale funziona a più livelli di tensione; l'allegato IX del d.lgs. 81/08 classifica i sistemi elettrici in base a tali livelli⁶:

- **categoria 0 (bassissima tensione)**: con tensione nominale minore o uguale a 50 V se a corrente alternata, e 120 V se a corrente continua;
- **categoria I (bassa tensione)**: con tensione nominale superiore a 50 V, ma non superiore a 1.000 V se a corrente alternata, e superiore a 120 V, ma non superiore a 1500 V se a corrente continua;
- **categoria II (media tensione)**: con tensione nominale superiore a 1.000 V se a corrente alternata, e superiore a 1500 V se a corrente continua, ma comunque non superiore a 30.000 V;
- **categoria III (alta tensione)**: con tensione superiore a 30.000 V.

A cosa servono tanti livelli di tensione?

Come già detto, la potenza elettrica è determinata dal prodotto della tensione per la corrente. Si può dunque ottenere la stessa potenza o con tensioni elevate V_1 e piccole correnti I_1 , oppure con tensioni ridotte V_2 e grosse correnti I_2 :

$$P = V \times I = V_1 \times I_1 = V_2 \times I_2$$

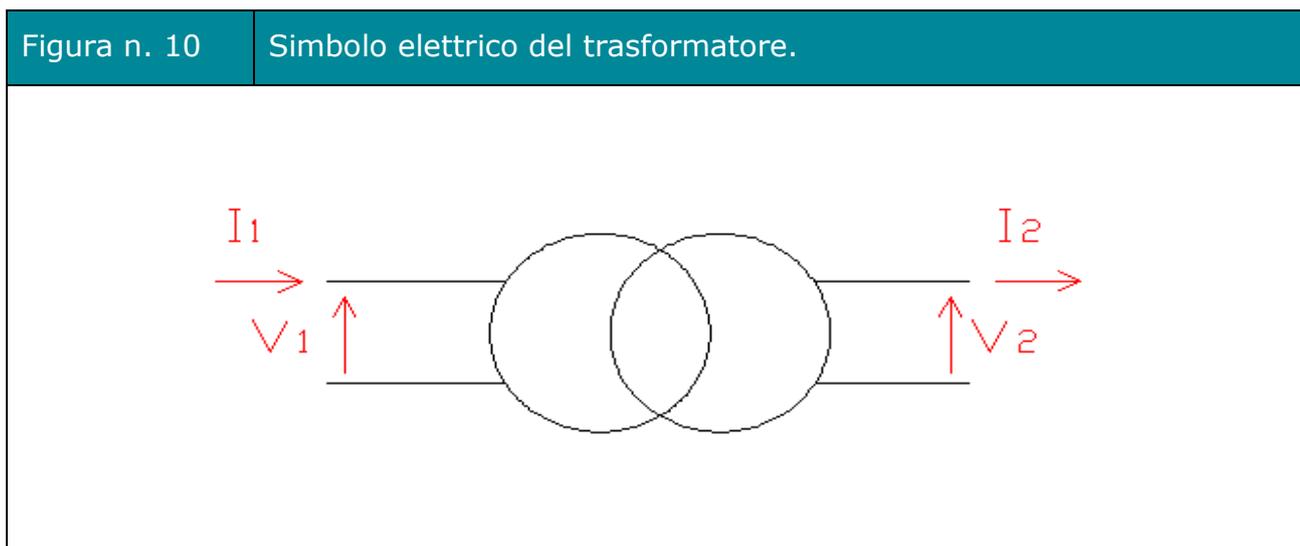
La generazione di energia elettrica è concentrata principalmente nelle centrali di produzione, situate in prossimità dei luoghi in cui sono reperibili le risorse energetiche primarie o dove è comunque possibile garantirne un agevole approvvigionamento. L'energia prodotta deve poi essere trasmessa a distanze più o

⁶ Non sempre la classificazione dei livelli di tensione presente nelle varie norme tecniche nazionali ed internazionali, corrisponde a quella del d.lgs. 81/08. L'ultima edizione della norma CEI 64-8 (2012), ad esempio, ha spostato il limite superiore di tensione dei sistemi di categoria II da 30 kV a 35 kV (la classificazione presente nella precedente edizione della norma tecnica era invece perfettamente congruente con il d.lgs. 81/08).

meno grandi fino ai diversi centri di carico (centri abitati, insediamenti industriali, ecc.), nei quali deve essere distribuita alle varie utenze (impianti utilizzatori o carichi concentrati).

Quello che si cerca di fare è trasmettere energia ai valori di potenza richiesti di volta in volta dal carico nell'arco della giornata, facendo fluire nelle linee di trasmissione correnti quanto più piccole possibile. Questo perché grosse correnti determinano elevate perdite di energia per effetto Joule; inoltre con correnti elevate, la tensione all'estremità finale della linea può risultare molto minore di quella all'origine della stessa, a causa di un fenomeno chiamato "caduta di tensione", legato sia al valore della resistenza di linea, sia al valore della corrente.

Esistono macchine elettriche statiche, chiamate **trasformatori**, che hanno la funzione di prelevare, ai morsetti di ingresso, una potenza a certi valori di tensione e di corrente e fornire, in uscita, la stessa potenza con valori di tensione e corrente diversi (fig. 10). Sono macchine passive che non generano altra potenza, ma variano semplicemente i valori di tensione e corrente lasciando inalterata la potenza tra ingresso e uscita.



Nelle centrali, l'energia viene prodotta dai generatori in media tensione; il livello di tensione viene elevato mediante trasformatori "elevatori" fino ai valori dell'alta tensione, con la quale l'energia viene trasmessa a distanze anche elevate, con ridotti valori di corrente; in prossimità dei centri di carico la tensione viene nuovamente abbassata, con trasformatori che compiono la funzione inversa, per essere distribuita e resa disponibile in media tensione o bassa tensione agli utilizzatori (figg.11 e 12).

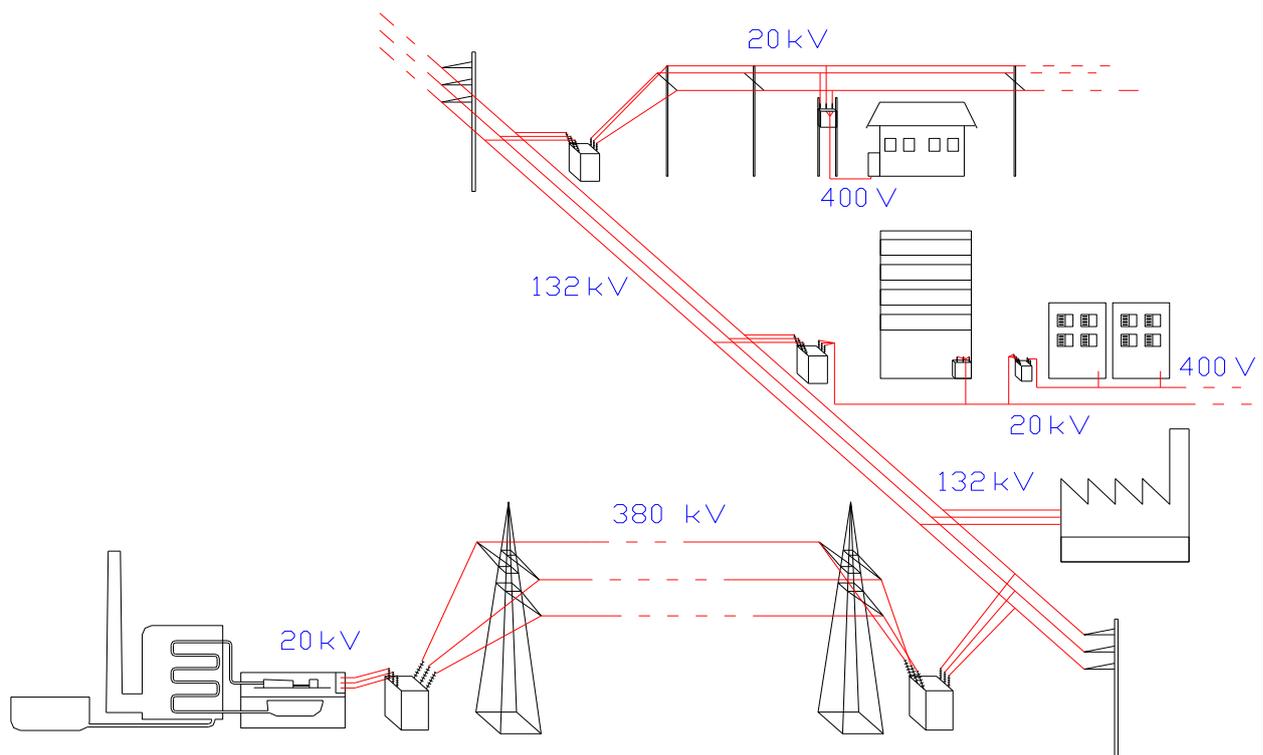
Il motivo per cui in prossimità degli utilizzatori si preferisce ricorrere a livelli di tensione più bassi dipende sia dal fatto che elevati livelli di tensione richiedono un sovradimensionamento degli isolamenti degli apparecchi, sia da motivi di sicurezza legati alle elevate correnti che potrebbero attraversare il corpo umano in caso di contatto simultaneo con due parti tra cui è presente una tensione elevata.

Sebbene il d.lgs. 81/08 e le norme tecniche definiscano degli intervalli di tensione, in realtà le tensioni che si utilizzano sono standardizzate secondo la categoria dei sistemi elettrici:

- in bassa tensione, i valori utilizzati sono 230 V monofase e 400 V trifase;
- in media tensione, sono valori frequentemente utilizzati 10 kV, 15 kV e 20 kV;
- in alta tensione, valori caratteristici sono, ad esempio 66 kV, 132 kV, 220 kV, 380 kV.

Figura n. 11

Esempio dei vari livelli di tensione normalmente impiegati in fase di produzione, trasmissione e distribuzione dell'energia elettrica. Si vede che, nei grossi stabilimenti industriali, l'energia elettrica viene talvolta consegnata anche in alta tensione (es. 132 kV), mentre la distribuzione per utenze civili (urbane o rurali) avviene normalmente in media (es. 20 kV) o bassa tensione (400 V). Il passaggio da un livello di tensione ad un altro viene realizzato sempre mediante trasformatori.





Bibliografia

- F. Iliceto, 1984. Impianti Elettrici, PATRON
- G. Conte, 2014. Manuale di impianti elettrici, HOEPLI
- L. Olivieri, E. Ravelli, 1987. Elettrotecnica industriale, CEDAM
- L. Simoni, 1996. Proprietà dielettriche e scarica dei materiali isolanti elettrici, CLUEB
- C. Mencuccini, V. Silvestrini, 1988. Fisica II, Elettromagnetismo e ottica, Liguori
- Norma CEI 64-8/2: Impianti elettrici utilizzatori a tensione nominale non superiore a 1000 V in corrente alternata e a 1500 V in corrente continua. Parte 2: Definizioni.

Data di chiusura del documento: 11/10/2018

Conoscere il rischio

Nella sezione Conoscere il rischio del portale Inail, la Consulenza Tecnica Accertamento Rischi e Prevenzione (Contarp) mette a disposizione prodotti e approfondimenti normativi e tecnici sul rischio professionale, come primo passo per la prevenzione di infortuni e malattie professionali e la protezione dei lavoratori. La Contarp è la struttura tecnica dell'Inail dedicata alla valutazione del rischio professionale e alla promozione di interventi di sostegno ad aziende e lavoratori in materia di prevenzione.

Per informazioni

contarp@inail.it